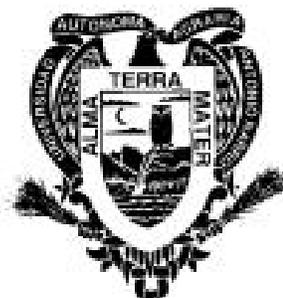


Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”

División de Agronomía



*Determinación y Análisis de la Asociación entre Atributos
Físicos y de Calidad de Grano en Maíz*

Por:

Miguel Ángel Pérez Rodríguez

Tesis

*Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título
de:*

Ingeniero en Agrobiología

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Agosto de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ASOCIACIÓN ENTRE ATRIBUTOS
FÍSICOS Y DE CALIDAD DE GRANO EN MAÍZ.

POR

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ RODRÍGUEZ

TESIS

QUE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

APROBADA

EL PRESIDENTE DEL JURADO

DR. FROYLÁN RINCÓN SÁNCHEZ

DRA. NORMA A. RUÍZ TORRES
SINODAL

DR. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS
SINODAL

DR. ADALBERTO BENAVIDES
MENDOZA SINODAL

EL COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

M.C. ARNOLDO OYERVIDES GARCÍA

DEDICATORIA

A VALENTINA RODRÍGUEZ FLORES, ALMA PÉREZ RODRÍGUEZ, JULIA PÉREZ RODRIGUEZ, OBDULIA LOPEZ SANCHEZ, ANGEL JACOB PÉREZ LOPEZ E ISRAEL PÉREZ RODRÍGUEZ: PERSONAS QUE CON SU EJEMPLO Y SU PRESENCIA ME OBLIGAN A SUPERARME.

AL PUEBLO MEXICANO: POR SOLVENTAR GRAN PARTE DE MI EDUCACION.

A MI ALMA MATER POR TODO LO QUE ME HA DADO.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el apoyo otorgado por medio de la beca de tesis a través del proyecto 41264-Z.

Al Dr. Froylán Rincón Sánchez por haber provisto todo lo necesario para la realización de este trabajo, por la gran ayuda prestada en el análisis e interpretación de los datos, en la revisión del trabajo y por darme la confianza en la participación en este proyecto.

A la Dra. Norma A Ruiz Torres, por al apoyo otorgado así como la atención prestada en la revisión del trabajo.

Al Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas por haber hecho posible mi capacitación en el trabajo de laboratorio así como la participación en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Adalberto Benavides por la atención prestada en la revisión del presente trabajo.

A la Técnica Académica Beatriz Jaime Gil por el apoyo e interés mostrado en la realización del trabajo de laboratorio.

RESUMEN

México es uno de los países más importantes en el consumo de maíz, con una gran tradición en su cultivo y fuerte arraigo en su consumo, por constituir la base alimentaria de la población. De los productos elaborados con maíz en México, las tortillas constituyen el principal producto. El presente trabajo tuvo como objetivos determinar las propiedades físicas del grano de maíz de dos grupos de materiales genéticos contrastantes, determinar los atributos de calidad del grano con base en las propiedades de la harina y el cocimiento óhmico, caracterizar poblaciones y cruza simple de maíz con base en los atributos físicos y de calidad de grano, y estudiar las interrelaciones entre los atributos físicos y de calidad de grano en dos grupos de materiales genéticos divergentes. Se analizaron 140 muestras de maíz pertenecientes a dos fuentes de germoplasma (41 poblaciones y 99 cruza simple experimentales). Se obtuvo información de 16 características de las cuales 10 fueron clasificadas como atributos físicos y seis atributos de calidad del grano. Se realizó la comparación entre los dos grupos de materiales genéticos con base en análisis de varianza, correlaciones simple y de orden entre los pares posibles de atributos. En el análisis e interpretación de los datos se utilizó un análisis de componentes principales. Se encontraron diferencias estadísticas entre grupos de materiales genéticos ($p \leq 0.01$) en el contenido de humedad, peso de mil semillas, índice de flotación, dimensiones del grano (largo, ancho y espesor), el tiempo de cocción y en la temperatura final de gelatinización. El análisis de dispersión de los materiales genéticos (cruza simple y poblaciones) con base en los dos primeros componentes principales (42% de la varianza total), las poblaciones se concentraron en un sector de la figura, en tanto que las cruza simple fueron distribuidas de manera muy amplia y dispersa, lo cual indica la diferencia entre los mismos. Las poblaciones cuentan con menor tiempo de cocción y peso de mil semillas. Las poblaciones también presentan los valores mayores de índice de flotación, comparado con las cruza simple, donde la variación entre estas características es muy amplia. Las poblaciones mostraron valores mayores a la media en la temperatura inicial de gelatinización, rendimiento de masa y rendimiento de tortilla. El análisis

exploratorio de los coeficientes de correlación mostró inconsistencia en los resultados de pares de asociación entre los atributos de los dos grupos de materiales genéticos, lo que hace suponer que las interrelaciones están determinadas en parte por el tipo de materiales genéticos que se este analizando. En el caso de las cruza simples, la temperatura inicial de gelatinización presentó correlación significativa ($p \leq 0.01$) con las variables peso de mil semillas, índice de flotación y tiempo de cocimiento ($r = -0.357, -0.342$ y 0.350 , respectivamente) y también presentó correlación significativa ($p \leq 0.05$) con el peso hectolitrico ($r = 0.234$) y con el rendimiento de masa ($r = 0.236$). Estas condiciones no se presentaron en las poblaciones estudiadas, pues en estas, la temperatura inicial de gelatinización sólo presentó correlación significativa ($p \leq 0.05$) con la variable índice de flotación ($r = 0.345$), lo cual habla de las diferencias entre las dos fuentes de germoplasma. En ambos grupos, el rendimiento de tortillas estuvo correlacionado significativamente ($p \leq 0.01$) al rendimiento de masa. En el análisis gráfico de las interrelaciones se encontró que los atributos que son consistentes para discriminación en los dos grupos de materiales genéticos son el índice de flotación, en asociación negativa con el tiempo de cocimiento y el peso hectolitrico, el peso de mil semillas y los componentes del grano (endospermo, pericarpio y embrión); resaltó además, la importancia de la temperatura inicial de gelatinización con una correlación significativa ($p \leq 0.01$) de $r = -0.342$ con el índice de flotación. Sin embargo, esta relación no coincide con los datos correspondientes con los datos a las poblaciones donde se presenta una correlación significativa ($p \leq 0.05$) de $r = 0.345$, lo cual es un resultado contrastante. El análisis gráfico de las interrelaciones y los coeficientes de correlación, sugieren que la temperatura inicial de gelatinización es un atributo importante para la discriminación de materiales genéticos.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
HIPÓTESIS.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Importancia del maíz en México.....	4
2.1.1 Usos del maíz.....	5
2.2 Calidad del maíz	7
2.2.1 Estructura del grano de maíz.....	7
2.2.2 Composición química del grano de maíz.....	7
2.3 Generalidades del almidón.....	10
2.3.1 Gelatinización de los gránulos de almidón	11
2.3.2 Retrogradación del almidón	13
2.3.3 Viscosidad relativa del almidón.....	13
2.3.4 Propiedades térmicas del almidón	14
2.4 Propiedades físicas del grano de maíz.	14
2.4.1 Peso de mil granos	15
2.4.2 Dimensiones del grano.....	15
2.4.3 Índice de flotación.....	16
2.4.4 Peso hectolítrico.....	17
2.4.5 Proporción de los componentes anatómicos del grano	18
2.4.6 Contenido de humedad del grano	18

