

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Tesis presentada como parte de los requisitos de la Universidad Nacional del Litoral, para la obtención del grado académico de:

Magister en Ciencias y Tecnología de Alimentos

“Determinación de las condiciones de extrusión adecuadas para elaborar harina de maíz con características similares a las de una harina nixtamalizada”

Por

Bioq. Aníbal Darío Haller

Director de Tesis: Ing. Qco. Rolando José González

2007

Agradecimientos

**A la Universidad Nacional del Litoral, y a la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas, por haberme formado profesionalmente

**A la Facultad de Ingeniería Química y particularmente al Instituto de Tecnología de Alimentos por haber permitido elevar mi formación, a través del dictado de los cursos del Magíster en Ciencia y Tecnologías de Alimentos.

**Al Ingeniero Rolando González, por la dedicación en la dirección de esta Tesis, por su gran ejemplo de trabajo y por sus constantes consejos, tanto en lo profesional como en lo personal.

**Al Instituto de Tecnología de Alimentos por haberme dado la gran oportunidad de realizar el trabajo experimental para la Tesis.

**Al Magister Roberto Torres y al Ing. Qco. Mario De Greef, por haber sido ambos mis principales guías en los procedimientos prácticos desarrollados en Planta Piloto

**A la Tca Sup. en Alimentos Adriana G. Bonaldo y al Magister Carlos A. Osella, por su ayuda en las tareas de laboratorio.

**A todo el personal docente del Instituto de Tecnología de Alimentos, siempre atento a mis consultas y dispuesto a brindar valiosos minutos de su tiempo, contribuyendo desinteresadamente para la realización del presente trabajo.

A mis padres, por haberme dado **libertad y sustento, siempre.

"Valora tu éxito en base a aquello a lo que
has debido renunciar para obtenerlo"

Dalai Lama

Dedicado a mi esposa Mariana, a mi hija Nahir y a
mi hijo Martín (por nacer)

RESUMEN.....	I
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aspectos Generales	1
1.2 El grano de maíz.....	3
1.2.1 Generalidades, composición y características.....	3
1.2.2 Usos del maíz	6
1.2.3 El maíz en Argentina.. ..	8
1.3 El Almidón: principal componente de los cereales.....	10
1.4. Tortillas de maíz	17
1.4.1 Introducción	17
1.4.2 Proceso de elaboración tradicional.....	17
1.4.3 Aspectos nutricionales de tortillas.....	23
1.4.4. Aplicación de extrusores en la elaboración de harinas para tortillas.....	24
1.5. El proceso de extrusión	26
1.5.1. Generalidades	26
1.5.2. Factores que afectan el proceso de extrusión	28
1.5.2.1 Propiedades de alimentación.....	28
1.5.2.2. Parámetros de operación del extrusor.....	30
1.5.3. Aplicación de la extrusión en alimentos.....	32
1.5.4. Transformaciones del material durante la extrusión.....	35
1.5.5. Métodos de evaluación del material extrudido.....	38
2. OBJETIVO GENERAL.....	39
2.1. Objetivos particulares.....	39

3. MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1. Ensayos previos	39
3.1. a. Elaboración de tortilla con proceso tradicional	39
3.1.b. Elaboración de tortilla con “Maseca”.....	40
3.1.c. Evaluación de la aptitud de la masa para elaborar tortillas.....	42
3.2. Secuencia para la obtención de las muestras extrudidas aptas para elaborar tortilla.....	43
3.2.a. Secuencia general.....	43
3.2.b. Selección y caracterización de las muestras de maíz a utilizar.....	44
3.2.c. Definición de las condiciones de molienda para la harina de extrusión.....	45
3.2.d Determinación de la composición centesimal de la harina obtenida para extrudir.....	46
3.2.e. Selección de los niveles de las variables de extrusión, adopción del diseño experimental y obtención de las muestras extrudidas.....	47
3.3. Evaluación de las muestras extrudidas.....	48
3.3.a. Adopción del diagrama de molienda de las muestras extrudidas y obtención de la harina para tortillas.....	48
3.3.b. Evaluación de las características fisicoquímicas.....	49
3.3.c. Evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.....	52
3.4. Análisis estadístico de los resultados.....	52

4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	52
4.1. Dureza del endospermo del maíz.....	52
4.2. Diagrama de Molienda de los granos.....	53
4.3. Resultados de ensayos previos para definir las condiciones de extrusión y adopción del diseño experimental.....	56
4.3.a. Factor Temperatura.....	56
4.3.b. Factor Humedad.....	56
4.3.c. Adopción de diseño experimental.....	57
4.4. Evaluación de las muestras extrudidas.....	57
4.4.a. Adopción del diagrama de molienda de las muestras extrudidas y obtención de la harina para tortillas.....	57
4.4.b. Respuestas relacionadas con la operación de extrusión.....	59
4.4.c. Respuestas relacionadas con las características fisicoquímicas.....	63
4.4.c.1. Valores obtenidos.....	63
4.4.c.2. Almidón dañado.....	64
4.4.c.3. Solubilidad en agua.....	68
4.4.c.4. Absorción de agua (AA).....	70
4.4.c.5. Consistencia a 95°C (C95).....	73
4.4.c.6. Retrogradación a 50°C.....	76
4.4.c.7. Observación Microscópica.....	78
4.4.d. Relación entre las respuestas vinculadas a las propiedades fisicoquímicas.....	79
4.4.e. Conclusión acerca del efecto de las variables (H y T) sobre cada una de las respuestas.....	81

4.4.f. Evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.....	82
4.4.f.1. Penetración.....	83
4.4.f.2. Humedad de masa.....	86
4.4.f.3. Puntaje.....	89
4.4.f.4. Conclusiones acerca de la evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.....	92
4.5. Relación entre el Puntaje y el grado de cocción.....	93
5. CONCLUSIONES FINALES.....	94
6. BIBLIOGRAFIA.....	94

Resumen

Argentina es el segundo exportador mundial de maíz. Criaderos y la industria molinera tienen interés en expandir el uso del maíz como alimento. La tortilla de maíz es un alimento popular en México, y es sabido que aún cuando el maíz blanco es preferido, el uso de maíz amarillo es también aceptable. Además la extrusión ha sido propuesta para la obtención de harina de maíz precocida apta para tortillas. No obstante es escasa la información acerca del efecto de varios factores tales como la dureza del endospermo y las condiciones de extrusión sobre la aptitud para tortilla.

Los objetivos de la presente tesis fueron obtener harinas precocidas de maíz por extrusión aptas para elaborar tortillas, desarrollar una metodología para la elaboración de tortillas y analizar el efecto de algunos factores tales como la dureza del endospermo de maíz y las condiciones de extrusión sobre las características fisicoquímicas de la harina extrudida y su relación con la aptitud para elaborar tortilla.

Se utilizaron dos tipos de maíz con distinta dureza de endospermo: uno dentado (Pioneer 30R76) y el otro colorado duro (Dekalb 764), los cuales fueron molidos para obtener las sémolas correspondiente con granulometría adecuada para la extrusión. La extrusión se llevó a cabo con un extrusor Brabender y las condiciones de extrusión fueron seleccionadas de acuerdo a un diseño experimental del tipo factorial, con la humedad de la sémola (rango entre 27 y 35%) y la temperatura de extrusión (rango entre 114 y 150°C) como factores independientes. El efecto de estos factores sobre las propiedades de la harina extrudida, fue analizado mediante la metodología de superficie de respuesta. Las muestras extrudidas molidas fueron evaluadas determinado: % de Almidón

Dañado (AD), Absorción de Agua (AA), Solubilidad en Agua (S), Retrogradación a 50°C (Retro), Consistencia a 95°C (C95) y con la Observación Microscópica. Para evaluar la aptitud de las muestras para obtener tortillas se prepararon las masas correspondientes y se realizaron ensayos de Penetración, Humedad de masa y Puntaje (el cual involucra a 2 de los atributos de calidad más importantes de las tortillas: el inflado y el rolado). En ensayos previos se desarrolló la metodología para elaborar tortillas, y se adoptaron los criterios para evaluar la calidad de las mismas. Se utilizó como referencia, una harina comercial "nixtamalizada" de origen mexicano, marca "Maseca". Las muestras extrudidas fueron molidas siguiendo un diagrama de molienda que permitió obtener una harina con una distribución de tamaño de partículas similar a "Maseca".

Los resultados de la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las muestras extrudidas, indican que, teniendo en cuenta los valores de AD y AA, el maíz con endospermo más duro (Dekalb 764), presenta menor grado de cocción que el Pioneer 30R76. Al evaluar la aptitud de las muestras procesadas para elaborar tortillas, y comparando los valores de Penetración de las 2 muestras de maíz con el de "Maseca", se observa que éste último es intermedio respecto a los valores de Pioneer 30R76 mientras que siempre es menor respecto a los valores de Dekalb 764. Esto indica que todas las muestras correspondientes a Dekalb 764 resultaron ser más blandas que las muestras de "Maseca". Analizando los valores de Humedad de Masa, se observa que el valor de "Maseca" es intermedio respecto a los valores de Pioneer 30R76 mientras que siempre es mayor respecto a los valores de Dekalb 764 (excepto para la muestra obtenida a 150°C y 27% H, que presenta un valor

aproximadamente igual al de "Maseca"). Con respecto al Puntaje, los mayores valores se obtienen con el Pioner 30R76, y para algunas condiciones estos son cercanos al de "Maseca", mientras que con el Dekalb 764 se observa que en la mayoría de los casos no se obtuvieron tortillas con puntaje aceptable.

Se puede concluir que la metodología propuesta en esta Tesis ha permitido demostrar que es posible la obtención por extrusión, de harinas precocidas aptas para elaborar tortillas. El efecto de la dureza del endospermo fue significativo y el uso de maíces de endospermo blando es recomendado. Las condiciones de extrusión más adecuadas serían aquellas que permiten alcanzar grados de cocción intermedios, los cuales pueden ser obtenidos en las siguientes condiciones: 114°C-27%H, 132°C-27%h, 132°C-31%h, y 150°C-35%H

Abstract

Argentina is the second maize grain world exporter. Breeder and milling industry have interest to expand de use of maize in human food. Maize tortilla is a staple food in México, and is known that even though white endosperm maize is preferred, the use of yellow maize is also acceptable. Besides that, extrusion process has been proposed to obtain a precooked maize flour suitable for making tortilla. However, information about the effects of several factors, such as the endosperm hardness and extrusion conditions, on the suitability for tortilla is scarce.

The objectives of this thesis were to obtain an extruded precooked maize flour by extrusion to be used for "tortilla"; to establish a methodology to prepare

“tortilla” y to analyse the effects of some factors, such as maize endosperm hardness and extrusion conditions on the suitability for making tortilla.

Two type of maize, having different endosperm hardness, were used: a dent (Pioner 30R76) and a hard red (Dekalb 764), which were ground to obtain the corresponding grits with particle size adequate for extrusion. The extrusion was carried out using a Brabender extruder and the extrusion conditions were selected according to a factorial experimental design, taking grits moisture (range from 27 to 35%) and extrusion temperature (range from 114-150°C) as independent factors. The effects of these factors on extruded flour properties were analysed by surface response methodology. The extruded samples were evaluated by determining % of starch damage (AD), water absorption (AA), water solubility (S), retrogradation at 50°C (Retro), Consistency at 95°C (C95) and with microscopy observation. To evaluate the sample suitability to make tortilla, masa corresponding to each sample was prepared and penetration assay, mass moisture content and “score” (which take into account two of the most important attributes of tortilla quality: expansion and rolling). In previous assays a methodology to make tortilla was developed and quality criteria to qualify tortilla were adopted. A commercial “nixtamalized” flour of Mexican origin (“Maseca”), was used as reference sample.

Extruded samples were ground according to a diagram which permits to obtain flour with similar particle size distribution to that of “Maseca”

Results of the physicochemical properties evaluation shown that, taking into account AD and AA values, harder maize (Dekalb 764) has lower degree of cooking tan softer one (Pioner 30R76). Regarding the suitability to make tortilla, penetration values corresponding to “Maseca” were in between of Pioner ones,

while they were lower of those corresponding to Dekalb 764), indicating that that masa from Dekalb were softer than the others. Besides that, moisture content of masa made with "Maseca" are also in between of that of masa made with Pioneer samples, while it was lower than that of masa made with Dekalb 784 (except for sample obtained at 150°C and 27%, which had a value similar to that of "Maseca"). Regarding the "score", the highest values were obtained with Pioneer samples and for some experimental conditions, their values were similar to that corresponding to "Maseca". While in the case of Dekalb samples, it was observed that for almost all cases not acceptable "score" were obtained.

It is possible to conclude that the methodology proposed in this Thesis, has permitted to verify that it is possible to obtain by extrusion, precooked maize flours suitable for making tortilla. The effect of maize endosperm hardness was significant and the use of softer maize is recommended. The best extrusion conditions would be those that permit to obtain maize flour with an intermediate degree of cooking, which can be got by extruding grits from a dent maize, at the following conditions: 114°C-27%; 132°C-27%; 132°C-31% and 150°C-35%.

1. Introducción

1.1. Aspectos generales

El sistema agroalimentario (SAA), que es el gran sistema económico de la sociedad, ha sufrido grandes cambios en las últimas tres décadas. Esto fue consecuencia de los cambios producidos en la sociedad moderna pos-industrial, los cuales estuvieron relacionados con el desarrollo económico y que a través del aumento de rédito, provocó modificaciones sustanciales en el modelo de consumo (González *et al*, 1988).

Es sabido que en la fase primitiva de la sociedad, las actividades surgían para satisfacer las necesidades; mientras que en la fase avanzada ese mecanismo se invierte, y son las nuevas actividades las que generan nuevas necesidades. En una economía de opulencia (donde la oferta es superior a la demanda), este mecanismo es muy activo y produce un permanente defasaje entre la oferta de productos existentes y la demanda de productos nuevos (González *et al*, 1988).

El modelo de consumo moderno ha adquirido un carácter dual, es decir, al carácter tradicional (satisfacción de necesidades fisiológicas) se agregan servicios incorporados. Así, es posible clasificar las utilidades que brinda el alimento, en dos categorías: componente alimentaria y no alimentaria. La primera tiene límite propio y natural y está relacionada

con la cantidad de nutrientes que debe ingerir una persona, mientras que la segunda puede expandirse a medida que crece el nivel de vida (o de rédito). El resultado de estos cambios es que el precio que paga el consumidor por el alimento está influenciado en su mayor parte, por la componente no alimentaria. En este segundo componente están las bases del éxito de una empresa, la cual desarrolla sus nuevos productos teniendo en cuenta aquellas necesidades no alimentarias que el consumidor demanda, y no están siendo satisfechas (González *et al*, 1988).

Además de los cambios producidos en cada sociedad se debe agregar aquellos provocados por la globalización de la economía, que conjuntamente con la internacionalización de los alimentos, permite a los consumidores, tener acceso a productos de todas partes del mundo. La situación puede ser aprovechada por la industria argentina, analizando la posibilidad de ubicar nuevos nichos de mercado en distintos países, para sus productos elaborados.

Las posibilidades de ubicar nuevos mercados, conjuntamente con la necesidad de los productores de maíz y de la industria molinera nacional, de aumentar el valor agregado de sus productos, diversificando las características de sus productos, han hecho que se le preste especial atención a estos alimentos típicos de los pueblos centroamericanos. Es así que Molinos Indalar S.A. concretó la

instalación de una planta elaboradora de sémola de maíz precocida apta para elaborar arepas.

Argentina es uno de los principales productores y exportadores de maíz, habiendo alcanzado su producción la cifra récord de 22 millones de toneladas en el año 2007. Difícilmente exista otro cereal con posibilidades de empleo tan múltiples como el maíz.

1.2. El grano de Maíz

1.2.1. Generalidades, composición y características

Una clasificación común de las diferentes variedades de maíz es la siguiente:

* “Dent” (dentado.)Este es el maíz de mayor importancia comercial. Ocupa casi el 73% de la producción global. Se utiliza para alimento para ganado y fabricación de productos industriales como almidón, aceite, alcohol, jarabes de maíz, etc. Consiste de un núcleo harinoso con inclusiones laterales de almidón duro. Debido a que la parte alta del grano contiene almidón harinoso, la pérdida de humedad de esta área provoca un ligero colapso durante la maduración, que produce la apariencia dentada característica.

* “Flint” (duro). Similar al maíz “pop” pero de grano más grande. Este grano es cultivado en lugares en donde se requiere tolerancia al frío o donde las condiciones de germinación y almacenamiento son

pobres. Ocupa aproximadamente el 14% de la producción.

* “Flour” (blando). Es la variedad favorita para consumo humano. Consiste de granos suaves que son fácilmente molidos o cocinados para preparar alimentos como tortillas, atoles, tamales, etc. Ocupa aproximadamente el 12% de la producción global.

* “Pop”. Consiste de un grano esférico y pequeño con un núcleo harinoso (suave) y una cubierta cristalina (dura). La humedad atrapada en la parte harinosa se expande cuando se aplica calentamiento y estalla a través de la cubierta dura, creando las palomitas de maíz. Ocupan menos del 1% de la producción mundial.

* “Sweet” (dulce) Tiene un endospermo constituido principalmente de azúcar, con muy poco almidón. La producción anual es de menos del 1% del total, pero tiene un alto valor comercial por su utilidad como vegetal procesado (Watson, 1987).

El grano de maíz (como todo cereal) está constituido principalmente por tres partes características: a) el endospermo (aproximadamente 83% del peso del grano) que se compone de dos partes: una córnea (traslúcida, dura y frágil) y otra harinosa (opaca, blanda y con menor contenido de proteínas); b) el germen (10-12% del peso del grano), el cual es la parte con mayor valor nutricional (rico en vitaminas, minerales, proteínas, azúcares y aceite; y c) la cáscara o pericarpio, el cual posee alto contenido de fibra. Además, el grano presenta en su base una parte

fibrosa llamada “tip cap”, que es el residuo del pedicelo (parte con la que el grano está adherida al marlo).

La composición química del grano entero de maíz es la siguiente (% base seca): 8.1-11.5% de proteínas, 1.37-1.5% cenizas, 3.9-5.8% lípidos. Almidón 67.8-74% (Watson, 1987). No obstante, el valor de proteína puede ser menor al rango citado, según sea el tipo de maíz y las condiciones de cultivo.



Figura 1: La Planta de maíz – Sus partes

Los nutrientes que se encuentran en el grano de cualquier cereal presentan un patrón de distribución dentro de los diferentes componentes del mismo: el endospermo, la cascarilla, el germen, etcétera. Además de una reducción en el tamaño de la partícula, durante la molienda ocurre un cambio en el contenido de carbohidratos, fibra, grasa, minerales, proteínas y vitaminas. Se presenta una pérdida importante de nutrientes en la obtención de las harinas en comparación con los que están presentes en el grano original. El proceso para obtener harinas refinadas de trigo y de maíz reduce en forma significativa el contenido de vitaminas y minerales; en algunos casos, dicha disminución es superior al 70% del contenido en el grano original (Rosado *et al*, 1999).

El maíz entero es una buena fuente de tiamina, piridoxina y fósforo, y una fuente aceptable de riboflavina, niacina, folato, biotina, hierro y zinc. Sin embargo, muchos de estos nutrientes se pierden durante la molienda. Los micronutrientes que no se encuentran en cantidades significativas son las vitaminas A y E, y el calcio (Rosado *et al*, 1999).

1.2.2. Usos del Maíz

Históricamente, los pueblos latinoamericanos han hecho uso del maíz sin separar el endospermo del germen, moliendo el grano (descascarado o no) íntegramente (tortilla mexicana, tacos, etc.).

La forma en que se procesa y consume el maíz varía enormemente de un país a otro, siendo la harina refinada de maíz y la harina integral de maíz, dos de los productos más populares. Para producir la harina integral de maíz, se muele el grano entero para producir una harina granulada compuesta por partículas cuyo tamaño varía de grueso a más fino, mientras que la harina refinada de maíz se obtiene de la molienda del endospermo del grano de maíz después que el germen y las capas exteriores han sido removidos. Estos dos productos han reemplazado al maíz entero como componentes importantes de la dieta en muchos lugares del mundo (Rooney & Serna-Saldívar, 1987)

La industria de la molienda húmeda, también conocida como industria procesadora de almidón y glucosa, origina jarabes, en particular de fructosa, edulcorante de la mayoría de las industrias gaseosas. La obtención de jarabes, es un proceso de reciente desarrollo (principios de la década del 80) con fuerte contenido de bioingeniería, y ha alcanzado un importante nivel tecnológico.

La molienda seca del maíz tiene como objeto la separación de las distintas partes que componen el grano: endospermo vítreo, endospermo harinoso, germen y cáscara. Como productos primarios se obtienen: "hominy" y sémolas, y como productos secundarios: harina, cáscara y germen. Los trozos gruesos del endospermo ("hominy") se utilizan exclusivamente para la fabricación de alimentos para el

desayuno (copos o “corn flakes”). Los trozos finos (lo mismo que aquellos gruesos y medios), se refinan para obtener sémolas y harinas.