2.4.7 Capacidad de absorción de agua	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Material genético	21
3.2. Desarrollo del trabajo.....	21
3.3 Determinación de parámetros físicos.....	22
3.3.1 Dimensiones del grano.....	22
3.3.2 Humedad del grano (Hum)	23
3.3.3 Índice de flotación (IF)	23
3.3.4 Componentes anatómicos del grano	24
3.3.5 Peso de mil granos (PMG).....	24
3.3.6 Peso hectolítrico (PesoH).....	24
3.4. Cocimiento óhmico.....	25
3.4.1 Preparación y cocimiento del maíz.....	25
3.5. Evaluación de las muestras por medio de la elaboración de tortillas a partir de las harinas obtenidas por proceso óhmico	26
3.5.1 Elaboración de Harina instantánea.....	26
3.5.2 Capacidad de absorción de agua (CAA).....	26
3.5.3 Elaboración de tortillas	26
3.5.4 Pérdida relativa de peso de la tortilla durante el cocimiento (PP)	27
3.5.5 Rendimiento de masa (RM).....	28
3.5.6 Rendimiento de tortilla (RT).....	28
3.5.7 Tiempo de cocimiento y el tipo de endospermo (TC y TE)	28
3.6. Características térmicas del grano de maíz.....	29
3.6.1. Temperaturas de gelatinización obtenidas a partir del cocimiento con el equipo óhmico.....	29
3.7 Análisis de datos	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 Comparación de los grupos de materiales genéticos	31
4.2 Análisis de agrupamiento de los materiales genéticos.....	33
4.3 Análisis de correlación.....	36

4.4 Análisis gráfico de las interrelaciones entre atributos por materiales genéticos .	41
V. CONCLUSIONES	45
VI. LITERATURA CITADA	46
VII. APÉNDICE	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Principales usos de algunas razas de maíz en México.	6
Cuadro 2.2. Composición promedio del grano de maíz en base seca del grano y sus fracciones.	8
Cuadro 2.3. Relación de el índice de flotación con la dureza y el tiempo de cocción de granos de maíz. ¹	16
Cuadro 4.1. Cuadros medios del análisis de varianza entre los tipos de germoplasma (Poblaciones y Cruzas simples) en los atributos físicos y de calidad de grano.	32
Cuadro 4.2. Vectores característicos y proporción de la varianza explicada por los dos primeros componentes en el análisis entre los tipos de germoplasma (Poblaciones y Cruzas simples).	34
Cuadro 4.3. Coeficientes de correlación simple (arriba de la diagonal) y de orden (debajo de la diagonal) de los atributos estudiados en el grupo de poblaciones de maíz.	39
Cuadro 4.4. Coeficientes de correlación simple (arriba de la diagonal) y de orden (debajo de la diagonal) de los atributos estudiados en el grupo de las cruas simples de maíz.	40
Cuadro A. 1. Descripción de 43 poblaciones de maíz con base en atributos físicos y de calidad de grano.	54
Cuadro A.2. Descripción de 99 cruas simples experimentales de maíz con base en atributos físicos y de calidad de grano.	56

Cuadro A.3. Estadísticas descriptivas de los atributos físicos de los grupos de cruza simples y poblaciones.	60
Cuadro A.4. Estadísticas descriptivas de los atributos de calidad de grano de los grupos de cruza simples y poblaciones.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes del almidón: a) Amilosa, polímero lineal flexible compuesto de (α 1-4) D-glucosa; b) Amilopectina, polímero ramificado compuesto de (α 1- 4)D-glucosa y α 1-6 (Bracamontes <i>et al.</i> , 2005).	11
Figura 3.1. A) Vernier digital, B) Dimensiones del grano: (a) Largo, (b) Espesor, (c) Ancho.	22
Figura 3.2. Equipo de cocimiento óhmico.	25
Figura 3.3. Tortilladora manual.	27
Figura 3.4. Perfil térmico del proceso de cocimiento (a) y (b) determinación de la primera derivada de la Corriente (R) respecto a la Temperatura, para obtener la temperatura inicial de gelatinización (T_i) y temperatura final de gelatinización (T_f).	29
Figura 4.1. Dispersión de los materiales genéticos con base en los dos primeros componentes principales. CP1: Peso hectolítrico (+), Tiempo de cocción (+), índice de flotación (-); CP2: Rendimiento de masa y tortilla (+), Temperatura inicial de gelatinización (+), Peso de mil semillas (-).	35
Figura 4.2. Interrelaciones entre los atributos por materiales genéticos: A) Poblaciones, B) Cruzas simples; Tipo de endospermo de materiales, 1) Muy duros, 2) Duros, 3) Intermedios, 4) Suaves, y 5) Muy suaves.	44

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es un cereal de gran utilidad para el ser humano debido a la gran cantidad de productos que se pueden elaborar a partir de él, los cuales pueden ser para la alimentación humana de manera directa o procesado, para la alimentación animal, y en industriales como en la producción de almidón, glucosa, fructosa, aceite. El maíz forma parte importante en la producción de bebidas, en la formulación de combustibles para vehículos y en la elaboración de productos y subproductos que se utilizan en la industria minera, textil, electrónica y farmacéutica.

En México, el maíz representa la fuente energética de mayor importancia en la dieta de los sectores mayoritarios de la población (Hernández *et al.*, 1995). En el año agrícola del 2004 se sembraron 8,436,249 hectáreas en las que se obtuvieron 21,670,243 toneladas (SAGARPA, 2005).

Al grano de maíz se le conoce botánicamente como caryopsis, que es una baya en la cual la cáscara de la fruta está fusionada con la semilla formando un solo grano. Los principales componentes del grano de maíz son: almidón, proteínas y lípidos, conteniendo también cantidades menores de fibra cruda, azúcares, minerales y otras sustancias orgánicas tales como las vitaminas (Watson y Ramstad, 1987). Los carbohidratos se encuentran distribuidos dentro del grano de maíz en todos los tejidos. El maíz es una fuente de carbohidratos (75.3%) y el principal es el almidón que representa el 72% de los componentes totales (Earle *et al.*, 1946).

El estudio, determinación de las propiedades físicas y las interrelaciones entre los diferentes atributos constituye un importantes cúmulo de información útil para los

mejoradores de plantas, así como para el procesamiento industrial y mercadotecnia. Además de las propiedades físicas, la determinación química, térmica y reológicas son utilizadas en la investigación y el procesamiento industrial.

El interés en las propiedades térmicas de los alimentos se ha incrementado recientemente en la medida que ha aumentado nuestra capacidad para predecir la velocidad de transferencia de calor en los alimentos. La variabilidad en composición y las características físicas son típicas en todos los alimentos. Por ejemplo, la composición de los vegetales depende de la variedad y las variables de la ubicación geográfica (Mauricio, 2001).

El calor específico, la conductividad térmica y difusividad térmica de masa de tortilla se han estudiado en función de la temperatura, contenido de humedad y tiempo de procesamiento (Griffith, 1985). El cocimiento óhmico ha mostrado considerablemente ser una promesa como una tecnología para el cocimiento de mezclas de sólidos y líquidos. Es un método rápido de cocimiento que podrá reemplazar a los procesos de cocimiento convencionales para alimentos líquidos o sólidos con o sin aditivos (Parrot, 1992).

Tradicionalmente, el mejoramiento genético tiene como su principal objetivo el rendimiento de grano por lo que no es común que se incluyan factores de calidad en las prácticas genotécnicas. Sin embargo, se pueden conjuntar ambos esfuerzos por medio del manejo de dos componentes principales del rendimiento: la biomasa o la capacidad del cultivo para producir una cantidad apropiada de tejido vegetativo y el efecto de partición que es la capacidad de utilizar esta biomasa en la formación de productos deseados (Hernández, 2004).

OBJETIVOS

Determinar de las propiedades físicas del grano de maíz de dos grupos de materiales genéticos contrastantes.

Determinar de atributos de calidad del grano con base en las propiedades de la harina y el cocimiento óhmico.

Caracterizar poblaciones y cruza simples de maíz con base en los atributos físicos y de calidad de grano.

Estudiar las interrelaciones entre los atributos físicos y de calidad de grano en dos grupos de materiales genéticos divergentes

HIPÓTESIS

Las propiedades físicas y de calidad del grano de fácil determinación, así como sus interrelaciones permitirán el uso potencial en el mejoramiento genético.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del maíz en México

México es uno de los países más importantes en el consumo de maíz, con una gran tradición en su cultivo y fuerte arraigo en su consumo, por constituir la base alimentaria de la población, existen vínculos directos entre el desarrollo de los maíces nativos y criollos y los diferentes grupos étnicos en el país, de tal forma que la preferencia por el cultivo de estas variedades, esta asociado directamente con los hábitos de consumo de los núcleos sociales específicos. De los productos elaborados con maíz en México las tortillas constituyen el principal producto y su consumo se ha estimado en 328 g diarios per capita (Figueroa et al., 2001).

La importancia económica de estos maíces se manifiesta en la seguridad de los pequeños productores de contar con uno de los principales componentes de su dieta alimenticia y por tanto de su ingesta de nutrientes. La importancia social se manifiesta en la cohesión que determinadas variedades y productos hacen posible en un grupo étnico, por ejemplo: el maíz bolita y las tlayudas que se elaboran con este y que ambos se producen solamente en la Región de los Valles Altos de Oaxaca (Hernández, 2004).

Las semillas mejoradas han tenido poca aceptación por los agricultores mexicanos, especialmente por su alto precio y porque requiere de la compra continua de insumos como la semilla, fertilizante e insecticidas. Además, difícilmente pueden, en forma continua y sostenida, igualar los resultados que obtienen cuando adoptan y adaptan ciertos insumos, practicas e instrumentos, con el uso de semillas criollas (Warman, 1982).

2.1.1 Usos del maíz

Existen diversos productos que incluyen en una u otra forma derivados del maíz, su industrialización no se limita al grano si no también se hace extensiva al olote, al tallo y a las hojas. Dentro de los procesos para la obtención de algún derivado del grano del maíz se encuentra la molienda seca, la cual consiste en la separación física de las distintas partes anatómicas del grano. Mediante este proceso se obtienen el endospermo en forma entera, quebrado o en harina que son usados en procesos como la obtención de hojuelas de maíz, cereales y adjuntos cerveceros. Los subproductos de la molienda son el salvado y el germen que se usan en la industria aceitera y en la alimentación animal otro proceso es la molienda húmeda que se utiliza como método para la obtención del almidón, los subproductos principales de esta molienda son el gluten y el germen.

Otro proceso es la nixtamalización que implica el cocimiento del maíz en presencia de hidróxido de calcio y un posterior reposo de 12 a 18 horas. Al grano cocido de esta manera se le denomina nixtamal, mismo que es molido en un molino de piedra con la adición de pequeñas dosis de agua. La masa obtenida así es usada para la elaboración de diversos productos como las tortillas, tamales, gorditas, tlatloyos, etc. Como derivados del proceso de nixtamalización se encuentra la producción de harinas instantáneas o nixtamalizadas.

Otro de los usos importantes del maíz es la elaboración de productos tipos botana, la manufactura de estas botanas se puede dividir en tres grupos: a) granos enteros como lo son las palomitas o rosetas de maíz; b) productos nixtamalizados elaborados a partir de masa o tortillas y c) productos expandidos (Serna et al, 1994).

Cuadro 2.1. Principales usos de algunas razas de maíz en México.

RAZA	USOS
Dulce de Jalisco, Dulcillo del Noroeste	Tostado, grano entero, tostado y molido para pinole
Elotes Occidentales, Elotes Cónicos	Para elotes y pozole
Cacahuacintle, Blando de Sonora, Harinoso de Ocho	Tostado y molido para pinole, pozolero, hecho en memelitas y horneado, en gordas de maíz crudo
Bofo	Tostado, en huacholes, maíz crudo dejado reposar en agua para su consumo
Zapalote Chico	En totopos
Reventador, Chapalote, Palomero Toluqueño, Apachito, Arrocillo Amarillo	Tostado hasta reventar para palomitas; tostado y adherido con dulce para ponteduro
Razas con colores oscuros	Para tamales y tortillas en ocasiones festivas

Fuente: Hernández (1972).