Esta molienda, prefiere el maíz duro colorado o “flint”, para lograr mayor rendimiento de sémolas, debido a la naturaleza vítrea córnea del endospermo. (Coscia, 1980).

Las sémolas (“grits”) se elaboran con distintas granulometrías y contenido de materia grasa y se emplean para fines culinarios (polenta y platos similares), en la industria cervecera y en la fabricación de expandidos (productos para copetín).

El germen, permite la obtención de aceite crudo, que convenientemente refinado se transforma en comestible. Los aceites vegetales son uno de los “commodities” agrícolas más valiosos y esenciales.

1.2.3 El Maíz en Argentina

El mejoramiento genético del maíz en Argentina, ha priorizado el rendimiento por hectárea. Ello está de acuerdo con el sistema de producción argentino y los mercados destinatarios de la producción. La calidad del grano no ha sido un objetivo prioritario porque nuestros maíces colorados duros ya tenían originariamente una calidad que los distinguía de los dentados comúnmente comercializados en los mercados internacionales. Al incorporar germoplasmas de líneas

dentadas o semidentadas, aumentaron los rindes; pero hubo disminución del color del endospermo y una tendencia a la indentación. El maíz amarillo dentado de origen estadounidense, tiene como rasgos particulares: gran rendimiento, color amarillo, menor contenido en lípido, una hendidura en la corona o parte superior del mismo y en la parte central del grano presenta una acumulación importante de almidón, que lo hace más blando y por lo tanto con menor rinde para la molienda seca; ya que se obtiene mayor porcentaje de harinas de menor valor. Pero es superior para la producción de almidones o molienda húmeda.

Una característica cualitativa importante del maíz es la dureza del endospermo, que repercute en: las características del proceso de molienda, las propiedades nutritivas, la elaboración para productos alimenticios y el rendimiento de los productos obtenidos mediante operaciones de molienda en seco y húmeda. La dureza del maíz está regulada genéticamente, pero se puede modificar mediante prácticas de cultivo y mediante la manipulación del grano cosechado. Rooney & Serna-Saldívar (1987) hallaron que el maíz de endospermo duro (o córneo) necesitaba más tiempo de cocción para la elaboración de tortillas. Bedolla & Rooney (1984) afirmaron que uno de los factores que influían en la textura de la masa de las tortillas es el tipo del endospermo. Por otra parte, los fabricantes de productos expandidos

("snacks"), prefieren las sémolas provenientes de maíz colorado duro (Robutti *et al*, 2002)

En Argentina la caracterización del maíz de acuerdo a la dureza del endospermo, ha sido realizada en el INTA Pergamino (De Dios *et al*, 1990 y 1992).

Para la evaluación de la dureza del endospermo, se utilizan varios indicadores tales como la relación "Grueso/Fino", la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y el índice de flotación (Robutti, 1995; De Dios *et al*, 1992).

1.3. El Almidón: principal componente de los cereales

Los granos de cereales almacenan energía en la forma de almidón. La cantidad de almidón varía con el tipo de cereal, pero generalmente se encuentra entre 60 y 75 %. Además de su valor nutritivo (es una excelente fuente de energía) el almidón juega un papel importante en las propiedades físicas de muchos de nuestros alimentos. Se encuentra en las plantas en forma de gránulo, éstos se forman en los plástidos, en este caso se llaman amiloplastos.

Está compuesto esencialmente por polímeros de α - D – glucosa, aunque contiene un número de constituyentes menores que aparecen en bajos niveles y afectan las propiedades del almidón, tiene un contenido en lípidos que oscila entre 0,5 y 1 %, la mayoría de éstos son

lípidos polares. Además de lípidos contiene fósforo, en forma de fosfolípidos, y nitrógeno, menos de 0,05 % (Hoseney, 1986).

Químicamente al menos se distinguen dos tipos de polímeros: amilosa, esencialmente lineal y amilopectina, altamente ramificada.

Amilosa: Polímero lineal de α - D – glucosa unidas con enlaces α 1 - 4, que tiene una masa molar (MM) aproximada de 250.000 (1500 unidades de glucosa anhidra), que varía no sólo entre especies sino que también dentro de la misma especie dependiendo del grado de madurez.

La naturaleza lineal le otorga a la amilosa propiedades únicas, como por ejemplo la capacidad de formar complejos con el yodo, alcoholes o ácidos (Hoseney, 1986; Biliaderis, 1992).

Estos complejos son denominados complejos de inclusión helicoidal. Es también responsable por su tendencia a asociarse con otras moléculas de amilosa y precipitar de la solución, puede rápidamente cristalizar de la solución o retrogradar. Retrogradación es el término usado para marcar la recristalización en geles de almidón.

Amilopectina: Como la amilosa, la amilopectina esta compuesta de α - D – glucosa, unida primariamente por enlaces α 1 – 4; está ramificada en mucho mayor extensión que la amilosa con 4 – 5% de α 1 – 6. Este nivel de ramificación produce una longitud de cadena promedio de 20 a 25 unidades de glucosa. La amilopectina tiene una MM

aproximada de 10^8 con 595.238 residuos de glucosa lo que da, tomado un promedio de cadena de 20 unidades de glucosa, 29.762 cadenas (Figura 2).

Estas cadenas son de tres tipos: cadena tipo A, compuesta de glucosa unidas por enlaces α 1 – 4; cadena tipo B, compuesta de glucosa unidas por enlaces α 1 – 4 y α 1 – 6; cadena tipo C, compuesta de glucosa unidas por enlaces α 1 – 4 y α 1 – 6, incluido el grupo reductor (Figura 3).

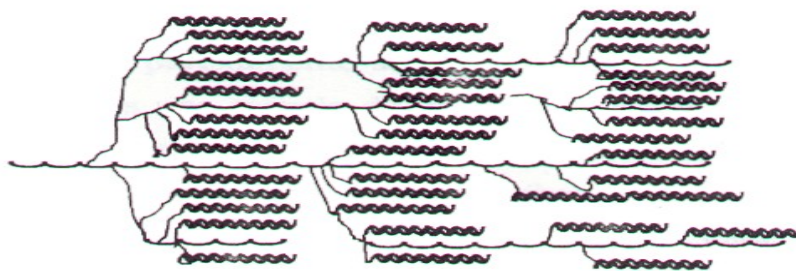


Figura 2: modelo racemoso de amilopectina. (Tomado de Jovanovich, 1997)

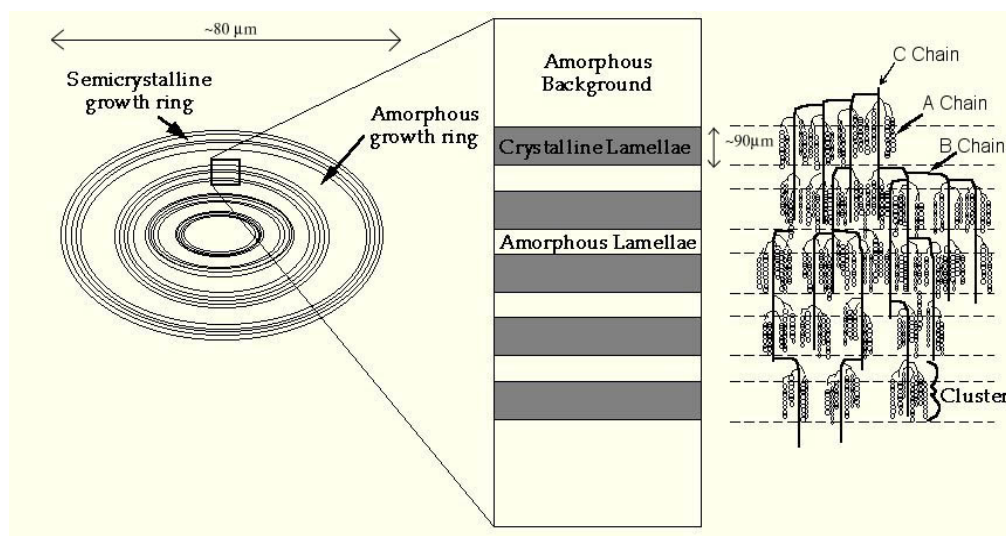


Figura 3: modelo racemoso de amilopectina

Los gránulos de almidón son parcialmente cristalinos y parcialmente amorfos. El carácter cristalino proviene de la organización de las moléculas de amilopectina dentro del gránulo, mientras que la región amorfa está formada por la amilosa que está distribuida al azar entre los clusters de amilopectina (Abd Karim *et al*, 2000).

El hecho de que el almidón es un material semicristalino ha sido demostrado por Katz en los años 30. Los gránulos intactos dan tres tipos de patrones de Rayos X, designados como A, B y C (Hoseney ,1986) (Figura 4).

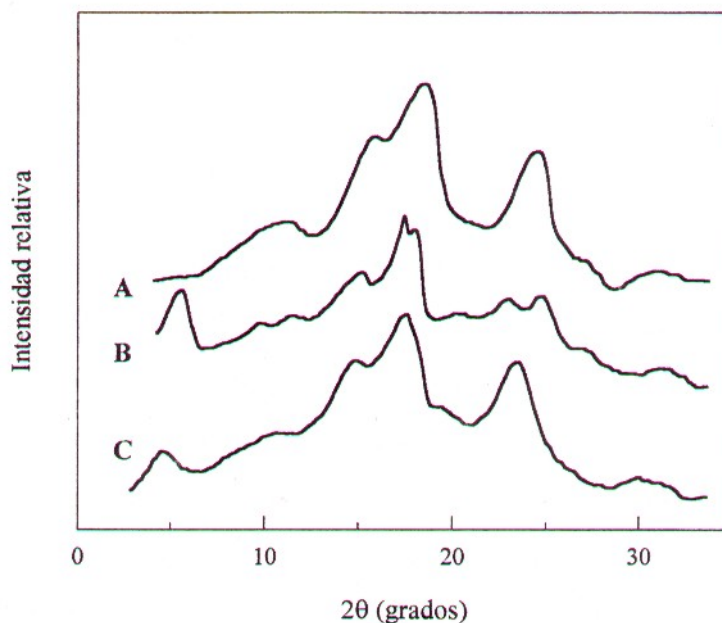


Figura 4: patrón de rayos X : A, B, y C (Extraído de Zobel *et al*, 1988)

La cocción normalmente causa la gelatinización del almidón o disrupción de los gránulos, dependiendo de la severidad de los tratamientos aplicados. El comportamiento de los almidones gelatinizados durante el enfriamiento y almacenamiento, generalmente se denomina retrogradación y es de gran interés ya que su profundidad afecta la calidad, aceptabilidad y vida de estantería, “*shelf-life*”, de los alimentos que contienen almidón. En el envejecimiento, las moléculas se reasocian, resultando efectos tales como precipitación, gelación cambios en la consistencia y opacidad. Se empiezan a formar los cristalitas y se acompaña del aumento de rigidez y separación de fases entre el polímero y el solvente (sinéresis).

La gelatinización del almidón es de primordial importancia en la industria de alimentos porque tiene un impacto fundamental sobre la textura de los productos con almidón y cuya evolución puede ser evaluada a través de la calorimetría diferencial de barrido (Biliaderis, 1983). El efecto de la retrogradación puede ser deseable o indeseable. Hay un consenso general que la retrogradación contribuye significativamente al “*staling*” o firmeza indeseable del pan o de otros alimentos que contienen almidón.

Los cambios dependientes del tiempo (propiedades físicas y químicas) pueden directamente contribuir a un correlato con la percepción sensorial o digestibilidad de los alimentos con almidón.

Aunque es importante enfatizar que en la mayoría de los casos, al seguir los cambios con un simple parámetro no provee una adecuada descripción de la retrogradación. La adopción de un procedimiento es crítico en asegurar la validez de los resultados (Abd Karim *et al*, 2000).

Es importante distinguir entre el corto tiempo de desarrollo de la estructura del gel vía cristalización de la amilosa y el largo tiempo donde la amilopectina recristaliza lentamente involucrando las ramas externas grado de polimerización (DP) = 15.

Para almidones que contienen amilosa y amilopectina, el gel se forma como una malla compuesta que consiste en gránulos hinchados enriquecidos en amilopectina (siempre que la integridad del gránulo se mantenga) llenando la matriz continua formada por amilosa.

Durante un tiempo largo de almacenamiento, la amilopectina recristaliza y así aumenta la rigidez de los gránulos hinchados el cual refuerza la fase continua.

Podemos referirnos a la gelatinización como la pérdida de orden (birrefringencia y cristalinidad) y al hinchamiento del gránulo, el cual en parte acompaña la pérdida de orden (Atwell *et al*, 1988; Lii & Lineback, 1977; Grenwood, 1984).

En el almidón de papa éstos dos procesos coinciden, mientras que en el almidón de trigo el hinchamiento tiene lugar 20°C más arriba de la temperatura de pérdida de birrefringencia (Blanshard, 1987).

El proceso de gelatinización es consecuencia de la ruptura de los puentes H entre los enlaces α 1 – 4 en los cristalitos y quizás en menor nivel entre las moléculas en las regiones amorfas.

La región amorfa está compuesta por amilosa y cadenas de A y B de amilopectina. Esta fase es menos densa y más susceptible a la modificación química y enzimática, la difusión de pequeñas moléculas solubles en agua (PM < 1000 Daltons), tiene lugar a través de esta región.

A temperaturas inferiores a la de gelatinización, la región amorfa absorbe agua y sufre un hinchamiento reversible. Los gránulos absorben relativamente grandes cantidades de agua cuando son expuestos a altas humedades relativas o se preparan soluciones, la humedad final del gránulo es de 40 – 50 % (gramo de agua / gramo de almidón seco) y representa el punto donde la fase amorfa está totalmente plastificada por el solvente.

Mientras en el almidón nativo la amilopectina es el principal responsable de la cristalinidad, la amilosa y amilopectina están involucrados en las reasociaciones moleculares en el envejecimiento de geles de almidón y productos horneados.

Para entender el proceso de gelatinización es necesario definir bajo qué condiciones se realiza. Pueden distinguirse procesos de equilibrio y de no equilibrio (Blanshard, 1987). Por analogía con polímeros

sintéticos, la gelatinización y retrogradación se pueden ver como fusión y recristalización del almidón en presencia de agua.

La técnica más utilizada en el estudio de la gelatinización del almidón es la calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cual revela varios eventos endotérmicos durante el calentamiento de suspensiones de almidón (Biliaderis, 1983)

1.4 Tortillas de maíz

1.4.1. Introducción

Uno de los alimentos de mayor consumo en Centroamérica, es la Tortilla de maíz. El consumo anual de tortillas en México, es de aproximadamente 10.000.000 de TN métricas, con ventas por 4 billones de dólares (Martínez-Bustos *et al*, 1995)

En países como EEUU, las tortillas y otros productos mexicanos han obtenido una gran popularidad. Esto ha generado un negocio multimillonario, con un mercado total para las tortillas de U\$S 2.86×10^9 (Campus-Baypoli *et al*, 1999)

En algunos países como Venezuela, UK, Canadá, Francia, Corea, Filipinas, China y Japón, el mercado de comida mexicana está creciendo rápidamente. (Martínez-Bustos *et al*, 1995)

1.4.2. Proceso de elaboración tradicional.

La tortilla se elabora con el grano de maíz entero, sometiéndolo a cocción en exceso de agua, y en presencia de Ca(OH)_2 , originando lo que se denomina nixtamalización.

Tradicionalmente, se usa maíz blanco duro para elaborar tortillas en México, pues se obtiene una tortilla blanca superior y una pérdida de sólidos relativamente inferior, que con las variedades de maíces más blandos (Sefah-Dedeh *et al*, 2004). Un factor importante que afecta la calidad del maíz para elaborar tortillas, es el adecuado almacenaje (Méndez-Albores *et al*, 2003)

Este proceso, hecho en forma artesanal, consiste en una cocción del grano entero en exceso de agua, con Ca(OH)_2 en cantidades que oscilan entre 0.5 y 2 % (P/P), durante un tiempo comprendido entre 20 y 55 minutos. Luego se deja en remojo el grano cocido, en el agua de cocción, durante varias horas (entre 12 y 20 horas). (Martínez-Flores *et al*, 1998 y 2002; Sahai *et al*, 2000; Bryant & Hamaker, 1997; Figueroa Cárdenas *et al*, 2001; Campus-Baypoli *et al*, 1999; Arámbula *et al*, 2001).

El maíz duro requirió mayor tiempo para su cocción, y el grado de cocción y de absorción de agua en el remojo, fueron menores comparados con maíz más blando (Almeida-Domínguez *et al*, 1997).

El punto final de la cocción, es subjetivo, y depende del tipo de maíz usado. Se acepta que el grano con agua de cal, está cocido, según las

características texturales del endospermo, el desprendimiento del pericarpio, y el ablandamiento del grano (Waliszewski *et al*, 2002)

Esta técnica de cocción alcalina precolombina, ablanda el pericarpio y permite al endospermo la absorción de agua, facilitando su molienda (Sefah-Dedeh *et al*, 2004)

Durante el remojo, el contenido de Ca del grano de maíz aumenta considerablemente, de un 0.01%, a más del 0.1% (P/P), correspondiendo estos valores al grano seco, y al grano nixtamalizado respectivamente. Esto es importante desde el punto de vista nutricional, debido a la importancia del Ca en la dieta humana. (Zazueta *et al*, 2002).

El proceso de difusión de Ca en el grano de maíz durante el remojo posterior a la cocción, es un proceso cinético, regido por distintos procesos de difusión, que se realiza principalmente en el pericarpio y endospermo. El remojo produce cambios en la cristalinidad y propiedades reológicas del almidón. El tiempo óptimo de remojo es de 7 a 9 horas, lo que produce una óptima incorporación de Ca al grano, de forma no lineal, con un óptimo de 0.25% (P/P) (Fernández-Muñoz *et al*, 2002; González *et al*, 2002).

Rodríguez *et al* (1996) demostraron que existen diferentes patrones de comportamiento de las propiedades de la tortilla, por encima y debajo de 0.2% de Ca(OH)_2 . Encontraron que la cristalinidad se incrementó al aumentar la concentración de Ca(OH)_2 , a concentraciones de hasta

0.2%, mientras que se revirtió esta tendencia al acercar la concentración al 1%. Este comportamiento fue atribuido a un entrecruzamiento del almidón inducido por el calcio.

Las propiedades fisicoquímicas de harinas nixtamalizadas por el método tradicional, dependen fundamentalmente del tiempo de reposo del maíz en el líquido de cocimiento, con un tiempo óptimo que está entre 7 y 9 hs. A estos tiempos de reposo, se encuentra el mayor desarrollo de viscosidad y la más alta calidad cristalina, para todas las distribuciones de partículas de harina de maíz nixtamalizada. (Fernández-Muñoz *et al*, 2002).

Durante la nixtamalización, los componentes del maíz son afectados por la cocción alcalina y posterior remojo (González *et al*, 2002). El almidón es parcialmente gelatinizado, parte de los componentes de la pared celular y proteínas se solubilizan, mucho del germen es retenido y parte de los lípidos son saponificados. Se ha demostrado que durante la cocción la cristalinidad del almidón de maíz se reduce y tiende a recuperarse durante el remojo y enfriamiento, debido a un proceso de recristalización (Mondragón *et al*, 2004).

El tiempo de remojo es crítico. Si es demasiado corto, los granos tendrán áreas duras, que dificultarán la molienda, y la masa resultante será seca y quebradiza. Si por el contrario, se prolonga demasiado este

paso, se originará una masa pegajosa, lo que dificulta los siguientes pasos de elaboración (Strissel *et al*, 2002).

Luego del remojo, el líquido de cocción (llamado “nejayote”) se desecha, y se enjuagan los granos cocidos con agua, fracción que se denomina nixtamal. Este lavado se hace con agua a temperatura ambiente, y tiene como fin eliminar el pericarpio desprendido, y eliminar el exceso de Ca(OH)_2 .

La pérdida o remoción del pericarpio es un factor muy importante en la cocción alcalina, debido a su contribución a la pérdida de materia seca (Gómez *et al*, 1989; Plugfelder *et al*, 1988). Durante el lavado, un alto porcentaje de sólidos solubles (vitaminas, proteínas, lípidos y azúcares), y pericarpio son eliminados en el “nejayote”, en un total que va del 2 al 4 % P/P del total del peso del grano. También en el lavado, se pierde un 64 % P/P del pericarpio, pero el pericarpio remanente es necesario en el desarrollo de características normales tanto de la masa como de la tortilla (Pflugfelder *et al*, 1988). La presencia de pericarpio remanente, también afecta el color del producto, textura, y propiedades de procesamiento (Gómez *et al*, 1987).