2.2 Calidad del maíz

2.2.1 Estructura del grano de maíz

El pericarpio está compuesto de una capa externa de células de pared gruesa, alargadas y petrificadas que forman un tejido denso y duro (Watson y Ramstand, 1987). El pericarpio constituye aproximadamente el 5.3 % del peso del grano en base seca (Inglett, 1979). El pericarpio del grano de maíz está compuesto de hemicelulosa 70 %, celulosa 23 % y lignina 0.1 % (Gordon, 1989).

El endospermo es el mayor componente de la estructura del grano con el 82.3 % el peso total; el 86.4 % del endospermo es almidón, contiene el 75 % del total de las proteínas presentes en el grano entero (Watson y Ramstand, 1987).

El germen representa aproximadamente el 11.5 % del peso seco del grano, el 90 % del peso del germen está ocupado por el cotiledón que almacena nutrientes que son usados durante la germinación, así como también el vástago y la raíz primaria (Watson y Ramstand, 1987).

El pedicelo es la estructura por medio de la cual el grano se encuentra unido al olote, está compuesto de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, constituye el 0.8 % del total del peso seco del grano (Watson y Ramstand, 1987).

2.2.2 Composición química del grano de maíz

La composición química del maíz varía significativamente dependiendo de la variedad y tipo, debido a que es influenciado por factores climáticos, tipos de suelo y cultivo (Matus y Redondo, 1997)

El grano de maíz esta constituido principalmente por almidón, proteínas, lípidos y fibra cruda, también de componentes minoritarios como azúcares libres, minerales y vitaminas (Watson y Ramstand, 1987). La composición química del grano de maíz se muestra en el Cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Composición promedio del grano de maíz en base seca del grano y sus fracciones.

Fracción	Grano entero	Almidón (%)	Proteína (%)	Lípidos (%)	Azúcares (%)	Cenizas (%)
Grano entero	--	71.5	10.3	4.8	2.0	1.4
Endospermo	82.3	86.4	9.4	0.8	0.6	0.3
Germen	11.4	8.7	18.8	34.5	10.5	10.1
Pericarpio	5.3	7.3	3.7	1.0	0.3	0.8
Pedúnculo	0.8	5.3	9.7	3.8	1.6	1.6

Fuente: Inglett, 1979.

Proteínas

El grano de maíz presenta un bajo contenido de proteína. Estas son consideradas de baja calidad nutricional ya que casi el 50 % de ellas son zeína, una fracción proteica que no puede ser digerida por monogástricos además de ser deficiente en los aminoácidos esenciales lisina y triptófano. La mayor parte de la proteína se encuentra distribuida en el endospermo y en el germen (Bressani y Scrimshaw 1958). Todas contienen carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, y también azufre. Hay proteínas que contienen algunos elementos adicionales, particularmente fósforo, hierro, zinc y cobre. Comúnmente solo se encuentran 20 alfa aminoácidos distintos como similares de

las proteínas (Lehninger, 1972). Las proteínas constituyen aproximadamente el 10 % del grano entero de maíz (Inglett, 1979).

Lípidos

El 85 % de los lípidos presentes en el grano de maíz están presentes en el germen, estos lípidos se encuentran principalmente como triglicéridos de ácidos grasos, fosfolípidos y en menor proporción esteroides, tocoferoles y carotenoides (Watson y Ramstad, 1987). En cereales, el contenido de lípidos varía de 2 a 5 %, en el grano de maíz es más pobre, esto se debe a que la mayor parte de los lípidos se encuentra en el embrión y la aleurona. Los lípidos aportan al grano la energía necesaria, siendo estos lípidos insaturados y tienden a producir grasa blanda (Duffus y Slaughter, 1980). El grano entero de maíz contiene aproximadamente 4.8 % de lípidos (Inglett, 1979).

Vitaminas y minerales

El grano de maíz contiene vitamina A y E, además algunas vitaminas hidrosolubles como: tiamina, piridoxina y niacina (Inglett, 1979). Aunque la niacina se encuentra en elevadas concentraciones se encuentra enlazada de tal forma que esta es indisponible para los monoálgtricos, sin embargo, el tratamiento alcalino lo hace disponible (Watson y Ramstad, 1987).

El maíz, al igual que los otros cereales tiene bajos niveles de calcio, fósforo, potasio y magnesio; la mayor parte de los minerales se encuentran concentrados en el germen. El elemento inorgánico más abundante es el fósforo (0.29 % en promedio) en el grano seco.

Carbohidratos

El 75 % del grano de maíz son carbohidratos y el principal de ellos es el almidón que representa el 72 % de los componentes totales (Earle et al., 1946). El almidón está constituido por dos tipos de moléculas: un polímetro lineal que es la amilosa y un polímetro ramificado que es la amilopectina, los que se diferencian en el peso molecular y estructura química (Watson y Ramstad, 1987).

Otros carbohidratos en el grano de maíz son los azúcares libres, los cuales están presentes en cantidades muy bajas, constituyen sólo el 2 % del grano en base seca, se encuentran concentrados principalmente en el germen, los monosacáridos comprenden principalmente D-fructosa y D-glucosa, los disacáridos y trisacáridos comprenden sacarosa y rafinosa.

2.3 Generalidades del almidón

El almidón, carbohidrato predominante en la dieta humana (Skrabanja et al., 1999), junto con otros polisacáridos (fibra dietética) son los componentes principales de los carbohidratos (Watson y Ramstad, 1987).

Los almidones comunes contienen dos formas de polímeros de glucosa. Aproximadamente el 25 % del almidón existe como un polímetro con uniones alfa-1,4 sin ramificaciones llamado amilosa. El resto existe como una cadena con uniones alfa-1,4 con ramificaciones en alfa-1,6, llamado amilopectina (Gaytán, 2004).

La amilosa es un polímetro esencialmente lineal, formado por unidades de D-glucosa, con ramificaciones espaciadas e infrecuentes, lo que permite observar que la amilasa se comporte como un polímetro lineal (Lineback y Rasper, 1988).