La temperatura de cocción y la concentración de Ca(OH)_2 , son los factores más críticos en la influencia de la pérdida de sólidos solubles, por encima de los tiempos de cocción y remojo (Sahai *et al*, 2000)

Distintos autores evaluaron el efecto de agregar residuos sólidos del “nejayote” y sólidos del agua de lavado del “nixtamal”, en la producción de tortillas, reportando que la adición del pericarpio cocido mejoró la retención de agua en la cocción, y las propiedades de las tortillas durante el almacenamiento. (Arámbula *et al*, 2002) Luego del enjuague, sigue la molienda del nixtamal. Tradicionalmente, esta etapa se lleva a cabo en un molino de piedras. Este paso logra romper algunos gránulos de almidón cocidos, liberando sus componentes. Estos darán a la masa, propiedades particulares, que harán posible el amasado y cocción posterior de la tortilla, logrando una textura *sui generis*.

La masa se moldea en forma de discos de 12 a 18 cm. de diámetro y entre 2 a 3 mm de espesor, y se cuece, colocándola sobre una superficie caliente (260-320°C) denominada “comal”, durante 27 segundos por un lado, luego del otro lado el mismo tiempo, y luego se voltea nuevamente, hasta que infle, momento en que se retira del comal (Arámbula *et al*, 2001). Las tortillas se hornean de 30 a 60 segundos de cada lado en un parrilla entre 180 y 210 °C.

Las variables del producto y del proceso tales como pérdida de sólidos del maíz, humedad del nixtamal, textura de la masa, y color de la tortilla fueron influenciados no sólo por los parámetros del proceso (temperatura de cocción, tiempo de cocción, y tiempo de reposo), sino también dependieron de las características del maíz (Sahai *et al*, 2001)

1.4.3. Aspectos nutricionales de tortillas

Serna-Saldívar *et al* (1991, 1992), demostraron un aumento de la biodisponibilidad del Ca en tortillas. Usando ratas de laboratorio, se evaluaron las propiedades del hueso y los niveles plasmáticos de Ca, en lotes alimentados con tortillas, y otros que ingirieron granos crudos de maíz. Analizando el fémur de los animales, vieron que los de las ratas alimentadas con tortilla, eran más pesados, más gruesos y largos, con más cenizas, Ca, P, y Mg que las ratas que comieron maíz crudo. El nivel de Ca sérico, fue superior en las alimentadas con tortillas.

El proceso de nixtamalización lleva a la solubilización de minerales, vitaminas, aminoácidos y algunas proteínas, que se pierden en el lavado. Pero hay un aumento de la biodisponibilidad de la lisina, y también del triptofano. Lo mismo ocurre con la niacina, que se encuentra como niacinógeno (inactivo biológicamente). Además, hay destrucción de leucina, lo que mejora la relación leucina/isoleucina, aumentando el aprovechamiento de ambos aminoácidos (Martínez-Flores *et al*, 2002)

El mejoramiento nutricional que produce la nixtamalización es una ventaja de real importancia, particularmente para el Calcio, nutriente que en las dietas habituales de la población argentina se encuentra en déficit, a pesar del alto nivel productivo del sector lácteo.

La masa extrudida con 0.25% de Ca(OH)_2 mejoró el valor nutricional de las tortillas, en términos de proteínas, fibra dietaria, y ganancia de

peso en comparación con tortillas hechas por el método tradicional. (Martínez-Flores *et al*, 2002)

1.4.4. Aplicación de extrusores en la elaboración de harinas para tortillas

Varios estudios reportan el uso de extrusores cocedores para producir masa y harina para tortillas y “snacks” (Martínez-Bustos *et al*, 1995; Martínez-Flores *et al*, 2002 y 1998)

La calidad sensorial y tecnológica de las tortillas preparadas con masa fresca o harina de masa seca por el proceso de extrusión continua, fue similar o mejor en calidad que las tortillas elaboradas con el proceso tradicional. (Martínez-Bustos, 1995)

La elaboración de tortillas en forma tradicional, es un método que tiene limitantes ambientales y tecnológicas, debido al “nejayote”, que es un contaminante (con un pH altamente alcalino), y causa incrustaciones en los caños de desagüe. Además, contiene cantidades importantes de sólidos solubles (entre 5 y 14% según Katz *et al*, 1974; entre 5 y 12% según Pflugfelder *et al*, 1988). En el “nejayote”, se pierden nutrientes tales como compuestos nitrogenados, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales. (Martínez-Flores *et al*, 2002)

Otro problema lo constituyen los grandes volúmenes de agua que se pierden en el proceso, siendo para la industria muy caro su recuperación por medio de plantas de tratamiento. (Martínez-Flores *et al*, 2002).

La elaboración de harina para hacer tortillas, mediante la extrusión, tiene varias ventajas: es un proceso integrado y continuo; el tiempo de proceso se reduce de 12-18 hs a 4 minutos; la incorporación de nutrientes y aditivos, se ve facilitada; la producción de efluentes se elimina; el rendimiento de la tortilla y derivados se incrementa en un 10-15%; las características nutricionales de la tortilla y productos, están mejorados; utiliza 90% menos de agua que el proceso tradicional. (Martínez-Bustos *et al*, 1995)

En este proceso, no hay lavado con agua, y todos los componentes del grano, incluido el pericarpio, son retenidos. El uso de este proceso produjo cambios generales en las propiedades texturales, estructurales, reológicas y fisicoquímicas de la masa de harina extrudida, masa fresca y tortillas, en comparación con las hechas usando el proceso tradicional. (Arámbula *et al*, 2002)

El índice de absorción de agua y el índice de solubilidad en agua fueron afectados por el Ca(OH)_2 y las condiciones de extrusión. La acción combinada del Ca(OH)_2 y las condiciones de extrusión modificaron completamente la estructura organizada del almidón y sugieren la formación de complejos almidón-calcio (Martínez-Bustos *et al*, 1998)

Las características de la harina nativa, tales como tamaño de partícula y almidón dañado en la molienda, y las características de la

extrusión, pueden influenciar la calidad de la masa y tortillas obtenidas por extrusión. La molienda daña los gránulos de almidón, modificando su estructura y convirtiendo las zonas cristalinas en moléculas desordenadas. El almidón dañado se hidrata fácilmente y es degradado por enzimas. El almidón dañado y el calor excesivo en la extrusión originan una masa pegajosa y tortillas con características no deseadas. La calidad de la masa y tortillas extrudidas es muy sensible a las condiciones de extrusión. La naturaleza del material nativo con que se alimenta el extrusor, puede, por lo tanto, afectar las características del extrudido (Martínez-Flores *et al*, 1998)

1.5 El proceso de extrusión

1.5.1 Generalidades

La extrusión es uno de los procesos más comunes e importantes utilizados para el formado de polímeros. Además, este proceso se aplica a los metales blandos, al caucho, a los productos alimenticios de origen vegetal, particularmente cereales, leguminosos y oleaginosos, no solo para darle una forma específica, sino simplemente para cocerlos o condicionarlos para que tengan un mejor valor nutricional (Harper, 1981; Olkku *et al*, 1983)

Históricamente, alrededor de 1870 se registran los primeros extrusores para alimentos (extrusor a pistón para salchichas y carnes procesadas); sin embargo, entre 1935-1940 los extrusores de tornillos

comienzan a ser utilizados por esta industria alimentaria para elaborar fideos, y dar formas a masas de cereales precocidas, (extrusores formadores) y entre 1940-1950 aparecen los extrusores-cocedores que son usados para elaborar botanas y harinas precocidas (González *et al*, 2002).

Un extrusor de alimentos es un biorreactor a alta temperatura y corto tiempo que transforma una variedad de ingredientes crudos a productos intermedios o terminados incluyendo botanas, cereales para desayuno, pastas, proteína texturizada. Este es un proceso único desde que acepta material relativamente seco, añade líquidos para plastificar el material crudo, gelatiniza el almidón, desnaturaliza proteínas e inactiva enzimas, antes de que expanda el producto. Este proceso podría ser usado para eliminar sabores indeseables, para inactivar inhibidores, y para modificar el almidón. La extrusión puede caracterizarse como una técnica eficiente para producir una variedad de productos dependiendo del material crudo seleccionado, las condiciones de extrusión y la configuración mecánica (Frazier *et al*, 1983; El-Dash, 1983)

La extrusión puede definirse como un proceso que involucra el transporte de un material, bajo ciertas condiciones controladas, forzándola a pasar por una boquilla de una dada geometría y con un caudal másico pre-establecido. La palabra extrusión proviene del latín *extrudere* y debe conjugarse como el verbo difundir (González *et al*,

2002).

Este proceso es considerado eficiente, no solo desde el punto de vista de la versatilidad (ya que puede realizar simultáneamente operaciones de mezclado, cocción, texturización y secado parcial), sino también desde el punto de vista de la utilización de la energía, mano de obra y espacio requerido para la instalación (González *et al*, 2002).

El extrusor combina varias operaciones unitarias, mezclado, amasado, cocinado, formado, enfriado y/o cortado. La combinación de estas operaciones es posible gracias a la gran cantidad de variables tales como velocidad de alimentación, humedad, velocidad del tornillo, temperatura del barril, perfil del tornillo y la configuración de la boquilla (González *et al*, 2002; van Zuilichem *et al*, 1983)

1.5.2. Factores que afectan el proceso de extrusión

1.5.2.1 Propiedades de la alimentación

a- Niveles de humedad

Contenidos bajos de agua en el material alimentado resultan en alta viscosidad, lo cual causa un mejor rendimiento, sin embargo, en la extrusión de almidones o materiales amiláceos, la gelatinización ocurre más fácilmente a altos contenidos de humedad. Además, con menos contenido de humedad, se reduce el grado de expansión obteniéndose productos de menor volumen y mayor densidad.

b- Tipo de material alimentado

El tipo y naturaleza del material alimentado, su contenido de proteína, almidón, lípidos y la humedad juegan un papel significativo en la naturaleza del producto extrudido que se obtenga.

c- pH de los ingredientes

Ajustando el pH del material alimentado, el estado de las proteínas podría ser influenciado durante la extrusión y esto repercutir sobre las características físicas del producto final. El incremento del pH en el rango de 5,5 - 7 provoca un aumento de los componentes volátiles durante la extrusión y la modificación del pH podría también causar cambios en color y contenido nutrimental de los productos extrudidos.

d- Tamaño de la partícula del material alimentado

El tamaño de partículas adecuado para la extrusión, se encuentra en relación a la altura del filete correspondiente al canal del tornillo, a medida que la misma aumenta, el tamaño de partícula adecuado puede aumentar. No obstante se puede decir que partículas de sémola con tamaños mayores a 1.680 mm (malla 14), presentarán mayores dificultades para su transformación (cocción) que aquellas con tamaño menor a 0,420 mm (malla 40).

e- Otros ingredientes

Ingredientes como aceites y emulsificantes pueden ser añadidos al material alimentado para disminuir la viscosidad del material y también ayudarán como lubricantes por su efecto durante el proceso de extrusión

provocando una disminución en la cantidad de calor disipado.

1.5.2.2. Parámetros de operación del extrusor.

a) Tipo de extrusor.

Pueden clasificarse como monotornillo y de tornillo doble. Para el caso del monotornillo el cilindro sólo permite la entrada de un tornillo el cual gira sobre su propio eje, mientras que el de tornillo doble cuenta con dos tornillos colocados en forma paralela los cuales giran en sentidos opuestos. El extrusor monotornillo domina la industria alimentaría pero la aplicación de extrusores de doble tornillo esta creciendo por la gran flexibilidad en el control de los parámetros del producto y proceso. Los extrusores monotornillo presentan inestabilidad ya que es un proceso manejado por fricción mientras que los de doble tornillo son más útiles para procesos por pasos (amasado, mezclado, etc.).

b) Geometría del tornillo.

En un extrusor monotornillo, los parámetros que pueden ser ajustados incluyen el filete del tornillo, el diámetro, el margen de altura entre la parte más alta del vuelo del tornillo y el cilindro, y el número de vuelos en el tornillo. Para un extrusor de doble tornillo, las opciones para geometría del tornillo y el rango de configuraciones son numerosas.

c) Largo del extrusor.

El largo del extrusor determina la magnitud de presión generada en

la boquilla y la extensión de reacciones ocurridas dentro de la masa. Los extrusores largos típicamente producen altas presiones.

d) Velocidad del tornillo.

La velocidad del tornillo afecta el grado de llenado dentro del tornillo, la distribución del tiempo de residencia del producto fluyendo a través del extrusor, la transferencia de calor y energía mecánica en el extrusor, y las fuerzas de corte ejercidas sobre el material. La velocidad del tornillo típicamente esta en un rango de 100-500 rpm. Para cereales y botanas donde el contenido de humedad del material esta en un rango de 14-20%, velocidades de tornillo mayores de 250 rpm son normales.

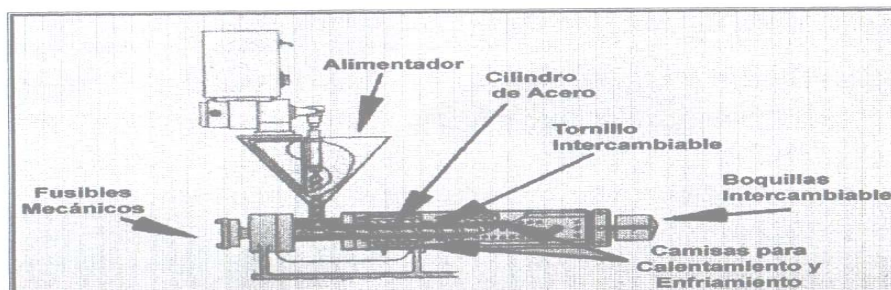


Figura 5: Corte transversal de un extrusor de alimentos monotornillo

e) Características de la boquilla.

El material de la boquilla puede ser de bronce, aleación de bronce, acero inoxidable, etc. El bronce es el más usado ya que fácilmente puede modificarse, también es conveniente usarlo por su conductividad cuando se requiere de calentamiento, pero el desgaste es más rápido.

Cuando se requiere una superficie suave como en el caso de dulces o botanas expandidas, se puede poner una capa de teflón, y para expandidos de cereal se utiliza acero.

f) Temperatura del cilindro.

La mayoría de los extrusores operan con temperatura controlada. La diferencia de presiones y los esfuerzos de corte influyen en el grado de la reacción y en la fricción. El calentamiento del cilindro es generado por conductividad y la temperatura empleada afecta las propiedades físicas (calor específico, temperatura de transición, densidad, contenido de humedad, tamaño de partícula y gelatinización) y reológicas del alimento. Para reducir la temperatura del cilindro puede emplearse una recirculación de agua fría, y para reducir la temperatura en el material puede hacerse incrementando el contenido de agua o aceite o reduciendo el grado de corte, lo cual puede lograrse reduciendo la velocidad del tornillo o la severidad de la configuración

1.5.3. Aplicación de la extrusión en alimentos

Los procesos de extrusión-cocción han sido difundidos como una de las tecnologías apropiadas para elaborar alimentos de interés social. Para tal fin es utilizada en la elaboración de mezclas de cereales y leguminosas precocidas, aptas no sólo para preparar sopas crema, papillas, atoles, etc., sino también botanas enriquecidos, para meriendas escolares y proteína vegetal texturizada (González *et al*, 2002).

La ingeniería involucrada en esta tecnología es avanzada, lo cual se manifiesta en diversos diseños, en la configuración del tornillo, dados, automatización y otras características. Sin embargo, el estudio de los efectos de la extrusión en materiales crudos son limitados (Zhang & Hoseney, 1998).

En el proceso de extrusión, los parámetros importantes para la calidad del producto incluyen el contenido de humedad del material, el tiempo de residencia (el cual es influenciado por el rango de alimentación, la velocidad y la configuración del tornillo), geometría de la boquilla, temperatura y presión. Los atributos sensoriales de los extrudidos dependen en gran medida de las variables relacionadas con el equipo y de las características del material crudo (Chen *et al*, 1991)

El término grado de gelatinización, es más ampliamente reconocido y citado, y se usa para expresar el alcance de algunos cambios en la integridad física de los granos del almidón. Muy a menudo esto es indicado por un incremento en el diámetro del grano del almidón bajo la influencia del calentamiento y humedad. Sin embargo, los gránulos de almidón pueden sufrir el 100% de la pérdida de la birrefringencia y aun así estar al 100% cocidos. El grado de cocción, es un estado mas avanzado, el cual es generalmente asociado con el hinchamiento irreversible y eventualmente con la ruptura completa del gránulo del almidón (Paton & Spratt, 1981). Este grado de cocción está relacionado

no sólo con la susceptibilidad a la hidrólisis por las amilasas, sino también al grado de ruptura o alteración de la integridad del gránulo de almidón. La proporción de sólidos solubles y gránulos (o restos de gránulos hinchados) determinarán las características reológicas de la dispersión. Desde este punto de vista el grado de cocción resulta ser más amplio que el utilizado en nutrición (González *et al*, 2002). Así, actualmente algunos métodos que toman en cuenta estos factores, por ejemplo, las curvas de viscosidad, el índice de hidratación y el índice de solubilidad pueden ser considerados indicadores validos de grados de cocción en productos extrudidos de cereal (Paton & Spratt, 1981).

Para el caso de extrusores monotornillos, las variables de extrusión más importantes para el grado de cocción, son la humedad, temperatura, diámetro de la boquilla y la relación de compresión del tornillo. En general, el grado de cocción aumenta al aumentar la temperatura y la relación de compresión y al disminuir la humedad y el diámetro de la boquilla. El efecto de la velocidad de rotación del tornillo no surge tan claramente, debido a que ésta afecta tanto al tiempo de residencia como al gradiente de velocidad impuesto al fluido. Una mayor velocidad de rotación se traduce en un menor tiempo de residencia, y por tanto un menor grado de cocción, pero simultáneamente es mayor el gradiente de velocidad y por tanto es mayor la intensidad de los esfuerzos de corte producidos. Dicha intensidad dependerá tanto de las

características propias del material (dureza, forma, distribución del tamaño de partícula, etc.), como el nivel de fricción alcanzado, que a su vez depende de la presión y humedad (González *et al*, 2002).

1.5.4. Transformaciones del material durante la extrusión

Durante la extrusión, el material o ingredientes son introducidos al cilindro del extrusor, el cual se encuentra a la temperatura requerida para el proceso. La masa es transportada y comprimida por la rotación del tornillo, y bombeada a través de a boquilla a altas temperaturas y presiones. La combinación de esfuerzos de corte temperatura y presión provoca cambios moleculares en carbohidratos, proteínas y lípidos (Wen *et al*, 1990; Chen *et al*, 1991; Unlu & Faller, 1998).

Los materiales que se someten al proceso de extrusión sufren transformaciones sucesivas durante el proceso (Figura 6). Es importante destacar que la transformación del flujo sólido en flujo viscoso es necesaria para que se produzcan los cambio estructurales y consecuentemente la cocción del almidón. De lo contrario la operación se reduce al transporte del material y al pasaje a través de la boquilla, es decir, el extrusor actúa como una pelleteadora a tornillo.

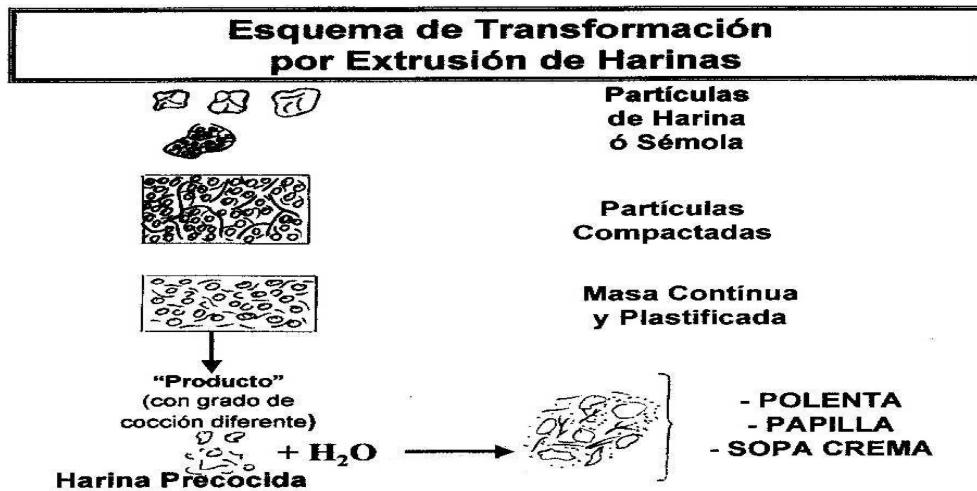


Figura 6: Transformaciones sucesivas durante la extrusión

Las condiciones de temperatura, presión y fuerzas cortantes a que se somete un producto alimenticio durante el proceso de extrusión pueden producir cambios en su composición química, llevando a una modificación de la estructura natural de las macromoléculas: gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas (Mitchell y Areas, 1992).

Durante la extrusión, las altas fuerzas a que se somete un material desintegran en partes los gránulos de almidón, formando fragmentos de más bajo peso molecular, lo cual permite que el agua se transfiera más rápidamente hasta el interior de las moléculas. La pérdida de cristalinidad durante la extrusión es causada principalmente por el desordenamiento mecánico de las cadenas de las moléculas de almidón, debido a la intensidad de las fuerzas de corte en el extrusor. Cuando el proceso de extrusión se realiza a bajos contenidos de

humedad, una mezcla de pequeñas cantidades de almidón gelatinizado, fundido y fragmentado existe simultáneamente (Politz *et al*, 1994; Kokini *et al*, 1992; Lai & Kokini, 1991).

En el proceso de extrusión de alimentos, el almidón es el componente que juega el papel más importante, ya que los cambios que sufre el almidón afectan la expansión y textura final del producto extrudido (Lai & Kokini, 1991). Las modificaciones en la estructura del almidón, tales como fusión, gelatinización, fragmentación y dextrinación, son afectados por diferentes factores como la relación agua/almidón, temperatura, velocidad de calentamiento, morfología, cortes, tamaño de partícula, la relación amilosa/amilopectina, adición de azúcar, sal, proteínas y lípidos, entre otros (Kokini *et al*, 1992; Gómez & Aguilera, 1983, Mason & Hosney, 1986)

Tanto la temperatura como las fuerzas cortantes, son responsables de la gelatinización del almidón cuando es procesado en un extrusor. Cuando la concentración de agua es limitada, la gelatinización completa del almidón no puede ocurrir en el rango de gelatinización habitual. Pero como la temperatura es incrementada, los gránulos de almidón van progresivamente moviéndose y las regiones cristalinas se funden (Kokini *et al*, 1992).

El cambio del contenido de fibra dietética durante la extrusión es de interés nutricional. La extrusión probablemente cambia el contenido,

composición y efectos fisiológicos de la fibra dietética en varias maneras. (Lue *et al*, 1991, Berglund *et al*, 1984).

1.5.5 Métodos de evaluación del material extrudido.

Para evaluar un producto extrudido, contamos con la posibilidad de analizar las siguientes características y propiedades: la solubilidad en agua, la absorción en agua, la respuesta amilográfica (en el amilograma tiene especial importancia la Retrogradación), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Consumo Específico de Energía Mecánica (CEEM), Volumen específico, susceptibilidad enzimática.

De todas estas respuestas, la solubilidad es la que permite interpretar con mayor claridad los cambios producidos, mientras que para utilizar a la respuesta amilográfica, es necesario tener en cuenta toda la curva. No obstante, la consistencia final (retrogradación), puede considerarse un buen indicador del grado de cocción. S, CEEM, y V_e se correlacionan inversamente con R. La susceptibilidad enzimática sólo es útil para condiciones de baja temperatura de extrusión (González *et al*, 2002).

Bedolla & Roodney (1984), concluyeron que el pico de viscosidad en el amilograma es una de las pruebas objetivas que mejor predice la calidad para hacer tortillas de harinas de maíz nixtamalizadas secas.

2. Objetivo General

Obtener harinas precocidas de maíz por extrusión, aptas para elaborar tortillas.

2.1 Objetivos Particulares

Desarrollar una metodología para la elaboración de tortillas de harina de maíz

Desarrollar una metodología para la obtención de harina precocida de maíz por extrusión.

Analizar el efecto de la dureza del endospermo de maíz.

Encontrar las condiciones de extrusión más adecuadas para la evaluación de tortillas

3. Materiales y Métodos

3.1 Ensayos Previos

3.1.a Elaboración de tortilla con proceso tradicional

Tal como se ha descrito en la introducción, el método tradicional para la elaboración de tortillas consiste en la cocción de los granos de maíz en agua de cal y en la molienda posterior para obtener la masa. Este proceso se conoce como nixtamalización, el cual requiere un molino adecuado para lograr una masa con distribución de tamaño de partículas suficientemente homogénea que permita manipularla y obtener una tortilla con buenas propiedades de cohesividad y rolado. Los molinos disponibles en nuestro laboratorio, luego de infructuosos

intentos, no pudieron satisfacer esos requerimientos. Por lo tanto, se decidió utilizar una harina comercial “nixtamalizada”, procedente de México (marca “Maseca”) como muestra estándar para adquirir la experiencia necesaria en la elaboración de tortilla, y luego utilizarla como referencia para comparar sus propiedades fisicoquímicas con las muestras obtenidas en el presente trabajo.

3.1.b Elaboración de tortilla con “Maseca”

En primer lugar, para la elaboración de tortillas con la harina precocida de maíz, se procede a hidratar la misma, hasta lograr una consistencia de la masa adecuada para ser laminada y rolada. Para ello, se hicieron pruebas con distintos grados de hidratación de masa y para cada grado de hidratación se determinó la consistencia de manera empírica utilizando un penetrómetro con geometría de cono, siguiendo el procedimiento ya desarrollado en este instituto (Sánchez *et al*, 2002)

Para hidratar la harina y obtener la masa correspondiente, se pesó 120 gramos (g) de harina a la cual se agregó la cantidad de agua necesaria para cada nivel de hidratación. Luego de un amasado a mano de 5 minutos, se dejó reposar por 20 minutos, dentro de una bolsa de polietileno. Luego se fraccionó la masa, en trozos de 35 g, y con cada uno de ellos se formaron “bollos” manualmente. Cada uno de esos 3 bollos era luego “aplastado”, utilizando el instrumento especialmente adquirido en México, que consiste en 2 platos articulados en bisagra

("tortilladora"), con el cual se obtuvo la masa en forma de disco, de un espesor de 2.6 +/- 0.2 mm. Esta etapa se realizó disponiendo films de polietileno en ambas superficies de la "tortilladora", para evitar que la masa se adhiera a la superficie metálica, y luego de formarse el disco, éste pueda despegarse fácilmente. El disco de masa así formado, se dejó reposar, cubierto por un género limpio, durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo, se procedió a la cocción del disco, utilizando una plancha de acero de 3 mm de espesor calefaccionada eléctricamente, aplicando un potencial de 100 volts, controlado mediante un "varivolt" y cuya temperatura se mide con una termocupla ubicada en el centro de la plancha. Cuando la temperatura de la plancha alcanzó los 360 °C, el disco se colocó sobre la plancha y se lo dejó durante 30 segundos, luego se lo dio vuelta con la ayuda de una espátula dejándolo 35 segundos más, y finalmente se volvió a darlo vuelta, hasta lograr el "inflado". Esta etapa es decisiva para que la muestra sea aceptable, considerándose óptimo, cuando el inflado es uniforme y comprende toda la superficie. Una vez obtenida la tortilla, se la dejó reposar durante 5 minutos, y se procedió al rolado, utilizando una barra cilíndrica de madera de 2.0 cm. de diámetro. En esta operación se analiza el comportamiento de la masa, evaluando las fisuras y grietas, tal como es destacado en la descripción del método tradicional. (Arámbula *et al* 2001)

Se debe destacar que en todos los casos se observó que al colocar el disco en la plancha, la temperatura de la misma, descendía hasta un nivel comprendido entre 260 y 280 °C, y al final de la operación, la plancha alcanzaba temperaturas entre 300 y 310 °C.

3.1.c Evaluación de la aptitud de la masa para elaborar tortillas

La evaluación de la aptitud de una harina para elaborar tortillas, se realiza mediante un sistema de puntaje que involucra a 2 de los atributos más importantes: el inflado y el rolado (Arámbula *et al* 2001). Para el inflado, se utilizó una escala de 1 a 4, correspondiendo el valor 1 a un inflado menor al 25% de la superficie de la tortilla, mientras que el puntaje 4 corresponde a un área del 75 al 100 %. Por su parte, para el rolado se utilizó una escala de 1 a 5, correspondiendo el valor 1 a la aparición de grietas en una longitud del 75 al 100% de la tortilla, mientras que un valor de puntaje 4 corresponde a la aparición de grietas en una longitud inferior al 25%, y el valor 5 a la ausencia de grietas.

Para obtener el puntaje total de cada muestra, se procedió de la siguiente manera: con cada masa preparada, se obtuvieron 3 tortillas, y la sumatoria del puntaje de las 3 tortillas incluyendo los 2 atributos, se tomó como puntaje total de cada muestra. Es decir, que el rango de puntaje total (inflado más rolado de 3 tortillas por muestra de masa preparada), va de 6 a 27. El puntaje promedio para cada muestra de

harina, se obtiene calculando el valor medio del puntaje total obtenido para 3 preparaciones de masa.

En la Tabla 1 se observan los datos de hidratación, consistencia, y puntaje otorgado a 4 muestras de masa preparadas con "Maseca".

Tabla 1: Efecto del nivel de hidratación de harina "Maseca" (H %) sobre el valor de penetración y aptitud de la masa para elaborar tortillas

NIVEL HIDRATAC.(H%)	PENETRAC.	PUNTAJE TOTAL= ROLADO+INFLADO
62	18.6	19
60	14.5	23
58	12.6	27
56	9.9	25

Surge por lo tanto que para la harina "Maseca", el grado de hidratación más adecuado, correspondió a un contenido de humedad de la masa de 58 %.

3.2 Secuencia para la obtención de las muestras extrudidas aptas para elaborar tortilla.

3.2.a Secuencia general.

Para la preparación de las muestras extrudidas, y su posterior evaluación de aptitud para la preparación de tortillas, se siguieron las siguientes etapas:

**Selección y caracterización de las variedades de maíz

**Definición de las condiciones de molienda para la harina de extrusión

**Evaluación de la composición química de las harinas

**Selección de los niveles de las variables de extrusión, adopción del diseño experimental y obtención de las muestras extrudidas.

3.2.b Selección y caracterización de las muestras de maíz a utilizar.

Se seleccionaron dos muestras comerciales de maíz: colorado semidentado (Dekalb 764) y dentado (Pioner 30R76). La caracterización de los 2 tipos de maíz se realizó mediante la evaluación de la dureza del endospermo. Para tal fin, se determinaron 2 parámetros: el Peso Hectolítrico y la relación grueso/fino (G/F), en los laboratorios del INTA Pergamino. (Eyhérbide *et al*, 1996; De Dios *et al*, 1992 y 1990)

El Peso hectolítrico (PHEC): se determinó con un equipo Tripette Renaud modelo T 400 previamente calibrado con balanza de 1 litro tipo Schlopper y sobre muestras estabilizadas a su humedad de equilibrio atmosférico.

Relación grueso-fino (RMOL): se molieron muestras de 50 g durante 15 segundos en molino Stein y se tamizaron posteriormente con equipo Rotachoc (Chopin) durante 1 minuto sobre tamices N° 18 (1 mm) y N° 35 (0.50 mm). Todo el material que quedó sobre el primero se pesó y se consideró "Fracción Gruesa" (G). El material que atravesó el tamiz N° 35 y quedó en el ciego, se pesó y consideró "Fracción Fina" (F). La relación de molienda se calculó como G/F.

3.2.c Definición de las condiciones de molienda para la harina de extrusión.

Para la obtención de la harina de maíz para la extrusión se realizaron ensayos previos con el objeto de definir las condiciones de molienda que permitan un descascarado sin degerminar y con mínima producción de finos. En todos los casos, se fijó la humedad del grano en un valor comprendido entre 13.5 % y 14.5%.

Se utilizaron diferentes molinos y diagramas de molienda para adoptar el más adecuado, es decir, aquel que permite obtener una molienda integral del grano (que incluye endospermo, pericarpio y germen) con granulometría homogénea y una mínima producción de fracciones finas. Los molinos utilizados fueron los siguientes: molino de cuchillas de laboratorio, molino de muelas cónicas estriadas marca Buhler (Alemania), molino de rolos VarioMiag marca Buhler. Luego de evaluar los resultados de estos ensayos, se seleccionó como el más apto, al molino de muelas estriadas. Esta elección se justificó teniendo en cuenta que, si bien con el molino de rolos VarioMiag se podía realizar una adecuada molienda para ambos tipos de maíz, la proporción de finos obtenida con el maíz dentado, era mayor que la correspondiente al molino de muelas.

La Tabla 2 muestra los resultados de la distribución de tamaño de partículas para la molienda de un maíz comercial semiduro, con una humedad del 14,1%.

TIPO DE MOLINO	CUCHILLAS	ROLOS	MUELAS
%Retenido en 20	32,1	42,4	50,8
%Retenido en 40	29,9	26,3	22,3
%Retenido en 70	23,4	19,1	20
%Retenido en 100	8,6	7,2	4,9
%Pasante por 100	6,0	5,0	2,0

Tabla 2: Distribución de tamaño de partículas obtenida con cada molino para una muestra de maíz comercial semiduro.

3.2.d Determinación de la composición centesimal de la harina obtenida para extrudir.

La composición centesimal se determinó de acuerdo con los métodos de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 1984): el contenido de humedad se determinó por secado en estufa a 105 °C por 24 hrs, el de proteínas (nitrógeno x 6.25), mediante el método de Kjeldhal, el de materia grasa, la cual es expresada como extracto etéreo se obtuvo por extracción con éter de petróleo fracción 60°C-80°C y el contenido de cenizas utilizando una mufla a 550 °C.

La Tabla 3 muestra los resultados de los análisis de composición de las muestras

Tabla 3: resultados de los análisis de composición de los maíces Pioneer 30R76 y Dekalb 764.

Composición Centesimal (Base Seca)	Pioneer 30R76	Dekalb 764
Humedad	12.8	13.3
Proteínas (N x 6,25)	7.05	8.50
Materia Grasa	4.20	3.90
Cenizas	1.30	1.38

Observando los resultados de Composición, puede apreciarse la diferencia en el nivel de proteínas, al comparar ambas muestras.

3.2.e Selección de los niveles de las variables de extrusión, adopción del diseño experimental y obtención de las muestras extrudidas.

En primer lugar, para la operación de extrusión, se utilizó un extrusor Brabender 10 DN, con control de temperatura en el cañón y en la boquilla y registro del momento torsor (torque) ejercido sobre el eje del motor. La presión en la zona anterior a la boquilla es medida por medio de un transductor de presión marca Dynisco (USA). De acuerdo con experiencias previas realizadas por el grupo de trabajo, se seleccionó un tornillo de relación de compresión 3:1 y una boquilla cilíndrica de 3 mm de diámetro y 20 mm de longitud. Estas condiciones fueron mantenidas para todos los ensayos.

Se realizaron experiencias de extrusión para determinar los niveles de las variables a utilizar (humedad de la harina y temperatura de extrusión) en el diseño experimental, siguiendo una metodología de superficie y respuesta y teniendo en cuenta que son los 2 factores más relevantes en la extrusión de sémola de maíz. (González *et al*, 1987)

La concentración de Ca(OH)_2 se fijó en 0.15% respecto de la harina. El agregado de Ca(OH)_2 se realizó dispersándolo en la cantidad de agua necesaria a ser agregada en cada nivel de humectación. Este nivel de Ca(OH)_2 se fijó teniendo en cuenta lo sugerido por varios autores (Zazueta *et al*, 2002; Fernández-Muñoz *et al*, 2002; González *et al*, 2002; Rodríguez *et al*, 1996)

Para cada muestra se obtuvieron los valores de caudal másico (g/min.) y “torque” en unidades Brabender (UB). El caudal másico fue referido a la humedad de alimentación y se calculó el consumo específico de energía mecánica (CEEM) en J/g, utilizando la siguiente fórmula: $\text{CEEM (J/g)} = 0.0616 \times \text{Torque (UB)} \times \text{rpm} / \text{caudal másico (g/min.)}$.

3.3 Evaluación de las muestras extrudidas

3.3.a Adopción del diagrama de molienda de las muestras extrudidas y obtención de la harina para tortillas.

Las muestras extrudidas fueron secadas en estufa a 50 °C con circulación de aire hasta que alcancen un nivel de humedad entre 9 y

11%, el cual se considera apto para obtener las harinas correspondientes. Se utilizó el molino de muelas ya mencionado para adoptar el diagrama de molienda que permita obtener la harina con una granulometría similar a la harina comercial "Maseca".

3.3.b Evaluación de las características fisicoquímicas.

Para la evaluación de las características fisicoquímicas, se molieron las muestras de la harina para tortillas, en un molino Ciclotec (UD Corporation; Colorado USA) con malla de 1 mm y asegurando que toda la muestra pase por una malla de 420 micrones. Con la muestra molida de esta manera se evaluaron las siguientes propiedades: almidón dañado, absorción de agua, solubilidad en agua, respuesta amilográfica.

Almidón Dañado: se utilizó la técnica de la AACC número 76-30 A. Este método determina el porcentaje de gránulos de almidón que son sensibles a la hidrólisis por alfa-amilasa fúngica 5000 SKB unidades por gramo. Se pesa 1,00 g de la muestra adecuadamente molida, se pone en contacto con 45 ml de una solución de la enzima (1 g en 450 ml de buffer acetato, preparada disolviendo 4,1 g de acetato de sodio anhidro en 3 ml de ácido acético glacial, llevando a 1 litro con agua destilada) y se incuba a 30°C durante 15 minutos, produciéndose la hidrólisis del almidón. La reacción se detiene por el agregado de 3 ml de solución de ácido sulfúrico (preparada agregando 100 ml de ácido sulfúrico concentrado a 700 ml de agua destilada, completando 1 litro de solución

con agua destilada) y 2 ml de solución de tungstato de sodio (para ello se pesan y disuelven 12 g de tungstato de sodio, llevando a un volumen total de 100 ml con agua destilada). Una vez agregados estos 2 reactivos para detener la reacción enzimática, se deja reposar y se filtra por papel de filtro Whatman N° 4. Se toman 5 ml del filtrado, y se determinan azúcares reductores por el método AACC 80-60.

Absorción de agua: se utilizó la técnica originalmente propuesta por Torgensen y Toledo (1977) y utilizada normalmente en el laboratorio del ITA (González *et al*, 1995). Este método consiste en medir la captación libre de agua producida por la muestra, en función del tiempo. Para lo cual se colocan sobre un papel de filtro, 50 mg de la muestra (previamente molida), uniformemente distribuida. El papel con la muestra se apoya cuidadosamente sobre un vidrio poroso, el cual se encuentra sobre un receptáculo inundado de agua destilada. El nivel de agua del sistema receptáculo-vidrio poroso está conectado a una pipeta (a través de un tubo desde el fondo del receptáculo) que en posición horizontal permite ir midiendo el agua absorbida.

Solubilidad en agua: se utilizó la técnica propuesta por Anderson y modificada por González *et al* (1987), la cual consiste en dispersar 2,5 g de muestra en 50 ml de agua destilada en un tubo de ensayo, con agitación intermitente durante 30 minutos, y centrifugación a 2000 x g. En la fase sobrenadante se determina los sólidos dispersos, evaporando

en estufa a 105°C. La solubilidad se expresa como el porcentaje de los sólidos dispersados respecto a 100 g de harina sobre base seca.

Respuesta Amilográfica: se utilizó el Amilógrafo de Brabender (Duisburg-Alemania) con el cabezal de 250 gcm, de acuerdo al procedimiento utilizado en el laboratorio del ITA (González *et al*, 1987). La dispersión se realizó al 8,6 % de sólidos en base seca. Antes de iniciar el calentamiento, se mantuvo la suspensión en agitación a máxima velocidad durante 5 minutos, para asegurar hidratación completa de las partículas; luego la temperatura se elevó desde 30 °C hasta 95°C, manteniéndose esta temperatura por 15 minutos, y se enfrió hasta 50 °C. Tanto el calentamiento como el enfriamiento se realizaron a razón de 1,5 °C por minuto. El valor de la consistencia en cada punto, se expresa en Unidades Brabender (UB). Del amilograma se obtuvieron los siguientes puntos característicos de la curva: consistencia inicial a 95 °C (C_i), y consistencia de retrogradación (C_r) a 50 °C (para evitar excesivo torque en el resorte del equipo).

Todas las determinaciones de las propiedades fisicoquímicas se realizaron por triplicado, y se informan los promedios correspondientes.

Observación microscópica: las muestras molidas fueron observadas microscópicamente utilizando un microscopio Leitz (Alemania) con luz polarizada para determinar la presencia de gránulos de almidón con la estructura nativa (gránulos con la “cruz de malta”).

3.3.c Evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.

Para evaluar la aptitud de las muestras extrudidas para elaborar tortillas, se utilizó el procedimiento ya descrito para “Maseca” (punto 3-1-c). Se determinó previamente la cantidad de agua a agregar, realizando ensayos a distinto grado de hidratación, y seleccionando aquél que permita obtener una masa cohesiva no pegajosa. A cada muestra se midió la penetración de acuerdo al consistómetro ya descrito. Se prepararon 3 bollos de masa de 120 g cada una. Cada bollo fue separado en 3 partes iguales, para obtener tortillas de alrededor de 35 g cada una. Es decir, se obtuvieron 9 tortillas por cada muestra. La evaluación de la aptitud (puntaje) de la muestra para tortilla, se siguió el procedimiento ya descrito para “Maseca” (punto 3-1-c).

3.4 Análisis estadístico de los resultados

Se utilizó el software estadístico Statgraphics plus 3.0 para la realización del análisis de variancia y para obtener las superficies de respuesta.