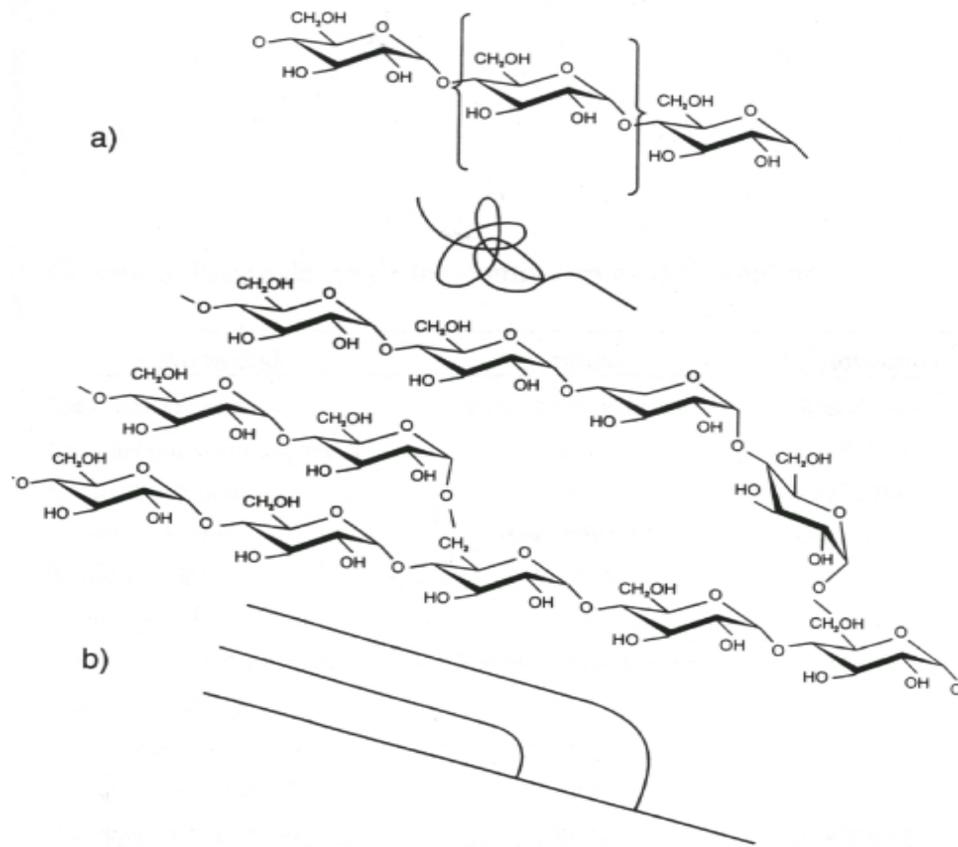


Figura 2.1. Componentes del almidón: a) Amilosa, polímero lineal flexible compuesto de (α 1-4) D-glucosa; b) Amilopectina, polímero ramificado compuesto de (α 1-4)D-glucosa y α 1-6 (Bracamontes *et al.*, 2005).

2.3.1 Gelatinización de los gránulos de almidón

Es un fenómeno que ocurre en la mayoría de los procesos alimentarios cuya base son los cereales. Durante éste fenómeno, los gránulos de almidón absorben agua a medida que hay un incremento en la temperatura y forman una solución viscosa o un gel dependiendo de la cantidad de agua presentes (Mauricio, 2001).

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero pueden embeber agua de manera reversible; es decir, pueden hincharse ligeramente con el agua y volver luego al tamaño original al secarse. Sin embargo cuando se calientan en agua, los gránulos de almidón sufren el proceso denominado gelatinización, que es la interrupción de la ordenación de las moléculas en los gránulos. Durante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo mas o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan (Bracamontes et al., 2005).

La gelatinización se caracteriza por la pérdida de orden en la cristalinidad dentro de los gránulos de almidón, perdiendo su tamaño original (Karaptansios et al., 2000). Además, la gelatinización se manifiesta en cambios irreversibles en las propiedades de hinchamiento granular, fusión de la cristalinidad nativa, pérdida de birrefringencia, pérdida del patrón de la difracción de rayos x, solubilización del almidón y un incremento en la viscosidad, por lo que la gelatinización es un proceso irreversible que causa cambios drásticos en las características de los alimentos (Gaytán, 2004).

El punto inicial de gelatinización y el intervalo bajo el cual ocurre, esta gobernado por la concentración de almidón, el método empleado, el tipo de gránulo y la heterogeneidad de los gránulos. La temperatura a la cual el almidón empieza a sufrir estos cambios (temperatura de gelatinización) varía también de acuerdo al origen del almidón (Mauricio, 2001).

El proceso de gelatinización, se ha asociado con la calidad y la digestibilidad de los productos que contienen almidón (Biliaderis, 1991). Una parte del almidón de los cereales, leguminosas, tubérculos y frutas, no es digerido y sigue hacia el intestino grueso donde es fermentado por las bacterias del colon. Este almidón se conoce como almidón resistente y se le ha asociado con una disminución del índice glucémico,

menor absorción del colesterol y prevención del cáncer de colon (Englyst et al., 1992; Asp et al., 1996).

La funcionalidad del almidón se debe principalmente a la amilosa y la amilopectina, componentes de alto peso molecular, así como a la organización física de estas moléculas dentro de la estructura del gránulo (Biliaderis, 1991). Los estudios de la relación estructura-función han determinado el comportamiento del almidón cuando los alimentos son procesados y almacenados.

2.3.2 Retrogradación del almidón

La retrogradación del almidón se caracteriza por un incremento gradual de la rigidez del alimento y una separación de las fases entre polímeros y solventes. Los cambios físicos que acompañan a la retrogradación tienen influencia en la textura, digestibilidad y aceptabilidad de los productos cuyo componente mayoritario es el almidón (Gaytán, 2004). La proporción amilosa/amilopectina del almidón afecta profundamente la retrogradación, que también es influenciada por la distribución del tamaño de molécula de los componentes, temperatura, cambios de pH y la presencia de otros solutos en la solución del almidón (Chang y Liu, 1991).

2.3.3 Viscosidad relativa del almidón

La viscosidad es definida como la oposición de un fluido a fluir, durante la gelatinización. La viscosidad del almidón se incrementa drásticamente por causa del hinchamiento de los gránulos y por lo tanto ocupan un mayor espacio dentro de la solución (Mazurs et al., 1957). A medida que los gránulos de almidón se hinchan, se propicia con esto la formación de un gel, esta transición se ve acompañada por un gran incremento en la viscosidad relativa. Este parámetro es apto para describir la resistencia

a la deformación y la consistencia. Es indudable que tanto a los proveedores y como a los usuarios, les interesa conocer la calidad del almidón y el comportamiento del fluido para predecir el uso final de este (Zobel, 1984). Durante la gelatinización, la viscosidad del almidón se incrementa drásticamente por causa del hinchamiento de los gránulos y por lo tanto ocupan un mayor espacio dentro de la solución (Mazurs et al., 1957).