4. Resultados y Discusión

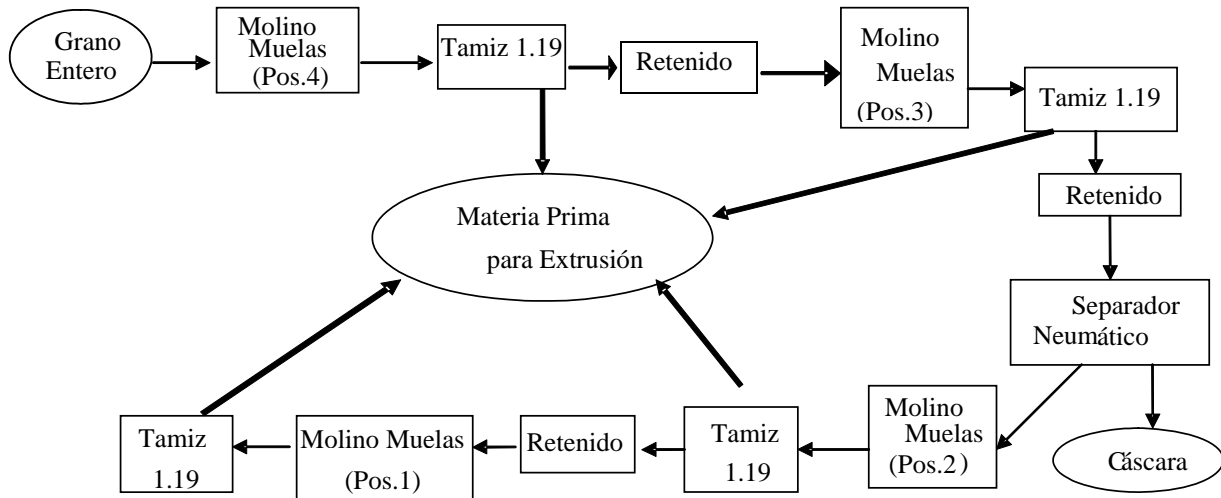
4.1 Dureza del endospermo del maíz: la Tabla 4 muestra los resultados relativos a la evaluación de la dureza de endospermo de los 2 híbridos utilizados.

De acuerdo a la escala propuesta por Robutti (1995) y Eyhérabide *et al*, (1996), correspondería una dureza NIR del orden de 500 y 350 respectivamente. Estos valores permiten confirmar que las 2 muestras corresponden a la clasificación de dentado amarillo para Pioneer 30R76 y semiduro colorado para Dekalb 764.

Tabla 4: Evaluación de la dureza del endospermo: Relación Grueso/Fino (G/F) y Peso Hectolítrico (PH).

VARIEDAD	G/F	PH
<i>Dekalb 764</i>	4.6-4.3	78
<i>Pioneer 30R76</i>	2.6-2.8	76.2

4.2 Diagrama de Molienda de los granos: el Esquema 1 muestra el diagrama de molienda adoptado (para el molino de muelas cónicas estriadas marca Buhler seleccionado en los ensayos previos) y en la Tabla 4, la distribución del tamaño de partículas de las harinas obtenidas con los 2 maíces seleccionados. Cada uno de los valores, es el valor medio de 2 determinaciones. Las diferencias entre duplicados fueron consideradas aceptables, ya que para las fracciones finas las diferencias se encontraron en el orden del 10%, y para las gruesas del orden del 2%.



Esquema 1: Diagrama de molienda adoptado (para el molino de muelas cónicas estriadas marca Buhler), para obtener la materia prima para la extrusión.

Tabla 5: distribución del tamaño de partícula de las harinas obtenidas con el diagrama de molienda, correspondientes a las 2 muestras de maíz.

Muestra de maíz	Dekalb764	Pioner30R76
%Retenido en 20	47,2	46,4
%Retenido en 40	25,5	24,2
%Retenido en 70	17,3	21,6
%Retenido en 100	8,4	5,1
%Pasante por 100	1,5	1,8

La adopción de la malla de 1,19 mm como límite máximo para granulometría, está relacionada al hecho que para la extrusión, el rango de tamaño de partícula, está comprendido entre 1,19 mm y 0,210 mm.

La descripción del diagrama de molienda es la siguiente: el grano entero es molido en posición 4. Es tamizado a través de una malla de

1,19 mm, y la fracción retenida es molida en posición 3. Nuevamente, la fracción retenida sobre malla de 1,19 mm, es pasada por el separador neumático para eliminar la cáscara. Esa fracción descascarada, es molida en posición 2, y la fracción retenida sobre malla de 1,19 mm es remolida en la posición 1. De esta manera, todo el grano molido, presenta granulometría menor a 1,19 mm.

Como se puede observar en la tabla 4, el diagrama desarrollado nos permite moler los granos sin excesiva producción de finos (partículas menores a 210 micrones), lo cual es un requerimiento a satisfacer, para evitar problemas de transporte en la extrusión. La utilización de otro tipo de molino (molino de rolos, molino de impacto, etc.) hubiera producido una harina con mayor proporción de fracciones finas, y por lo tanto mayor probabilidad de dificultades en la extrusión.

Además, estas fracciones finas no se deben eliminar, ya que se pretende mantener la composición del grano, salvo la eliminación de la cáscara, tal como ocurre con el proceso tradicional para elaborar tortillas.

Por otra parte, el diagrama adoptado para el molino de muelas, permite obtener para ambos híbridos, una distribución de tamaño de partículas similares, lo cual elimina la incidencia de otro factor no controlado, sobre las condiciones de extrusión.

4.3 Resultados de ensayos previos para definir las condiciones de extrusión y adopción del diseño experimental

Teniendo en cuenta que la harina "Maseca" presenta una importante proporción de gránulos con la "cruz de malta" (observación microscópica), las condiciones de extrusión a seleccionar para la obtención de las muestras definitivas, debían ser tales de evitar un excesivo grado de cocción. Estas características están relacionadas a lo ya observado por otros autores (Arámbula et al, 2001)

De los ensayos previos realizados con el extrusor Brabender ya mencionado, tornillo relación 3:1, boquilla 3mm, y con la sémola de maíz Dekalb, se pudo concluir lo siguiente:

4.3.a Factor Temperatura: para la configuración de tornillo y boquillas seleccionados, temperaturas inferiores a 110 °C no podían ser mantenidas, para humedades inferiores a 27 %, indicando que la disipación de energía mecánica para ese nivel de humedad y para la configuración de tornillo y la de la boquilla seleccionadas, es demasiado alta para mantener el sistema a 110 °C. Por otro lado, para temperaturas mayores a 150 °C y 27 % de humedad, el grado de cocción fue considerado excesivo.

4.3.b Factor Humedad: con respecto al nivel de humedad, se observó que a humedades mayores de 35 % la alimentación al extrusor se dificultaba debido a la formación de "puentes" y por lo tanto la caída

del material a la boca del extrusor desde la tolva de alimentación a la sección de alimentación del tornillo, deja de ser continua.

Por lo tanto, los niveles extremos seleccionados para las variables independientes de extrusión fueron los siguientes: 27-35 para la humedad (%), y 114-150 para la temperatura (°C).

4.3.c Adopción de diseño experimental: se seleccionó un diseño factorial 3^2 con un triplicado del punto central, resultando el siguiente conjunto de experiencias para cada una de los maíces utilizados. En la Tabla 6, pueden observarse los niveles de humedad y temperatura correspondientes al mencionado diseño.

Tabla 6: Niveles de Humedad y Temperatura correspondiente al Diseño Experimental seleccionado.

Temperatura °C	Humedad %		
	27	31	35
114	X	X	X
132	X	X X	X
150	X	X	X

4.4 Evaluación de las muestras extrudidas

4.4.a Adopción del diagrama de molienda de las muestras extrudidas y obtención de la harina para tortillas.

La distribución del tamaño de partícula de las muestras extrudidas molidas indicó que en general la misma no difiere apreciablemente,

sugiriendo que las características mecánicas de los extrudidos serían semejantes. No obstante cuando se comparan las mismas con la distribución del tamaño de partícula correspondiente a la muestra "Maseca" se observan diferencias significativas. A manera de ejemplo, en la Figura 1 se presentan las distribuciones de tamaño de partículas de la muestra "Maseca" y de las correspondientes a los puntos centrales de los 2 variedades.

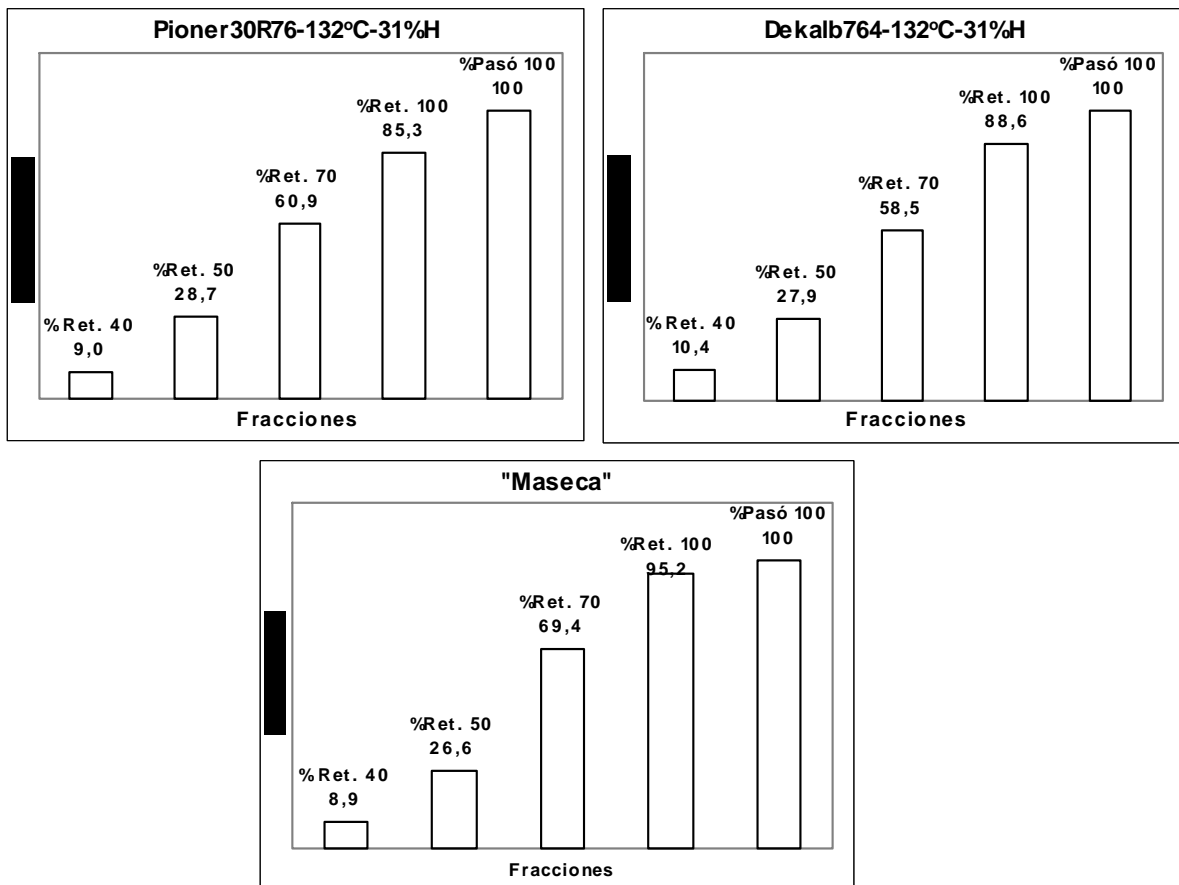


Figura 7: Distribución del tamaño de partícula de la muestra “Maseca” y de las correspondientes a los puntos centrales de los 2 variedades (Dekalb 764 y Pioner 30R76).

Como consecuencia de los resultados de distribución de tamaño de partícula, se decidió reconstituir las harinas de las muestras extrudidas simulando la distribución correspondiente a “Maseca”. Esto se debe hacer así para evitar la posible influencia de este factor (tamaño de partículas) sobre las propiedades fisicoquímicas, lo cual afectaría al análisis del efecto de la temperatura de extrusión y de la humedad de la sémola sobre tales propiedades.

4.4.b Respuestas relacionadas con la operación de extrusión

En la Tabla 6 se presentan los valores de caudal, torque y CEEM para las muestras correspondientes a los 2 maíces obtenidas de acuerdo al diseño experimental. Se puede observar que los valores de CEEM para la muestra Dekalb 764 son mayores que las correspondientes a la muestra Pioner 30R76, lo cual sugiere una relación directa entre la dureza del endospermo del maíz y el grado de fricción generado en el extrusor. Estos resultados están en aparente contradicción con los obtenidos por Robutti *et al* (2002). Estos autores encontraron una correlación inversa entre la dureza del endospermo y el CEEM, cuando se realiza la extrusión con sémolas de maíz (obtenidas a partir de granos con diferente dureza de endospermo) a un nivel de

humedad del 15%, el cual es significativamente más bajo que el correspondiente al rango utilizado en nuestro diseño. A bajo nivel de humedad el CEEM es significativamente más alto (entre 300 y 650 J/g) y además la operación se lleva a cabo prácticamente de manera autógena, es decir, el aporte de energía térmica es despreciable respecto al CEEM. Todo lo contrario ocurre en nuestro caso, ya que, en el rango de humedad seleccionado el aporte de energía térmica es significativo. Esta diferencia operativa podría ser la causa para la aparente contradicción ya mencionada entre el CEEM y la dureza del endospermo. Además, se observa también en la Tabla 7 que el CEEM está en relación inversa tanto con la temperatura como con la humedad. Esto está directamente relacionado con el efecto que tienen estas variables sobre el nivel de fricción dentro del extrusor.

Tabla 7: Valores de Caudal, Torque y CEEM para las muestras correspondientes a los 2 maíces

Experiencia	Pioner 30R76			Dekalb 764		
	Qa	Torque	CEEM	Qa	Torque	CEEM
	g/min	(UB)	J/g	g/min	(UB)	J/g
114°-27%	96,5	380	36	78,5	330	39
114°-31%	91,5	250	25	79,9	240	28
114°-35%	104,4	140	12	100,9	170	13
132°-27%	96	310	29	83,3	310	34
132°-31%	100,9	250	23	90,4	260	27
132°-31%	103,3	210	19	89,2	230	24
132°-31%	101,2	220	20	88,2	235	25
132°-35%	97,4	110	10	92,1	160	16
150°-27%	95,1	270	26	80	260	30
150°-31%	69,9	190	18	87,7	190	20
150°-35%	89,3	90	9	99,8	120	11

En las Tablas 8 y 9 se muestran los resultados del ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondientes al CEEM, para Pioner 30R76 y Dekalb 764 respectivamente. En las Figuras 8 y 9 se muestran las superficies de respuesta correspondientes.

Para los 2 maíces sólo los efectos lineales de temperatura y humedad son significativos ($p < 0.05$) y las superficies correspondientes se asemejan a una forma planar. Además, ambas superficies confirman la relación inversa del CEEM con la humedad y temperatura ya mencionada. Siendo la falta de ajuste no significativa para ambos casos podemos concluir que los modelos obtenidos para el CEEM y para ambos maíces, son adecuados.

Tabla 8: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondientes al CEEM, para Pioner 30R76.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	66,667	1	66,667	15,38	0,0593
H	600,0	1	600,0	138,46	0,0071
TT	2,807	1	2,807	0,65	0,5054
TH	12,25	1	12,25	2,83	0,2347
HH	2,274	1	2,274	0,52	0,5441
Falta de Ajuste	0,943	3	0,314	0,07	0,9693

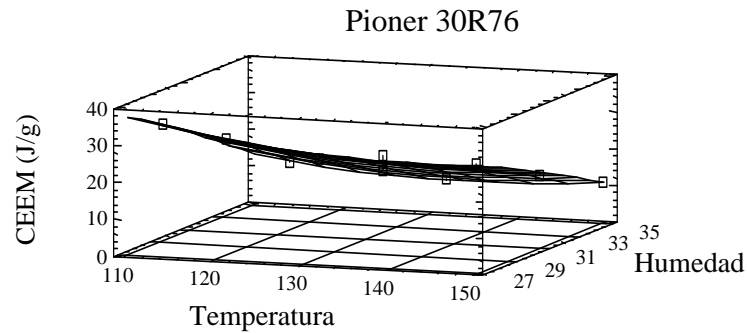


Figura 8: Superficie Respuesta correspondiente al CEEM para Pioner 30R76

Tabla 9: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondientes al CEEM, para Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	60,167	1	60,167	25,79	0,0367
H	661,5	1	661,5	283,50	0,0035
TT	6,107	1	6,107	2,62	0,2471
TH	12,25	1	12,25	5,25	0,1490
HH	0,774	1	0,774	0,33	0,6229
Falta de Ajuste	8,943	3	2,981	1,28	0,4673

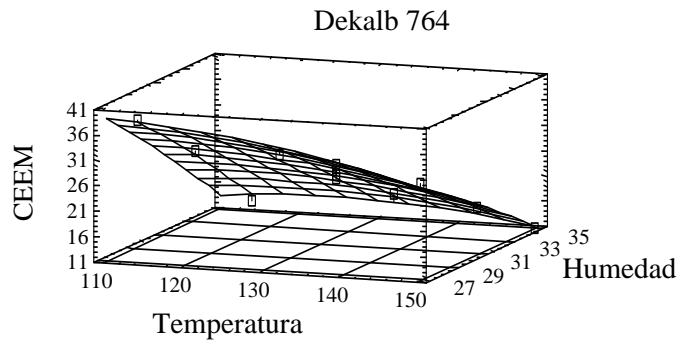


Figura 9: Superficie Respuesta correspondiente al CEEM para Dekalb 764

4.4.c Respuestas relacionadas con las características fisicoquímicas.

4.4.c.1 Valores obtenidos

En las Tablas 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos para las propiedades fisicoquímicas correspondientes a las dos muestras de sémolas de maíz extrudidas (previamente molidas en molino Cyclotec). Estas son: Almidón Dañado (AD), Absorción de Agua (AA), Solubilidad (Solub), Retrogradación (Retro), Consistencia a 95°C (C95), y Observación Microscópica. Se incluyen además, los resultados correspondientes a "Maseca".

Tabla 10: Valores promedios de las propiedades fisicoquímicas, obtenidos para la muestra "Maseca" y para las muestras extrudidas (del maíz Pioneer 30R76) correspondientes al diseño experimental.

Pioner30R76	AD	AA	Solub	Retro	C 95	Obs.Micr.
114-27	40	4,5	6,5	950	300	XXX
114-31	21	3,1	5,1	1235	360	X
114-35	16,4	1,9	4	1480	400	X
132-27	46,9	5,5	7,8	1100	310	XXX
132-31	41,6	5	7,3	1050	310	XXX
132-31	39,1	4,7	7	1080	360	XXX
132-31	43,4	5,2	7,6	1020	300	XXX
132-35	12,9	2,2	4,3	1590	440	X
150-27	55	8	10,5	700	300	XXX
150-31	48	7	9,3	750	370	XX
150-35	27,5	4	5,5	1350	420	XX
MASECA	29,6	3,9	6,7	1380	400	XX

Tabla 11: Valores promedios de las propiedades fisicoquímicas, obtenidos para la muestra “Maseca” y para las muestras extrudidas (del maíz Dekalb 764) correspondientes al diseño experimental.

Dekalb764	AD	AA	Solub	Retro	C 95	Obs.Micr.
114-27	17	2,7	7,2	1070	260	X
114-31	13	2,4	6,1	1080	250	X
114-35	9	2	5,2	1000	225	X
132-27	22	3	8,8	1005	250	XX
132-31	20	2,9	8	1170	265	X
132-31	19	2,8	7,6	1200	260	X
132-31	18	2,7	7,2	1070	250	X
132-35	10	2,2	5	1175	255	X
150-27	35	3,5	12	785	190	XXX
150-31	25	3,2	10	1040	180	XX
150-35	15	2,5	6	855	230	X
MASECA	29,6	3,9	6,7	1380	400	XX

4.4.c.2 Almidón Dañado

Se puede observar que para ambos maíces, existe una relación inversa entre esta propiedad y la humedad, y una relación directa con la temperatura. Estas relaciones están directamente relacionadas con el efecto que producen las 2 variables (humedad y temperatura), sobre el grado de cocción de la masa que está siendo extrudida. Es decir, el

aumento de humedad produce una disminución en el grado de fricción, mientras que un aumento de temperatura produce un incremento en el mismo. Estas tendencias ya han sido observadas en otros trabajos para extrusión de sémola de maíz. (Mercier & Feillet, 1975; González *et al*, 1987)

Además, se observa también que los valores de almidón dañado correspondiente a la muestra Pioner 30R76, son mayores que los de la muestra Dekalb 764. Esto indica que para las mismas condiciones, la muestra con endospermo más blando presenta un mayor grado de cocción.

La Tabla 12 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a almidón dañado, para la muestra Pioner 30R76.

Tabla 12: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a almidón dañado, para la muestra Pioner 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	469,93	1	469,93	100,77	0,0098
H	1207,0	1	1207,0	258,83	0,0038
TT	1,288	1	1,288	0,28	0,6516
TH	3,8025	1	3,8025	0,82	0,4618
HH	71,515	1	71,515	15,34	0,0595
Falta de Ajuste	175,00	3	58,33	12,51	0,0749

Estos resultados muestran que para la muestra 30R76 sólo los términos lineales (T y H) son significativos ($p < 0.5$), aunque el grado de significación del término HH no es despreciable ($p < 0.0595$). Este grado de significación no despreciable del término cuadrático, justifica la curvatura que se observa en la superficie obtenida (Figura 10)

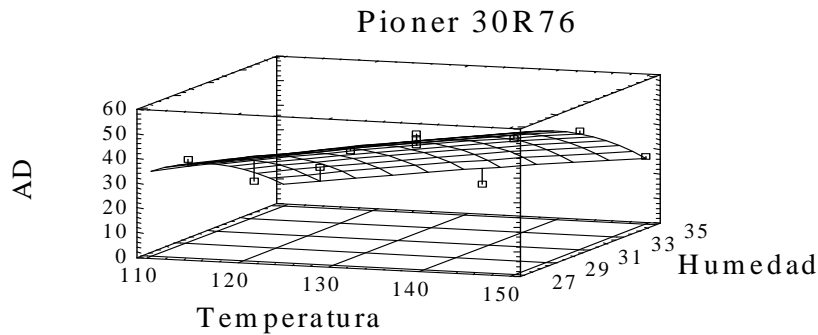


Figura 10: Superficie de Respuesta $AD = f(H, T)$ correspondiente a Pioner 30R76

El modelo obtenido puede ser considerado adecuado, ya que la falta de ajuste no es significativa, el cual permite observar la tendencia esperable (Figura 4) para el efecto de las 2 variables, ya mencionada anteriormente (AD crece con el aumento de T y disminuye con el aumento de H).

Tabla 13: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a almidón dañado, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	216,0	1	216,0	216,0	0,0046
H	266,67	1	266,67	266,67	0,0037
TT	6,316	1	6,316	6,316	0,1285
TH	36,0	1	36,0	36,0	0,0267
HH	5,116	1	5,116	5,116	0,1521
Falta de Ajuste	7,017	3	2,339	2,34	0,3135

En el caso de la muestra Dekalb 764, el grado de significación de los términos del modelo, muestra que sólo los términos lineales y el término de interacción TH son significativos ($p < 0.05$). Si bien la forma de la superficie obtenida (Figura 11), es menos clara que la obtenida para Pioner 30R76, la tendencia ya observada se mantiene.

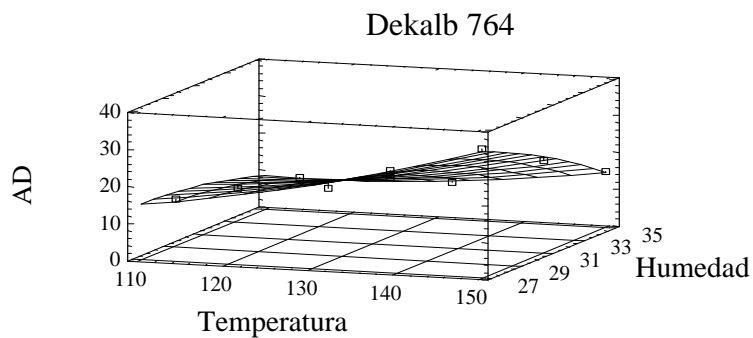


Figura 11: Superficie de Respuesta $AD = f(H,T)$ correspondiente a Dekalb764.

Si se tiene en cuenta el valor obtenido de AD para Maseca, se observa que el mismo está en un nivel intermedio tanto para Pioner 30R76 como para Dekalb 764

4.4.c.3 Solubilidad en Agua

Volviendo a las Tablas 10 y 11, podemos observar las mismas tendencias que las ya mencionadas para almidón dañado, referidos al efecto de T y H. Es decir, la solubilidad aumenta tanto con el aumento de T como con la disminución de H.

Sin embargo, contrariamente a lo que ocurría con AD, los valores de solubilidad para Pioner 30R76, son inferiores que para Dekalb 764 para las mismas condiciones. Esta aparente discrepancia se puede explicar de la siguiente manera: en los niveles de H y T seleccionados para este conjunto de experiencias, el grado de cocción de la fracción amilácea estaría controlado fundamentalmente por las 2 variables H y T a través de un proceso hidrotérmico, más que al termomecánico (que es el que predomina a bajos niveles de H tal como 15%, que es el que corresponde a las condiciones de alto grado de cocción para productos expandidos). Sin embargo, la influencia de la dureza de endospermo en el grado de fricción, se traduce en un aumento de la solubilidad, lo cual es compatible con el mayor valor de CEEM obtenido para la muestra de endospermo más duro (Dekalb 764), ya discutido oportunamente.

La Tabla 14 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a solubilidad, para la muestra Pioner 30R76

Tabla 14: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a solubilidad, para la muestra Pioner 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	15,682	1	15,682	174,24	0,0057
H	20,167	1	20,167	224,07	0,0044
TT	0,1651	1	0,1651	1,83	0,3084
TH	1,562	1	1,562	17,36	0,0531
HH	2,0281	1	2,0281	22,53	0,0416
Falta de Ajuste	1,0094	3	0,336	3,74	0,218

El grado de significación de cada uno de los términos del modelo para la solubilidad, guarda una estrecha relación con los correspondientes a almidón dañado, aunque se debe agregar también un efecto no despreciable del término de interacción TH. Estos efectos son claramente puestos en evidencia, en la forma de la superficie obtenida (Figura 12), la cual ratifica los comentarios ya realizados acerca del efecto de T y H sobre el grado de cocción. Se debe recordar que tanto el AD como la S son indicadores directos de grado de cocción.

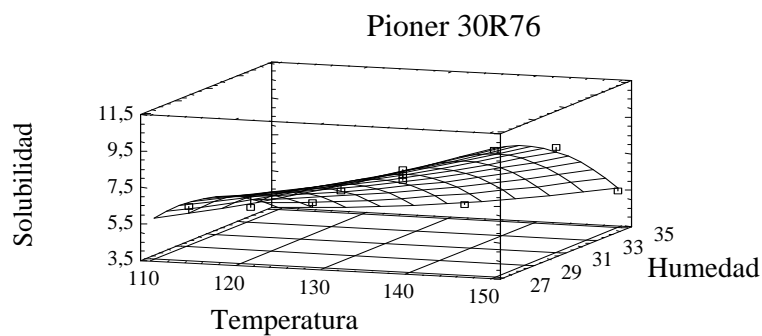


Figura 12: Superficie de Respuesta $S = f(H,T)$ correspondiente a Pioner 30R76

La Tabla 15 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a solubilidad, para la muestra Dekalb 764

Tabla 15: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a solubilidad, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	15,0467	1	15,0467	94,01	0,0105
H	23,2067	1	23,2067	145,04	0,0068
TT	0,85686	1	0,85686	5,36	0,1467
TH	4,0	1	4,0	25,00	0,0377
HH	0,8185	1	0,8185	5,2	0,1521
Falta de Ajuste	0,4561	3	0,1520	0,95	0,5495

En el caso de la muestra Dekalb 764, se observa las mismas tendencias ya discutidas para AD. El grado de significación de los términos del modelo, muestra que sólo los términos lineales y el término de interacción TH son significativos ($p < 0.05$). A los efectos de no redundar en comentarios, no se presenta la Superficie de Respuesta correspondiente.

Similarmente a lo observado para AD, el valor obtenido para "Maseca", está en un nivel intermedio tanto para Pioner 30R76 como para Dekalb 764.

4.4.c.4 Absorción de Agua (AA)

Para esta propiedad podemos observar las mismas tendencias que las ya mencionadas para almidón dañado, es decir, la AA aumenta tanto con el aumento de T como con la disminución de H.

La Tabla 16 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a AA, para la muestra Pioner 30R76. Estos resultados pueden observarse en la Figura 13.

Tabla 16: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a AA, para la muestra Pioner 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	15.0417	1	15.0417	237.50	0.0042
H	16.335	1	16.335	257.92	0.0039
TT	0.4776	1	0.4776	7.54	0.1110
TH	0.49	1	0.49	7.74	0.1086
HH	1.4856	1	1.4856	23.46	0.0401
Falta de Ajuste	0.6840	3	0.2280	3.60	0.2250

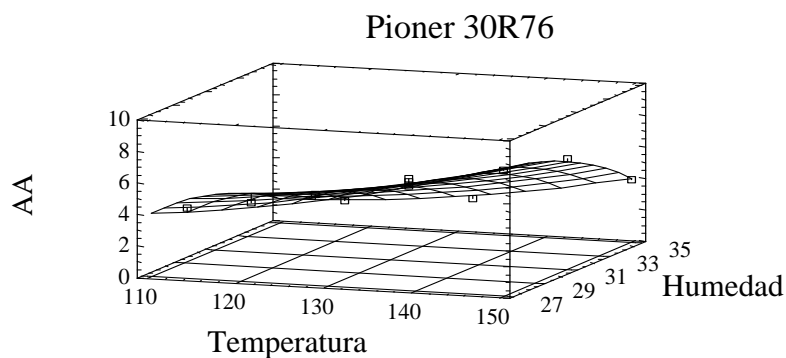


Figura 13: Superficie de Respuesta AA = f (H,T) correspondiente a Pioner 30R76

La Tabla 17 y la Figura 14 muestran los resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a AA, para la muestra Dekalb 764.

Tabla 17: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a AA, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	0.735	1	0.735	73.50	0.0133
H	1.04167	1	1.04167	1.04167	0.0095
TT	0.0039	1	0.0039	0.0039	0.5940
TH	0.0225	1	0.0225	0.0225	0.2724
HH	0.06528	1	0.06528	0.06528	0.1251
Falta de Ajuste	0.01189	3	0.00396	0.00396	0.7724

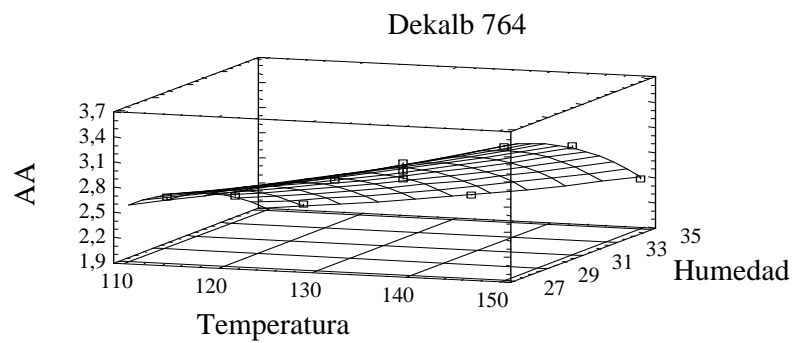


Figura 14: Superficie de Respuesta AA = f (H,T) correspondiente a Dekalb764

Similarmente a lo que ocurre con AD, sólo los términos H, T y HH son significativos, para las muestras correspondientes a Pioneer 30R76, mientras que para el caso de las muestras Dekalb 764 sólo los términos lineales de H y T son significativos. Nuevamente la forma de las curvas (Figuras 13 y 14) y confirman las tendencias ya mencionadas, aunque en ambos casos (Pioneer 30R76 y Dekalb 764) y a baja temperatura, se observa la existencia de un valor máximo para niveles de humedad intermedios.

Si se tiene en cuenta el valor obtenido de AA para "Maseca", se observa que el mismo está en un nivel intermedio para Pioneer 30R76 mientras que todos los valores correspondientes a Dekalb 764 son inferiores al de "Maseca".

4.4.c.5 Consistencia a 95°C (C95)

La Tabla 18 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden correspondiente a C95, para la muestra Pioneer 30R76. Sólo el término lineal de H es significativo. La Figura 15 muestra claramente que esta propiedad sólo depende de H, aumentando con el aumento de la misma.

Tabla 18: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a C95, para la muestra Pioneer 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	150.00	1	150.00	0.15	0.7399
H	20416.70	1	20416.70	19.76	0.0471
TT	214.912	1	214.912	0.21	0.6931
TH	100.00	1	100.00	0.10	0.7852
HH	934.912	1	934.912	0.90	0.4419
Falta de Ajuste	2535.09	3	845.029	0.82	0.5911

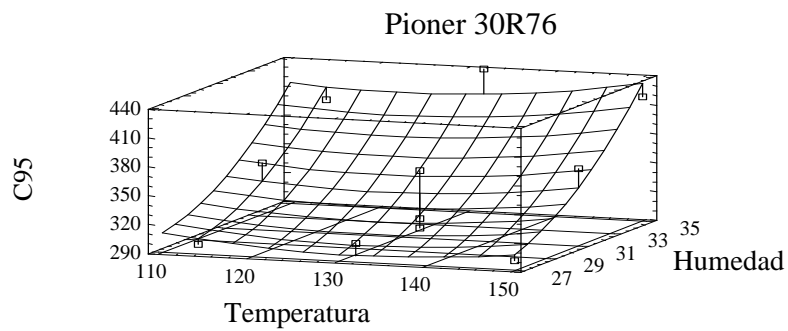


Figura 15: Superficie de Respuesta $C95 = f(H,T)$ correspondiente a Pioner 30R76

La Tabla 19 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a C95, para la muestra Dekalb 764.

Tabla 19: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a C95, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	3037.50	1	3037.50	52.07	0.0187
H	16.6667	1	16.6667	0.29	0.6464
TT	2987.76	1	2987.76	51.22	0.0190
TH	1406.25	1	1406.25	24.11	0.0391
HH	25.2632	1	25.2632	0.43	0.5781
Falta de Ajuste	655.154	3	218.385	3.74	0.2179

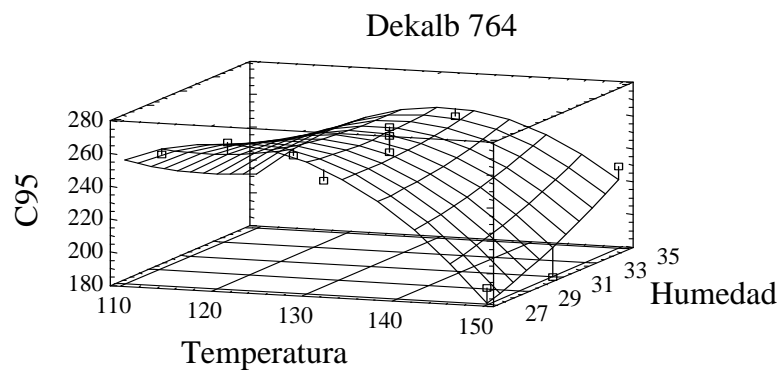


Figura 16: Superficie de Respuesta $C95 = f(H,T)$ correspondiente a Dekalb764

A diferencia de lo que se venía observando con las otras propiedades, referido a la semejanza del efecto de las variables (H y T), para la C95 los efectos de las mismas difieren según sea el maíz utilizado, ya que para Dekalb764 tanto los términos T, TT y TH son los significativos. Esto indicaría que para C95 y con maíces con endospermos más duros (en el rango de valores de las variables

utilizadas), la T aparece con mayor grado de incidencia que la H. Observándose la existencia de un máximo para niveles de T intermedia (Figura 16), desplazándose el mismo hacia valores mayores de T, a medida que aumenta la H.

Si se tiene en cuenta el valor obtenido de C95 para "Maseca", se observa algo similar a lo ocurrido para AA, es decir, que el mismo está en un nivel intermedio para Pioneer 30R76 mientras que todos los valores correspondientes a Dekalb 764 son inferiores al de "Maseca".

4.4.c.6 Retrogradación a 50°C

Las Tablas 20 y 21 muestran los resultados del ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden correspondiente a Retrogradación a 50°C, para la muestra Pioneer 30R76 y Dekalb 764 respectivamente

Para esta propiedad, y para Pioneer 30R76 todos los términos del polinomio, excepto TH, son significativos. Mientras que para Dekalb 764, ninguno de los términos son significativos, aunque el grado de significación correspondiente al término TT presenta un valor de $p < 0.1$. Esto indica que el modelo obtenido no es aplicable para Dekalb 764, sugiriendo la existencia de efectos correspondientes a otros factores no identificados. La Figura 17 muestra la influencia de H y T sobre esta propiedad. Se observa el mayor grado de influencia de H con respecto a T.

Tabla 20: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Retrogradación a 50°C, para la muestra Pioner 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	124704.0	1	124704.0	138.56	0.0071
H	464817.0	1	464817.0	516.46	0.0019
TT	53747.8	1	53747.8	59.72	0.0163
TH	3600.0	1	3600.0	4.00	0.1835
HH	108385.0	1	108385.0	120.43	0.0082
Falta de Ajuste	50061.4	3	16687.1	18.54	0.0516

Tabla 21: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Retrogradación a 50°C, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	36816.7	1	36816.7	7.95	0.1062
H	4816.67	1	4816.67	1.04	0.4152
TT	40589.6	1	40589.6	8.76	0.0977
TH	4900.0	1	4900.0	1.06	0.4119
HH	23629.6	1	23629.6	5.10	0.1525
Falta de Ajuste	23473.7	3	7824.56	1.69	0.3929

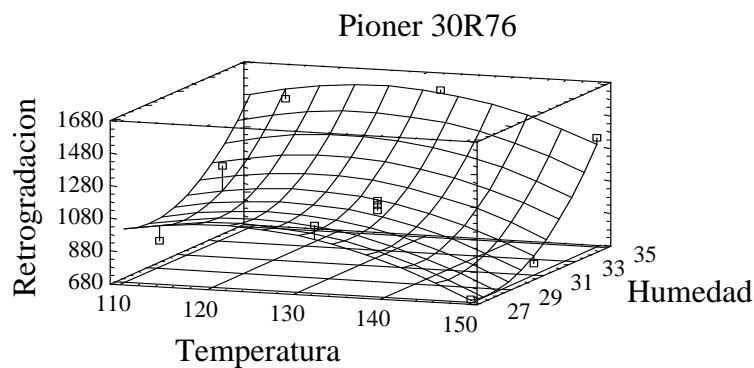


Figura 17: superficie de Respuesta Retro=f (H,T) correspondiente a Pioner 30R76

Comparando el valor obtenido para Retro correspondiente a Maseca se observa algo similar a lo ocurrido para AA y C95 es decir que el mismo está en un nivel intermedio para Pioner 30R76 mientras que todos los valores correspondientes a Dekalb 764 son inferiores al de Maseca.

4.4.c.7 Observación Microscópica

De la observación microscópica correspondiente a cada una de las muestras, surgió que prácticamente ninguna de las muestras mostró ausencia total de gránulos de almidón con la cruz de malta.

Debido a que con la observación directa la cuantificación de la proporción de partículas conteniendo gránulos de almidón con la cruz de malta, presenta una alta variabilidad para cada muestra, se agruparon las muestras de acuerdo a la proporción de gránulos con cruz de malta observada, en cuatro rangos de valores:

X muestra con más del 75% de gránulos con Cruz de Malta

XX muestra conteniendo entre 75 y 50% de gránulos con Cruz de Malta

XXX muestra conteniendo entre 50 y 25% de gránulos con Cruz de Malta

XXXX muestra conteniendo menos del 25% de gránulos con Cruz de Malta

En las Tablas 10 y 11 se observa que la muestra Dekalb 764 presenta mayor proporción de gránulos con la cruz de malta que las correspondientes a las de Pioner 30R76. Estos resultados de evaluación microscópica se corresponden con los valores de AD, S y AA, los cuales indicaban que el grado de cocción alcanzado por la muestra Pioner 30R76 es mayor que el correspondiente a la muestra Dekalb 764. Por otra parte, sólo para 150°C y 27% de humedad, Dekalb 764 muestra una mayor proporción de gránulos sin la cruz que Maseca.

4.4.d Relación entre las respuestas vinculadas a las propiedades fisicoquímicas.

A los efectos de analizar las relaciones entre cada una de las respuestas, las figuras 18 (a b c y d) y 19 (a b c y d) muestran las relaciones entre las respuestas tomando AD como referencia (ya que AD es el indicador de grado de cocción con mayor rango de variación entre las muestras), para Pioner 30R76 y Dekalb 764 respectivamente.