2.3.4 Propiedades térmicas del almidón

Las propiedades térmicas de mayor importancia son el calor específico, la conductividad térmica, la difusibilidad térmica y el coeficiente de transferencia de calor, se ha estudiado estas propiedades en la masa de tortilla en función de la temperatura, contenido de la humedad y el tiempo de procesamiento (Griffith, 1985). Campbells et al., (1995) sugieren que las propiedades térmicas del almidón pueden ser utilizadas para predecir las propiedades funcionales de híbridos de maíces.

2.4 Propiedades físicas del grano de maíz.

La calidad de un maíz para la preparación de tortillas se determina por las características físicas del grano, dentro de las que destaca la dureza, relacionada con la proporción de endospermo harinoso/cristalino, esta se encuentra asociada en forma directa con otras variables como: peso hectolítrico, densidad y contenido de proteína (Pomeranz et al., 1986; Salinas et al., 1992).

Algunas otras propiedades importantes para el uso alimentario del maíz son el tamaño del grano, la gravedad específica y dureza del grano así como la capacidad de absorción de agua, el rendimiento de masa, el rendimiento de tortilla y la pérdida de peso durante la cocción de la tortilla. El color del grano de maíz varía ampliamente y

aunque no se considera una propiedad importante para el uso alimentario del mismo, influye considerablemente en la preferencia del consumidor (Mauricio et al., 2004).

La asociación entre los atributos físicos del grano (peso hectolítrico, índice de flotación, dureza del grano, incluyendo el tiempo de cocimiento) con la viscosidad y la temperatura de gelatinización sugieren que estos pueden ser usados en la discriminación de los materiales genéticos.

2.4.1 Peso de mil granos

El principio de esta prueba es el conteo del número de semillas que hay en un determinado peso y se calcula en mil semillas (Moreno, 1996). Esta prueba es un indicador del tamaño del grano así como de la densidad, mismos que están relacionado con los rendimientos de molienda de maíz y trigo en donde se prefieren granos uniformes y grandes ya que contienen una mayor proporción de endospermo (Gaytán, 2004). El peso de mil granos es un factor estandarizado en Estados Unidos, pero no es un indicador preciso de ningún atributo de calidad del grano aunque sigue siendo uno de los factores principales ya que en general, los defectos de calidad asociados con bajo peso no se reflejan en ninguna otra clase de análisis (Freeman, 1973).

2.4.2 Dimensiones del grano

El tamaño de los granos de maíz en la industria harinera es un factor de calidad que en cierta medida proporciona una idea a cerca del uso final de este (Gaytan, 2004). El tamaño del grano tiene implicaciones para la industria de harinas nixtamalizadas durante las operaciones de limpieza que se realizan en forma previa a la nixtamalización, en las que se emplean una serie de mallas que permiten la separación de partículas de mayor o menor tamaño al del grano de maíz. Así, las mermas durante

la limpieza se pueden incrementar considerablemente cuando el grano tiende a ser mas delgado debido a que estos atraviesan fácilmente las mallas empleadas (Salinas y Pérez, 1997).

2.4.3 Índice de flotación

El porcentaje de flotación es tomado como un índice de dureza aceptado para el comercio de granos en Estados Unidos (Pomeranz et al., 1986). En caso de que se tengan granos de maíz duros el índice de flotación será muy bajo o nulo, estos maíces son importantes para la industria harinera; los granos suaves o muy suaves son los que presentan un mayor índice de flotación, en estos maíces el contenido de endospermo harinoso es mayor en relación con el contenido de endospermo duro o vítreo (Gaytán, 2004).

La dureza de un grano puede ser determinada de manera indirecta con el índice de flotación y el tiempo de cocción para realizar la prueba relativa a la nixtamalización. Este método se basa en el principio de que los granos duros son de mayor densidad y por lo tanto tales granos flotan en menor cantidad que los granos de menor densidad. De acuerdo a la norma oficial mexicana (Anónimo, 2002), la dureza y el tiempo de cocción en maíz pueden ser estimados con base en el índice de flotación (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Relación de el índice de flotación con la dureza y el tiempo de cocción de granos de maíz.¹

Granos flotantes (IF)	Dureza	Tiempo de cocción (min)
0-12	Muy duros	45
13-37	Duros	40
38-62	Intermedios	35
63-87	Suaves	30
88-100	Muy suaves	25

¹ (Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI, 2002)

2.4.4 Peso hectolítrico

Existen varios métodos que dictaminan la calidad del grano por medio del estudio de su densidad, pero indudablemente el más importante y práctico es la determinación del peso hectolítrico. Los valores de densidad son importantes ya que están relacionados con las condiciones del grano. Los granos más densos tienen menor probabilidad de estar dañados por insectos e influyen positivamente en el rendimiento de la molienda y calidad de la materia prima elaborada. Por otra parte, la industria refinadora de almidón prefiere granos suaves o de densidad menor ya que generalmente contienen una mayor proporción de almidón (Mauricio, 2001). Los maíces suaves son menos densos debido a una mayor área porosa (Martínez y Lachance, 1979). Los maíces de endospermo suave presentan densidades más bajas que las de endospermo duro (Watson y Ramstad, 1987).

El método más importante y práctico en la determinación del peso hectolítrico o volumétrico es realizado con el medidor Winchester Bushel Meter. El sistema consiste en la determinación del peso en libras o kilogramos de un cierto volumen de grano expresado en bushels o hectolitros de llenado o empacado bajo condiciones estandarizadas.

El peso hectolítrico y la densidad del grano guardan una relación directa con la dureza del grano, de manera que valores altos en estas variables indican una mayor dureza. Dentro de las variables asociadas con la dureza del grano, el peso hectolítrico es uno de los más importantes y es utilizado ampliamente para la selección durante la recepción y acopio de materia prima en la industria de harinas nixtamalizadas, la cual ha establecido un mínimo de 74 kg/hl (Salinas y Pérez, 1997).

2.4.5 Proporción de los componentes anatómicos del grano

Una baja proporción de pedicelo facilita el moldeado de la masa y mejora la textura por esa razón la industria de harina nixtamalizada establece una máximo de 2 % de proporción de pedicelo (Vázquez et al., 2003).

La industria de la harina nixtamalizada establece un máximo de 5.5 % de proporción de pericarpio. Los molineros tradicionales de la masa no objetan las proporciones de esta estructura ya que en ella se localizan las gomas que contribuyen en la cohesión de las partículas que constituyen la masa (Almeida y Rooney, 1996). Helm y Zuber (1992) señalan que los factores que determinan el espesor del pericarpio son principalmente de carácter genético.

En la industria que usa el maíz para extraer aceite es muy importante que el grano tenga un alto contenido de germen pues eso aumenta los rendimientos; en cambio, en la industria de la molienda húmeda este componente baja la calidad final de sus productos (Ruan et al., 1992). Un bajo contenido de germen repercute en una menor rancidez oxidativa debido a que es en el germen donde se encuentra la mayor proporción de lípidos, pero también se traduce en un menor contenido de energía y menor calidad proteica pues el germen contribuye a la calidad proteica del grano de maíz (Gaytan, 2004).

2.4.6 Contenido de humedad del grano

Al incrementarse el contenido de humedad en los granos de maíz los tiempos de molienda se incrementan también, por lo tanto, la humedad del grano se encuentra también dentro de los factores que determina la dureza del grano. De igual manera al haber un incremento en la humedad de los granos la densidad decrece en forma directa (Pomeranz et al., 1986). El contenido de la humedad del grano es un indicador de la

calidad del manejo y almacenamiento de cada variedad y existen normas que permiten un 14 % de humedad como máximo (Gaytán, 2004).

2.4.7 Capacidad de absorción de agua

Es un parámetro importante para la industria de la masa y la tortilla en la cual se requieren harinas instantáneas con elevada capacidad de absorción de agua. El agua que se pierde durante el cocimiento es significativo para el rendimiento de tortilla, por eso es importante que los maíces no sólo tengan una alta capacidad de absorción de agua sino que también la retengan y eso se vea reflejado directamente en el rendimiento de tortilla. Los parámetros de capacidad de absorción de agua y de rendimiento de tortilla pueden variar dependiendo del genotipo de maíz utilizado, en el caso de productos como harinas para tostadas o frituras no requieren elevada capacidad de absorción de agua (Gaytán, 2004).

La mayor capacidad de absorción de agua del almidón de los genotipos de grano suave, con relación al extraído de los genotipos de grano duro, se debe a diferencias en la composición del almidón en cada caso. El almidón de maíces de grano duro contiene una proporción más alta de amilosa que el de maíces de endospermo suave (Tester y Morrison, 1990). En el almidón normal de cereales, la amilopectina parece estar asociada con la capacidad del gránulo de hincharse y absorber agua, en tanto que la amilosa inhibe esta propiedad (Bryant y Hamaker, 1997).

2.4.8 Cocimiento óhmico

El calentamiento óhmico (calentamiento dieléctrico o efecto Joule) se da por el calor generado por la resistencia de un material al paso de la corriente eléctrica lo cual está relacionado con las propiedades eléctricas del material como capacitancia (capacidad de almacenar energía eléctrica) y resistencias, definidas por las propiedades dieléctricas (Dorf, 1995).

El proceso consiste en la aplicación de un voltaje alterno (70 Volts) constantes y a una frecuencia constante a la muestra bajo estudio. La electricidad pasa a través disipando energía térmica donde esta se necesita para llevar a cabo un grado deseado de cocimiento y medir estas propiedades, registrando la variación de la corriente eléctrica como función del tiempo; la energía eléctrica es transformada en calor por vibraciones moleculares de los componentes químicos del material (efecto Joule). El paso de la corriente a través de la muestra genera calor por el efecto joule, el incremento de la temperatura en función del tiempo se registra utilizando un termopar. La muestra dentro de la celda se comporta como una resistencia eléctrica y produce diferentes perfiles térmicos que son relacionados con la calidad (Mauricio, 2001).

La combinación de las mediciones corriente contra tiempo y temperatura permiten obtener gráficos de corriente contra tiempo llamados conductigramas. Los conductigramas proporcionan información sobre los cambios estructurales en diferentes almidones durante el proceso de gelatinización el cual se manifiesta como una disminución de la corriente con el incremento de la temperatura (Morales *et al.*, 1997).

El equipo de cocimiento óhmico es un método eléctrico que presenta semejanzas con el análisis térmico y la determinación de cambios de fase, estructura y otras propiedades de un material conductor de electricidad que lleva a cabo una transición dependiendo de la temperatura u otras variables. El equipo óhmico se ha utilizado específicamente para medir el grado y temperatura de gelatinización de almidones de cereales y otros granos (Gaytán, 2004).

Las posibles ventajas del cocimiento óhmico comparado con la nixtamalización tradicional, es el tamaño de muestra pequeño apropiado para programas de mejoramiento, rapidez y otros parámetros térmicos del comportamiento de los almidones (Hernández, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material genético

En el presente trabajo de investigación se utilizó material genético contrastante, representado por 41 poblaciones criollas de maíz y 99 cruzas simples experimentales (Cuadros A1 y A2 del apéndice). Las poblaciones criollas fueron inicialmente recolectadas en el sureste de Coahuila. Las cruzas simples fueron obtenidas a partir de dos grupos de líneas endogámicas. El primer grupo de líneas fue proporcionado por el Programa de Bajío del Instituto Mexicano del Maíz (líneas identificadas con los números del 11 al 20), como parte del proyecto 41264-Z financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el otro grupo (líneas identificadas con los números 41 al 60) por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), éste último, con características de alta calidad de proteína (Quality Protein Maize).

Se incluyó material genético contrastante para estudiar el comportamiento e interrelaciones de los atributos físicos y de la calidad del grano. El material genético fue obtenido mediante cruzamientos controlados en el ciclo agrícola 2004-2005 en la estación experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Tepalcingo, Morelos.

3.2. Desarrollo del trabajo

El trabajo de investigación fue desarrollado en las instalaciones del laboratorio de genética de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Previa a la

determinación de los atributos físicos y de calidad de grano, se realizó una estancia de entrenamiento y capacitación en el Laboratorio de Propiedades Físicoquímicas de Materiales en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Querétaro.

3.3 Determinación de parámetros físicos

3.3.1 Dimensiones del grano

Se midió el largo, ancho y espesor de diez granos de cada muestra con la ayuda de un vernier digital marca Stainless Hardened. Los resultados fueron expresados en milímetros, dichos granos fueron seleccionados al azar, esta prueba se realizó por duplicado.