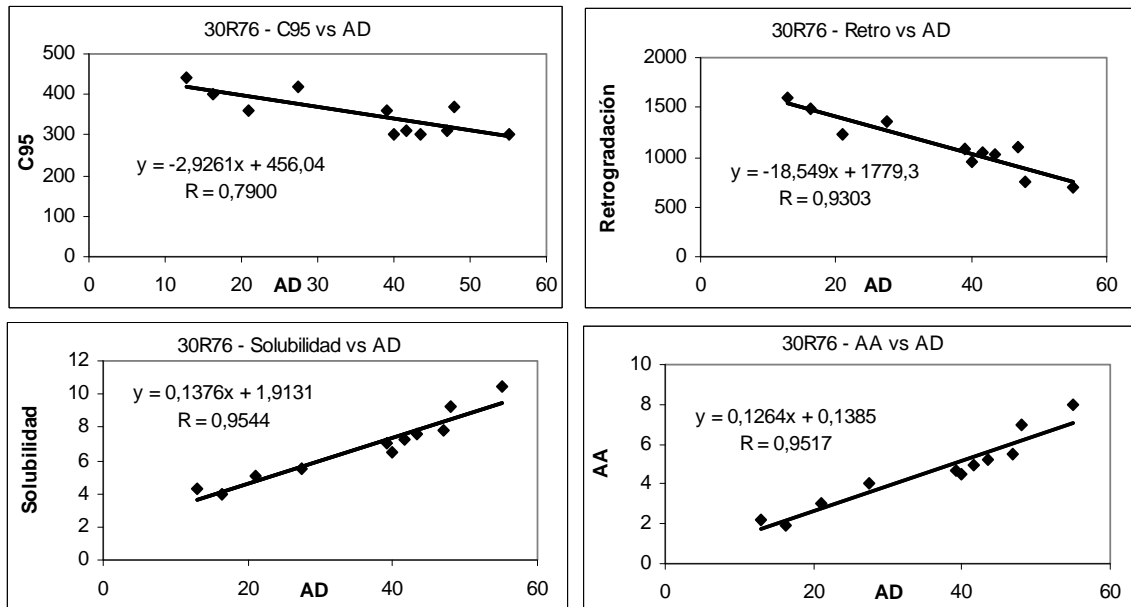


Figura 18: relaciones entre respuestas: C95 vs. AD, Retro vs. AD, Solubilidad vs. AD, AA vs. AD, para Pioneer 30R76

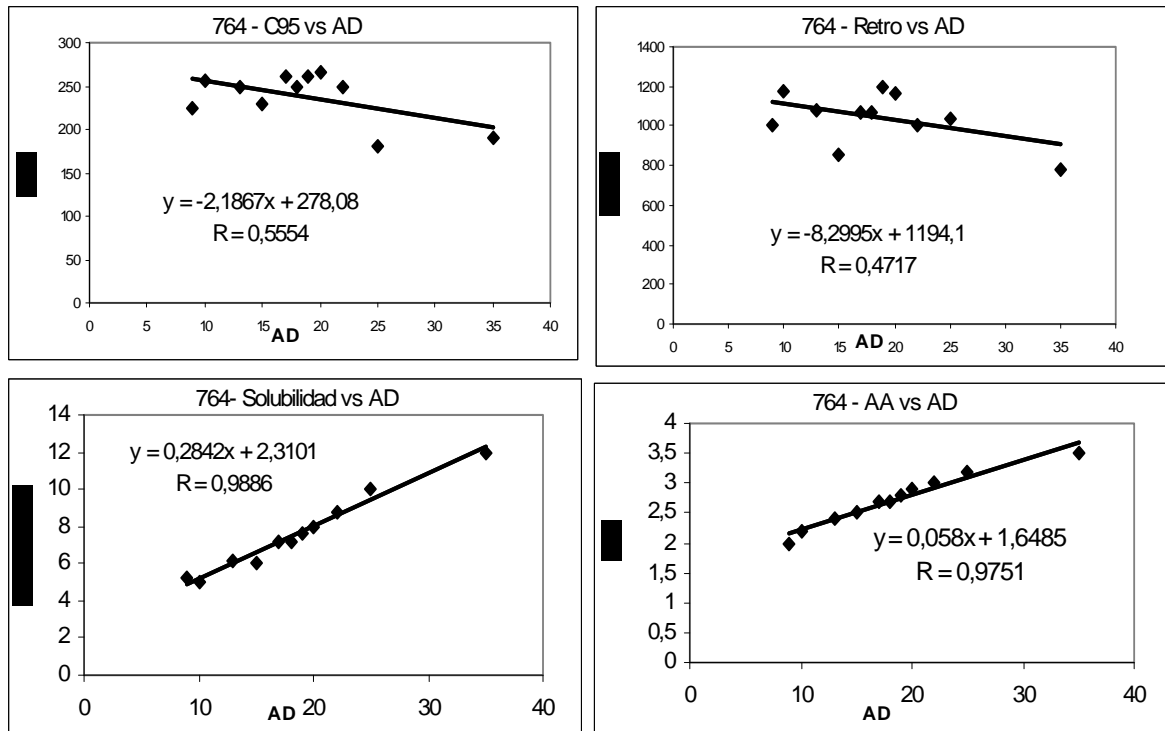


Figura 19: relaciones entre respuestas: C95 vs. AD (a), Retro vs. AD (b), Solubilidad vs. AD (c), AA vs. AD (d), para Dekalb 764.

Se puede observar claramente que para ambos tipos de maíz, tanto la AA como la Solubilidad están directamente relacionados con el AD, mientras que la Retrogradación y C 95°C presentan una tendencia inversa. Se destaca además que para las muestras de Pioneer 30R76 los valores de R son altos excepto para la correlación entre AD y C95, mientras que para las muestras Dekalb 764 la alta correlación con AD, sólo se observa para AA y Solubilidad.

4.4.e Conclusión acerca del efecto de las variables (H y T) sobre cada una de las respuestas.

Los resultados de la evaluación de las propiedades físico químicas de las muestras extrudidas, indican que, teniendo en cuenta los valores de AD y AA, el maíz con endospermo más duro (Dekalb 764), presenta menor grado de cocción que el Pioner 30R76. No obstante, los valores de Solubilidad la cual también es un indicador del grado de cocción, indicaría lo contrario. Esta aparente discrepancia entre los 3 indicadores del grado de cocción (AD, AA y S), se explica considerando el efecto de la dureza del endospermo, lo cual provocaría un mayor grado de fricción entre partículas conduciendo a un mayor porcentaje de sólidos dispersables (que provendrían de la superficie de las partículas), sin que esto se refleje en un mayor grado de cocción del conjunto de las partículas.

Las discrepancias observadas para los valores de C95 y Retrogradación a 50°C, con respecto a otros resultados obtenidos con harina de maíz, indican que estas propiedades muestran deficiencias para ser utilizados como indicadores de grado de cocción para las condiciones de extrusión utilizadas para obtener el conjunto de muestras de este trabajo.

Por otra parte, resulta interesante agregar que se ha verificado (González *et al*, 2005) que, cuando la cocción se realiza en exceso de

agua las partículas de sémola de maíz con endospermo más duro requieren mayor tiempo de cocción que las de endospermo más blando, mientras que, por el contrario, en el proceso de cocción por extrusión a bajo nivel de humedad (15%), son las partículas de sémola de maíz más duro las que alcanzan el mayor grado de cocción. Esta diferencia de comportamiento del maíz según la dureza de su endodermo, explicaría el porqué los indicadores del grado de cocción pueden presentar discrepancias entre ellos cuando varía la importancia relativa entre los efectos hidrotérmicos y los termomecánicos.

4.4.f Evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.

En las tablas 22 y 23 se presentan los resultados obtenidos respecto a la evaluación de la aptitud para elaborar tortillas correspondientes a las muestras extrudidas de los dos maíces (con granulometría similar a la Maseca). Se incluyen además, los resultados correspondientes a Maseca

Tabla 22

Pioner30R76	Penet.	Hum.Masa	Puntaje
114-27	9,3	57,5	25,7
114-31	9,5	55,5	23,3
114-35	9,5	54	10,3
132-27	9,3	58,6	24,3
132-31	9,3	58,3	24,3
132-31	9,5	57,8	25,3
132-31	8,8	58,8	26,7
132-35	11	54,5	10
150-27	15	60,2	17,7
150-31	12	59	19,3
150-35	10,5	58,3	21,3
MASECA	9,5	58	27

Tabla 23

Dekalb764	Penet.	Hum.Masa	Puntaje
114-27	10	54,5	21,3
114-31	13	52,5	20,3
114-35	15	52	7,3
132-27	11	55,5	20,7
132-31	10	57	20
132-31	11	55,5	19,3
132-31	10	54,5	19,3
132-35	12	53,2	18,3
150-27	12	58,5	19
150-31	11	57,5	22,3
150-35	11	54	19,3
MASECA	9,5	58	27

4.4.f.1 Penetración

La Tabla 24 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Penetración y la figura 20 la superficie de respuesta correspondiente, para la muestra Pioneer 30R76

Tabla 24: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Penetración, para la muestra Pioneer 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	14.1067	1	14.1067	108.51	0.0091
H	1.12667	1	1.12667	8.67	0.0986
TT	3.77712	1	3.77712	29.05	0.0327
TH	5.5225	1	5.5225	42.48	0.0227
HH	0.977123	1	1.80946	7.52	0.1113
Falta de Ajuste	5.42838	3		13.92	0.0678

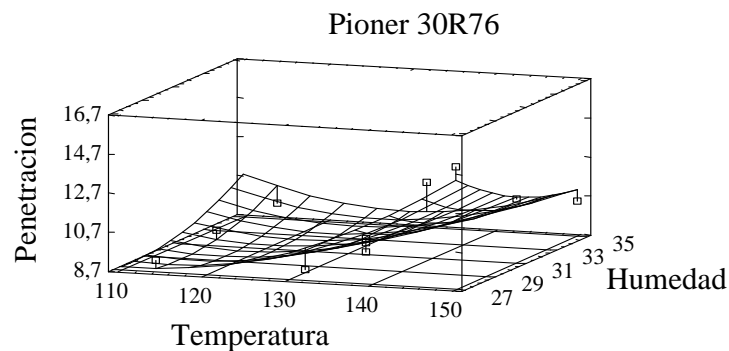


Figura 20: superficie de respuesta Penetración $f=(T,H)$ para la muestra Pioner 30R76

Se observa que sólo los términos T , T^2 y TH son significativos ($p < 0.5$) y si bien la falta de ajuste es levemente no significativa, se puede considerar que el modelo ajusta adecuadamente. La superficie muestra que el mayor valor de Penetración corresponde para las condiciones de mayor Temperatura y menor Humedad (150°C – 27% H) y que el menor valor se da para las condiciones de menor Temperatura y menor Humedad (114°C – 27% H) coincidiendo con lo obtenido experimentalmente. Además, la forma de la superficie (alabiada) muestra que a alta T la Penetración disminuye con el aumento de H , mientras que a baja T , la tendencia se invierte.

La Tabla 25 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Penetración y la figura 21 la superficie de respuesta correspondiente, para la muestra Dekalb 764.

Tabla 25: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Penetración, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	2.66667	1	2.66667	8.00	0.1056
H	4.16667	1	4.16667	12.50	0.0715
TT	2.80702	1	2.80702	8.42	0.1011
TH	9.0	1	9.0	27.00	0.0351
HH	0.77368	1	0.77368	2.32	0.2671
Falta de Ajuste	1.52632	3	0.508772	1.53	0.4193

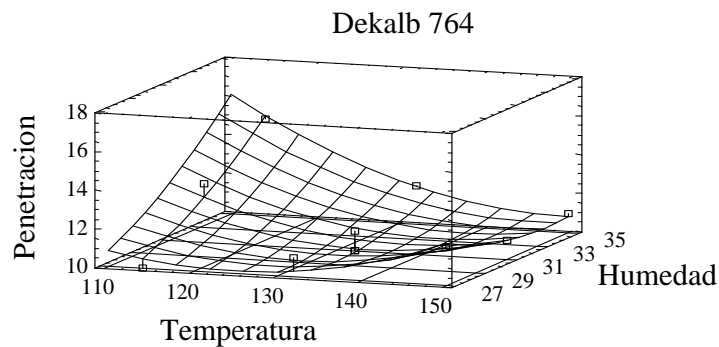


Figura 21: superficie de respuesta Penetración $f = (T, H)$ para la muestra Dekalb 764

Se puede observar que sólo el término TH resulta ser significativo, aunque la significación del término H no es despreciable. También se observa que la falta de ajuste no es significativa, por lo tanto el modelo puede ser considerado adecuado. La superficie muestra que el mayor valor de Penetración se alcanza para la menor T y la mayor H, lo cual

indica una tendencia inversa a lo observado con la muestra Pioneer 30R76, aunque se mantienen las tendencias ya observadas: a baja T, la penetración aumenta con el aumento de H y a alta T, disminuye con el aumento de H (aunque en este caso, la variación es pequeña).

Comparando los valores de Penetración correspondientes a las 2 muestras de maíz con el de "Maseca", se observa que éste último es intermedio respecto a los valores de Pioneer mientras que siempre es menor respecto a los valores de Dekalb. Esto indica que todas las muestras correspondientes a Dekalb 764 resultaron ser más blandas que las muestras de Maseca.

4.4.f.2 Humedad de masa

La Tabla 26 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Humedad de Masa y la figura 22 la superficie de respuesta correspondiente, para la muestra Pioneer 30R76

Tabla 26: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Humedad de Masa, para la muestra Pioneer 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	18.375	1	18.375	73.50	0.0133
H	15.0417	1	15.0417	60.17	0.0162
TT	0.0000175	1	0.0000175	0.00	0.9941
TH	0.64	1	0.64	2.56	0.2507
HH	1.23202	1	1.23202	4.93	0.1566
Falta de Ajuste	3.17965	3	1.05988	4.24	0.1967

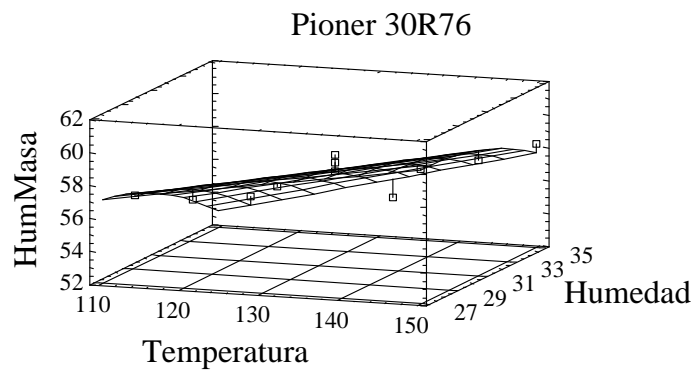


Figura 22: superficie de respuesta HumMasa $f = (T, H)$ para la muestra Pioner 30R76

Se puede observar que sólo los términos lineales (T, H) son significativos y que, siendo la falta de ajuste no significativa el modelo se considera adecuado. La superficie de respuesta (aproximadamente planar) muestra que el mayor valor de Humedad de Masa se obtiene a alta T , y el menor valor se obtiene para la menor Temperatura y la mayor Humedad.

La Tabla 27 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Humedad de Masa y la figura 23 la superficie de respuesta correspondiente, para la muestra Dekalb 764.

Tabla 27: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Humedad de Masa, para la muestra Dekalb 764.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	20.1667	1	20.1667	12.74	0.0703
H	14.415	1	14.415	9.10	0.0945
TT	0.02807	1	0.02807	0.02	0.9063
TH	1.0	1	1.0	0.63	0.5101
HH	1.44507	1	1.44507	0.91	0.4402
Falta de Ajuste	2.53193	3	0.843977	0.53	0.7038

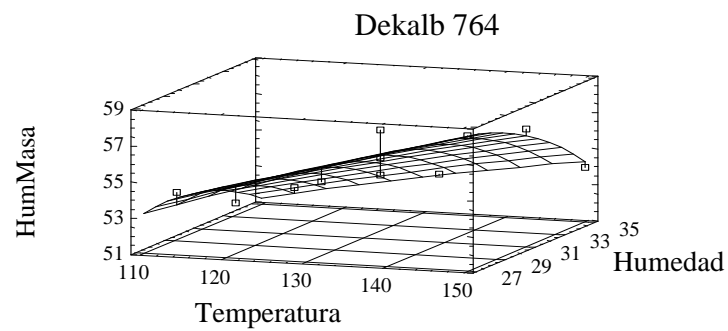


Figura 23: superficie de respuesta HumMasa $f=(T,H)$, para la muestra Dekalb 764

Se observa que si bien ninguno de los términos es significativo, el grado de significación correspondiente a T no sería despreciable. La superficie de respuesta muestra similares tendencias a las observadas para Pioneer 30R76.

Comparando los valores de Humedad de Masa de las 2 muestras de maíz con el de "Maseca", se observa que éste último es intermedio respecto a los valores de Pioneer 30R76 mientras que siempre es mayor respecto a los valores de Dekalb (excepto para 150°C – 27% H, que presenta un valor aproximadamente igual al de "Maseca"). Tal como se

mencionó anteriormente, las muestras correspondientes a Dekalb 764, eran más blandas que la de "Maseca", aún cuando poseen una menor Humedad de Masa, esto está directamente vinculado a la menor AA que presentan la muestra de Dekalb 764 con respecto a "Maseca".

4.4.f.3 Puntaje

En primer lugar, conviene recordar el significado del puntaje, el cual incluye los 2 atributos evaluados: inflado y rolado, dando un rango para los valores de puntaje entre 6 y 27. Si para considerar una tortilla aceptable, adoptamos como criterio valores mínimos para inflado y rolado iguales a 3 y a 4 respectivamente (ver punto 3-1-c), resulta que puntajes mayores a 21 ($3 \times 3 + 4 \times 3 = 21$), corresponderían a tortillas aceptables.

Analizando los valores (Tablas 21 y 22) correspondientes a ambas muestras de maíz, se observa que con la mayoría de los casos correspondientes a Dekalb 764 no se obtuvieron tortillas con puntaje aceptable, excepto para 150°C-35 %H y 114°C-27%H, aunque aún para estos dos casos los valores no son altos (menor a 23). Con la muestra Pioneer 30R76 la situación es muy diferente, ya que en la mayoría de los casos se obtuvieron puntajes aceptables y para algunos de ellos (132°C-31%H y 114°C-27%H), con valores cercanos a los de "Maseca". Sólo para 4 de las 11 condiciones experimentales la muestra Pioneer 30R76

dio puntaje menores a 21 (114°C-35%H; 132°C-35%H; 150°C-27%H, y 150°C-321%H).

La Tabla 28 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Puntaje y la figura 24 la superficie de respuesta, correspondiente a la muestra Pioner 30R76.

Tabla 28: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Puntaje, para la muestra Pioner 30R76

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	0.166667	1	0.166667	0.11	0.7671
H	113.535	1	113.535	78.12	0.0126
TT	3.15396	1	3.15396	2.17	0.2786
TH	90.25	1	90.25	62.10	0.0157
HH	70.2456	1	70.2456	48.33	0.0201
Falta de Ajuste	54.364	3	18.1213	12.47	0.0752

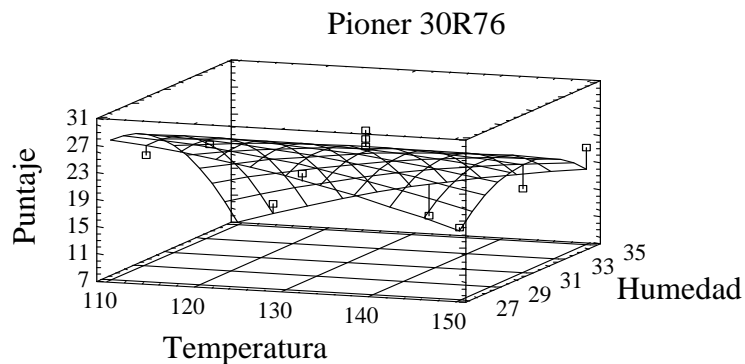


Figura 24: superficie de respuesta Puntaje $f = (H, T)$, para la muestra Pioner 30R76.

La Tabla 29 muestra resultados de ANOVA para el grado de significación de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Puntaje y la figura 19 la superficie de respuesta correspondiente, para la muestra Dekalb 764

Tabla 29: ANOVA para el grado de significación (valores de p) de los términos del modelo de segundo orden (superficie respuesta) correspondiente a Puntaje, para la muestra Dekalb 764

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Relación de F	Valor de p
T	22.815	1	22.815	139.68	0.0071
H	43.2017	1	43.2017	264.50	0.0038
TT	0.985421	1	0.985421	6.03	0.1334
TH	51.1225	1	51.1225	312.99	0.0032
HH	14.8814	1	14.8814	91.11	0.0108
Falta de Ajuste	22.3357	3	7.44525	45.58	0.0215

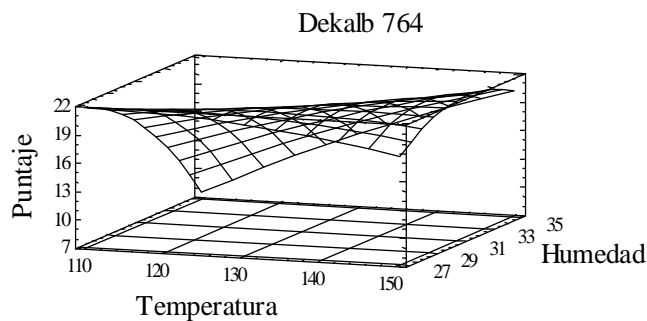


Figura 24: superficie de respuesta Puntaje $f = (H, T)$, para la muestra Dekalb 764

Para el caso de la muestra Pioner 30R76, se observa que todos los términos son significativos excepto para T y TT, y que la falta de ajuste no es significativa, lo que le daría validez al modelo. Para el caso de la

muestra Dekalb 764, se observa que si bien la mayoría de los términos son significativos, la falta de ajuste también lo es, por lo tanto, el modelo no sería adecuado.

4.4.f.4 Conclusiones acerca de la evaluación de la aptitud de las muestras para elaborar tortillas.

Comparando los valores de Penetración correspondientes a las 2 muestras de maíz con el de "Maseca", se observa que éste último es intermedio respecto a los valores de Pioneer 30R76 mientras que siempre es menor respecto a los valores de Dekalb 764. Esto indica que todas las muestras correspondientes a Dekalb 764 resultaron ser más blandas que las muestras de "Maseca".

Comparando los valores de Humedad de Masa de las 2 muestras de maíz con el de "Maseca", se observa que éste último es intermedio respecto a los valores de Pioneer 30R76 mientras que siempre es mayor respecto a los valores de Dekalb 764 (excepto para 150°C – 27% H, que presenta un valor aproximadamente igual al de "Maseca"). Tal como se mencionó anteriormente, las muestras correspondientes a Dekalb 764, eran más blandas que la de "Maseca", aún cuando poseen una menor Humedad de Masa, esto está directamente vinculado a la menor AA que presentan la muestra de Dekalb 764 con respecto a "Maseca".

Con respecto al Puntaje, los mayores valores se obtienen con el maíz Pioneer 30R76, y para algunas condiciones estos son cercanos al

de "Maseca", mientras que con el maíz Dekalb 764 se observa que en la mayoría de los casos no se obtuvieron tortillas con puntaje aceptable.

4.5 Relación entre el Puntaje y el grado de cocción

A los efectos de analizar la aptitud para elaborar tortillas (puntaje) y su relación con el grado de cocción, y considerando que sólo con el maíz Pioner 30R76, se obtuvieron los mejores resultados, se presentan la figura 25.

Se observa claramente que los mayores puntajes se obtienen para valores intermedios de los indicadores de grado de cocción (AA, AD). Estos resultados permiten concluir que es posible obtener harinas precocidas por extrusión aptas para elaborar tortillas siempre que se seleccionen condiciones adecuadas para alcanzar grados de cocción intermedios, los cuales se corresponden a valores de AA entre 3 y 5,5 y valores de AD entre 20 y 50.

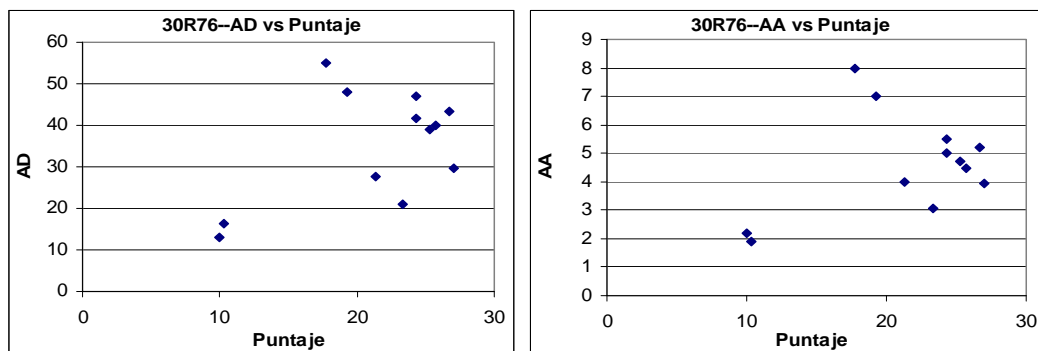


Figura 25 a y b: Indicadores de grado de cocción (AD, AA) en función del Puntaje

5. Conclusiones Finales

La metodología propuesta en esta Tesis ha permitido demostrar que es posible la obtención de harinas precocidas aptas para elaborar tortillas. El efecto de la dureza del endospermo es significativo y exigiría trabajar con maíces de endospermo blando. Las condiciones de extrusión más adecuadas serían aquellas que permiten alcanzar grados de cocción intermedios, los cuales pueden ser obtenidos en las siguientes condiciones: 114°C-27%H, 132°C-27%h, 132°C-31%h, y 150°C-35%H

6. Bibliografía

- 1- Abd Karim, A.; Norziah, M.H. & Seow, C. C., 2000. "Methods for the study of starch retrogradation (Review)". *Food Chemistry* 71, pp. 9-36.
- 2- Almeida-Domínguez, H.D.; Suhendro, E.L. & Rooney L.W., 1997. "Corn alkaline cooking properties related to grain characteristics and viscosity". *Journal of Food Science* 62 (3), pp. 516- 519
- 3- Arámbula, V.G.; González-Hernández, J.; Moreno, M.E. & Ondorica, E.C.A., 2002. "Characteristics of tortillas prepared from dry extruded masa flour added with maize pericarp". *Journal of Food Science* 67 (4), pp. 1444-1448.
- 4- Arámbula, V.G.; Barón Ávila, L. & González-Hernández, J., 2001. "Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays*

L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz”. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 51 (2), pp. 187-194.

5- Atwell, W.A.; Hood, L.F.; Lineback, D.R.; Varriano-Marston, E. & Zobel, H. F., 1988. “The terminology and methodology associated with basic starch phenomena”. Cereal Foods World 33, pp. 306-311.

6- Bedolla, S. & Roodney, L.W., 1984. “Characteristics of United States and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation”. Cereal Foods World 29, pp. 732-735.

7- Berglund, P. T.; Fastnaught, C. E. & Holm, E. T., 1994. “Physicochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals”. Cereal Chemistry 71 (1), pp. 91-95.

8- Biliaderis, C. G., 1992. “Structures and phases transitions of starch in foods systems”. Food Technology 18, pp.98-109

9- Biliaderis, C. G., 1983. “Differential scanning calorimetry in food research: A Review”. Food Chemistry 10, pp. 239 - 265.

10- Blanshard, J.M.V., 1987. “Starch granule: Structure and function a physicochemical approach” Capítulo 2, pp. 35-52. En: Starch. Properties and Potential. Critical reports and Applied Chemistry, 13. Ed. T. Galliard. Pub: The Society of Chemical Industry by John Wiley & Sons.

11- Bryant, C. M. & Hamaker, B. R., 1997. "Effect of Lime on gelatinization of corn flour and starch". *Cereal Chemistry* 74 (2), pp. 171-175.

12- Campus-Baypoli, O.N.; Rosas-Burgos, E.C.; Torres-Chávez, P.I. & Ramírez-Wong, B., 1999. "Physiochemical changes of starch during maize tortilla production". *Starch* 5, pp. 173-77.

13- Chen, J.; Serafín, F. L.; Pandya, R. N. & Daun H., 1991. "Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates". *Journal of Food Science* 56 (1), pp. 84-89.

14- Coscia, A., 1980. "Porqué Argentina produce maíz flint". *Boletín de divulgación técnica N°50*. EEA INTA PERGAMINO.

15- De Dios, C.; Puig, R. & Robutti, J.L., 1992. "Tipificación de maíces por algunos caracteres de sus granos". Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Pergamino. Informe Técnico N° 265.

16- De Dios, C.; Puig, R. & Robutti, J.L., 1990. "Caracterización de la calidad del maíz argentino". Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Pergamino. Informe Técnico N° 241.

17- El-Dash, A.A.; González, R. & Ciol, M., 1983. "Response Surface Methodology in the Control of Thermoplastic Extrusion of Starch". En

Extrusion Cooking Technology. Vol. 2, pp 51-52. Ed by Jowitt, R. Elsevier Applied Science Pub.

18- Eyhérabide, G.H.; Robutti, J.L.; Puig, R.C. & Luque, B., 1996. "Caracterización Física del grano de Cultivares Argentinos de Maíz" Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Pergamino Informe Técnico N° 313

19- Fernández-Muñoz, J.L.; Rodríguez, M.E.; Pless, R.C.; Martínez-Flores, H.E.; Leal, M.; Martínez, J.L., & Baños L., 2002. "Changes in nixtamalized corn flour dependent on postcooking steeping time". Cereal Chemistry 79 (1), pp. 162-166.

20- Figueroa Cárdenas, J.D.; Acero Godinez, M.G.; Vasco Méndez, N.L.; Loza Guzmán, A.; Flores Acosta, L.M. & González-Hernández, J., 2001. "Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal". Archivos Latinoamericanos de Nutrición, Septiembre, 51 (3), pp. 293-302.

21- Frazier, P.J.; Crawshaw, A.; Daniels, N.W. & Russell Eggitt, P. W., 1983. "Optimization of Process Variables in Extrusion Texturing of Soya". En Extrusion Cooking Technology. Vol. 2, pp 1-3. Ed by Jowitt, R. Elsevier Applied Science Pub.

22- Gómez, M.H.; Mc Donough, C.M.; Rooney, L.W. & Waniska, R.D., 1989. "Changes in corn and sorghum during nixtamalization tortilla baking". Journal of Food Science 54, pp. 330-336.

23- Gómez, M.H.; Rooney, L.W.; Waniska R.W. & Pflugfelder R.L., 1987. "Dry corn masa flours for tortilla and snack food". Cereal Food World 32, pp. 372-377.

24- Gomez, M.; Aguilera, J.M., 1983. "Changes in the Starch Fraction During Extrusion-cooking of Corn". Journal of Food Science, 48 pp. 378-388.

25- González, R; Reguera, E; Figueroa, J.M & Sánchez-Sinencio, F., 2005. En "The Nature of the Ca Binding to the Hull of Nixtamalized Corn Grain". Lebensm.Wiss.u.Technol., Vol 38(2) pp. 119-124.

26- González, R.J.; Torres, R.; De Greef, D.; Bonaldo, A.; Robuttl, J. & Borrás, F., 2005. "Efecto de la dureza del endospermo del maíz sobre las propiedades de hidratación y cocción". Archivos Latinoamericanos de Nutrición, Vol 55 (4) pp. 354-360.

27- González, R.; Torres, R. & Degreef, D., 2002. "Extrusión-cocción de cereales". Bol. SBCTA, Campinas 36 (2), pp. 104-115.

28- González, R.J.; Remondetto, G.E.; Coutas R; Santiago L.G. & Bonaldo A.G., 1995. "Efectos de variables del proceso en planta piloto sobre algunas propiedades de aislados proteicos de soja". Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 35 (1), pp. 77-91

29- González, R.J., 1988. "Aspectos de la Estructura del Sistema Agroalimentario en las Sociedades modernas", Boletín del I.T.A.- U.N.L. N° 7, 1-9.

30- Gonzalez, R.J.; De Greef, D.M.; Torres, R.L. & Gordo, N.A., 1987. "Efectos de algunas variables de extrusión sobre la harina de maíz". Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 37 (3), pp. 578-591.

31- Gonzalez, R.J.; Torres, R.L.; De Geef, D.M. & Gordo, N.A., 1987. "Aplicación del método de la superficie de respuesta al estudio de la extrusión - cocción de sémola de maíz". Rev. Agroquim. Technol. Aliment. (España), 27 (2), pp. 251-260

32- Gonzalez, R.J.; Torres, R.L.; de Greef, D.M. & Gordo, N.A., 1986. "Evaluación de almidón de maíz precocido por extrusión-cocción". Rev. Agroquim. Technol. Aliment., 26 (4) pp. 552-564.

33- Greenwood, C.T., 1984. "Starchs", capítulo 3 en Advances in Cereal Science and Technology. Vol VI. American Association of Cereal Chemists.

34- Harper, J.M., 1981. "Food Extrusion". En Extrusion of Foods Vol. 1, pp 1-6. Edit. Harper, J.M.; CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida

35- Hosney, R.C., 1986. "Cereal Starch" capítulo 2. "Principles of Cereal and Technology". American Association of Cereal Chemists

36- Jovanovich, G., 1997. Tesis Doctoral "Estudio de las interacciones entre almidón y lípidos en harina de trigo". Universidad Nacional de La Plata - Argentina.

37- Katz, S.H.; Bediger, M.L. & Valleroy, L.A., 1974. "Traditional maize processing techniques". New World Sci 184, pp. 765-773.

38- Kokini J.L ; Chang C.N., & Lai L.S., 1992. The rol of rheological properties on extrudate expansion. In: J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe (Eds.), Food Extrusion Science and Technology pp. 631-652. New York: Marcel Dekker.

39- Lai, L. & Kokini, J., 1991. "Physicochemical and rheological of starch during extrusion (a review)". *Biotechnology Progress* 7 (3), pp. 251-266.

40- Lii, C.-Y. & Lineback, D.R., 1977. "Characterization and comparison of cereal starches". *Cereal Chem.* 54, pp. 138 – 149.

41- Lue, S.; Hsieh, F. & Huff, H. E., 1991. "Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content". *Cereal Chemistry* 68 (3), pp. 227-234.

42- Martínez-Bustos, F.; Chang, Y.K.; Bannwart, A.C.; Rodríguez, M.E.; Guedes, P.A. & Gaiotti, E.R., 1998. "Effects of calcium hidroxide and processing conditions on corn meal extrudates". *Cereal Chemistry* 75 (6), pp. 796-801.

43- Martínez-Bustos, F.; Figueroa, J.D.C.; Sánchez-Sinencio, F.; González-Hernández, J.; Martínez, J.L.; Ruiz, M.T.A.; Herrera-Gómez, A.; Martínez, F.H.E.; Gomes, A.L.A. & Arámbula, V.G., 1995. "Extrusion technology for the production of fresh corn, masa, tortillas, dry masa flours and derivates". *International Simposium on Food Extrusion: Pasta*

and extruded products" I Sextral. Primer Simposio Brasileiro de Extrusión de Alimentos. Marzo 27-29.

44- Martínez-Flores, H.E.; Martínez-Bustos, F.; Figueroa, C.J.D. & González-Hernández, J., 2002. "Studies and biological assays in corn tortillas made from fresh masa prepared by extrusion and nixtamalization processes". *Journal of Food Science* 67 (3), pp. 1196-1199.

45- Martínez-Flores, H.E.; Martínez-Bustos, F.; Figueroa, C.J.D. & González-Hernández J., 1998. "Tortillas from extruded masa as related to corn genotype and milling process". *Journal of Food Science* 63 (1), pp. 130-133.

46- Mason, W.R., & Hosney, R.C., 1986. "Factor affecting the viscosity of extruded cooked wheat starch". *Cereal Chem.* (63) pp. 436-441.

47- Méndez-Albores, J. A.; Arámbula, V.G.; Vázquez, B.M.E.; Mendoza, E.M.; Preciado, O.R.E. & Moreno-Martínez, E., 2003. "Effect of High Moisture Maize Storage on Tortilla Quality". *Journal of Food Science* 68 (5) pp. 1878-1881

48- Mercier, C. & Feirllet, P, 1975. "Modification of Carbohydrates Components by Extrusion Cooking of Cereal Products". *Cereal Chem.* 52 (3) part 1 pp. 283-294.

49- Mitchel, J.R., & Areas, J.A., 1992. "Structural changes in biopolymers during extrusion". pp. 345-349. In: *Food Extrusion Science*

Technology. Ed. Kokini, J.; Ho, C., and Karwe, M. Marcel Dekker. New York.

50- Mondragón, M.; Bello-Pérez, L.A.; Agama, E.; Melo, A.; Betancur-Ancona, D. & Peña, J.L., 2004. "Effect of nixtamalization on the modification of the crystalline structure of maize starch". *Carbohydrate Polymers* 55, pp. 411-418.

51- Olkku, J.; Hagqvist, A. & Linko, P., 1983. "Steady-State Modelling of Extrusion Cooking Employing Response Surface Methodology". En *Extrusion Cooking Technology*. Vol. 2, pp 27-28. Ed by Jowitt, R. Elsevier Applied Science.

52- Paton, D. & Spratt, W. A., 1981. "Simulated approach to the estimation of degree of cooking of an extruded cereal product". *Cereal Chemistry* 58 (3), pp. 216-220.

53- Pflugfelder, R.L.; Rooney, L.W. & Waniska, R.D., 1988. "Dry matter losses in commercial corn masa production". *Cereal Chemistry* 65, pp. 127-132.

54- Politz, M.; Timpa, J., & Wasserman, B., 1994. "Quantitative measurement of extrusion-induced starch fragmentation products in maize. Flour using nonaqueous automated gel-permeation chromatography". *Cereal Chemistry* 71 (6), pp. 532-536.

55- Robutti, J; Borrás, F; González,R; Torres, R & De Greef, D., 2002. "Endosperm Properties and extrusion cooking behavior of maize cultivars" *Lebensm.Wiss.u.Technol.* 35, pp. 663-669.

56- Robutti, J.L., 1995. "Maize kernel hardness estimation in breeding by near-infrared transmission analysis". *Cereal Chemistry* 72 (6), pp. 632-636.

57- Rodríguez, M.E.; Yáñez-Limón, M.; Alvarado-Gil, J.J.; Vargas, H.; Sánchez-Sinencio, F.; Figueroa, J.D.C.; Martínez-Bustos, F.; Martínez-Montes, J.L.; González-Hernández, J.; Silva, M.D. & Miranda, L.C.M., 1996. "Influence on the structural changes during alkaline cooking on the thermal, rheological and dielectric properties of corn tortillas". *Cereal Chemistry* 73 (5), pp. 593-600

58- Rooney, LL.W. & Serna-Saldívar, S.O., 1987. "Food uses of whole corn and dry-milled fractions". En: "Corn Chemistry and Technology". Cap 13, pp. 359-429. Ed Watson S.A. and Ramstad P.E. American Association of Cereal Chemistry, Inc. S.P. Minnesota, U.S.A.

59- Rosado, J.; Camacho-Solís, R. & Bourges, H., 1999. "Adición de vitaminas y minerales a harinas de maíz y de trigo en México". *Salud pública de México.* 41 (2), pp. 130-137.

60- Sahai, D.; Mua, J.P.; Surjewan, I.; Buendía, M.O.; Rowe, M., & Jackson, D.S., 2001. "Alkaline processing (nixtamalization) of white mexican corn hybrids for tortilla production: significance of corn

physicochemical characteristics and process conditions". *Cereal Chemistry* 78 (2), pp. 116-120

61- Sahai, D.; Surjewan, I.; Mua, J.P.; Buendía, M.O.; Rowe, M., & Jackson, D.S., 2000. "Dry matter loss during nixtamalization of a white corn hybrid: impact of processing parameters". *Cereal Chemistry* 77 (2), pp. 254-258.

62- Sanchez, H.D.; Osella, C.A. & De La Torre, M.A., 2002. "Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and Cassava Starch". *Journal of Food Science* 67 (1), pp. 416-419

63- Sefa-Dedeh, S.; Cornelius, B.; Sakyi-Dawson, E. & Afoakwa, E.O., 2004. "Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize". *Food Chemistry* 86, pp. 317-324.

64- Serna-Saldívar, S.O.; Rooney, L.W., & Greene, L.W., 1992. "Effects of Lime treatment on the bioavailability of calcium diets of tortillas and beans: bone and plasma composition in rats". *Cereal Chemistry* 69 (1), pp. 78-81.

65- Serna-Saldívar, S.O., Rooney, L.W., & Greene, L.W., 1991. "Effect of Lime treatment on the bioavailability of calcium in diets of tortillas and beans: Rats growth and balance studies". *Cereal Chemistry* 68 (6), pp. 565-570.

66- Strissel, J.F. & Stiefel, M., 2002. "Potential benefits of using a white corn hybrid in tortilla and chip applications". *Cereal Food World* 47 (2), pp. 56-59.

67- Torgensen, H & Toledo, R.T., 1977. "Physical properties of protein preparations related to their functional characteristics in comminuted meat systems". *Journal of Food Science* 42, pp. 1615–1620.

68- Unlu, E., & Faller, J., 1998. "Formation of resistant starch by a twin-screw extruder". *Cereal Chemistry* 75 (3), pp. 346-350.

69- Van Zuilichem, D.J., Stolp, W. & Janssen, L.P.B., 1983. "Engineering Aspects of Single and Twin-screw Extrusion-cooking of Biopolymers" *En Extrusion Cooking Technology*. Vol. 2, pp 75-93. Ed by Jowitt, R. Elsevier Applied Science.

70- Waliszewski, K.N.; Pardio, V & Carreon, E., 2002. "Physicochemical and Sensory Properties of Corn Tortillas Made From Nixtamalized Corn Flour Fortified with Spent Soymilk Residue (OKARA)" *Journal of Food Science* 67 (8), pp. 3194-3197.

71- Watson, S.A., 1987. "Structure and composition in: corn chemistry and technology". pp 53-82. Ed Watson S.A. and Ramstad P.E. American Association of Cereal Chemistry, Inc. S.P. Minnesota, U.S.A.

72- Wen, L. F.; Rodis, P. & Wasserman B.P., 1990. "Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of

corn meal". *Cereal Chemistry*. 67 (3), pp. 268-275.

73- Zazueta C.; Ramos G.; Fernández-Muñoz J.L.; Rodríguez M.E.; Acevedo-Hernández G.; & Press R.C., 2002. "A radioisotopic study of the entry of Calcium ion into the maize kernel during nixtamalization". *Cereal Chemistry* 79 (4), pp. 500-503.

74- Zhang, W. & Hosney, R.C., 1998. "Factors affecting expansion of corn meal with poor and good expansion properties". *Cereal Chemistry*. 75 (5), pp. 639-643.

75- Zobel, H.F.; Young, S.N. & Rocca, L.A., 1988. "Starch Gelatinization: an X-ray study". *Cereal Chem* 65, pp. 443-446.