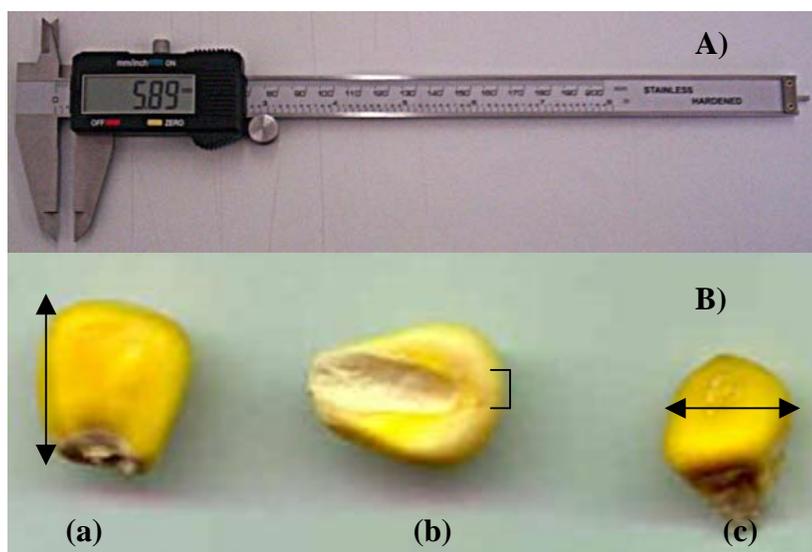


Figura 3.1. A) Vernier digital, B) Dimensiones del grano: (a) Largo, (b) Espesor, (c) Ancho.

3.3.2 Humedad del grano (Hum)

Para determinar la humedad del grano, se tomó el peso de diez semillas de cada muestra las cuales fueron sometidas a secado en una estufa a 145 °C por un periodo de 12 horas para después tomar el peso de las diez semillas, para este fin se utilizó una balanza de marca Precisa modelo BJ 610 misma que se utilizó para la realización de las demás pruebas donde se requirió estimar el peso. Con los dos pesos tomados se calculó el porcentaje de humedad del grano.

$$Hum = \left(\frac{PH - PS}{PH} \right) * 100$$

Donde: Hum = humedad del grano en porcentaje; PH = peso de la muestra húmeda; PS = peso seco de la muestra.

3.3.3 Índice de flotación (IF)

Se llevó a cabo el conteo de los granos que flotaron y los que no flotaron al introducir 100 granos limpios y sanos en una solución de nitrato de sodio ajustada a 1.250 g/ml, medida con un picnómetro (Anónimo, 2002). Se empleó un volumen de 250-300 ml, contenidos en un vaso de precipitado de 600 ml, separando los granos de maíz con la ayuda de un agitador de vidrio, el conteo se realizó un minuto después de introducir los granos a la solución de nitrato de sodio. Para obtener una solución de densidad de 1.25 g/ml se ajustó la solución de nitrato de sodio al 41% (marca Jalmek), porcentaje que puede variar de acuerdo a la pureza del reactivo. La prueba se realizó por duplicado y los resultados se expresaron en porciento. Para el cálculo del porciento de granos que flotaron se utilizó la siguiente expresión:

$$IF = \left(\frac{\text{Granos que flotaron}}{\text{Total de granos}} \right) * 100$$

3.3.4 Componentes anatómicos del grano

Se tomaron diez granos de cada muestra, se pesaron y se introdujeron en agua destilada donde se remojaron por 24 horas, después de lo cual se procedió a separar el endospermo, el pericarpio y el germen del grano con la ayuda de un bisturí. Se pesó cada una de las partes por separado obteniéndose el porcentaje de cada fracción con respecto al peso total del grano. La siguiente expresión se utilizó para el cálculo del porcentaje de cada fracción del grano:

$$\% \text{ de cada componente} = \left(\frac{\text{Peso del componente}}{\text{Peso sumatoria de los componentes}} \right) * 100$$

3.3.5 Peso de mil granos (PMG)

Se pesaron 100 granos seleccionados al azar de cada muestra con una balanza de 0.01 gramos de precisión (marca Precisa modelo BJ 610), el peso de los 100 granos fue multiplicado por diez para calcular el peso de 1000 granos en gramos. La prueba se realizó por duplicado.

3.3.6 Peso hectolítrico (PesoH)

Un recipiente de volumen conocido (100 ml) fue pesado y llenado de maíz, se tomó el peso del recipiente lleno de granos de maíz. Por diferencia de pesos se calculó el peso de la muestra para el volumen del recipiente, con el dato anterior fue

posible calcular el peso del maíz en 100 litros de volumen, el resultado fue expresado en kg/hl, y fue numéricamente igual a los g/ml obtenidos al realizar la prueba.

3.4. Cocimiento óhmico

3.4.1 Preparación y cocimiento del maíz

Se molió cada una de las muestras en un molino de café marca Braun, la muestra molida fue cribada en un tamiz US 60. Del material que pasó a través del tamiz se tomaron siete gramos y se mezcló perfectamente con 5 ml de H₂O. La mezcla obtenida fue colocada en el interior de una celda de nylamine y fue sometida a cocimiento óhmico con un voltaje constante de 70 V hasta alcanzar una temperatura de 120°C, obteniéndose las gráficas de los perfiles térmicos de cada una de las muestras. La primera derivada de cada una de las gráficas permitió obtener las temperaturas de gelatinización.



Figura 3.2. Equipo de cocimiento óhmico.

3.5. Evaluación de las muestras por medio de la elaboración de tortillas a partir de las harinas obtenidas por proceso óhmico

3.5.1 Elaboración de Harina instantánea

Después de someter la muestra a cocimiento óhmico se deshidrató en una estufa a 60 °C por 12 horas. La muestra deshidratada se molió en un molino de café.

3.5.2 Capacidad de absorción de agua (CAA)

Se pesó la harina obtenida del cocimiento óhmico y se le agregó agua con una bureta mezclando manualmente al mismo tiempo hasta que se obtuvo una consistencia adecuada, es decir, que al oprimir la masa con la mano ésta no presentara aberturas. Por medio de la bureta fue posible medir la cantidad de agua que se necesitó para obtener una consistencia adecuada, este parámetro se reportó en litros de agua por kilogramo de harina (L/kg). Para calcular este parámetro se utilizó la siguiente expresión:

$$CAA = \left(\frac{\text{ml de agua absorbida}}{\text{g de harina}} \right)$$

3.5.3 Elaboración de tortillas

Después de agregar agua hasta que la masa adquirió una consistencia adecuada, con una tortilladora manual se troqueló una tortilla de la que se cortaron círculos de tortillas de 2.5 cm de diámetro y 1.2 mm de espesor de los que fue registrado el peso de cada uno y posteriormente se sometieron a cocimiento en un comal a 270 grados

durante 30 s por una cara, y de 25 s por la otra cara, para formar la capa delgada y 15 segundos por la primera cara para completar el cocimiento y lograr el inflado.

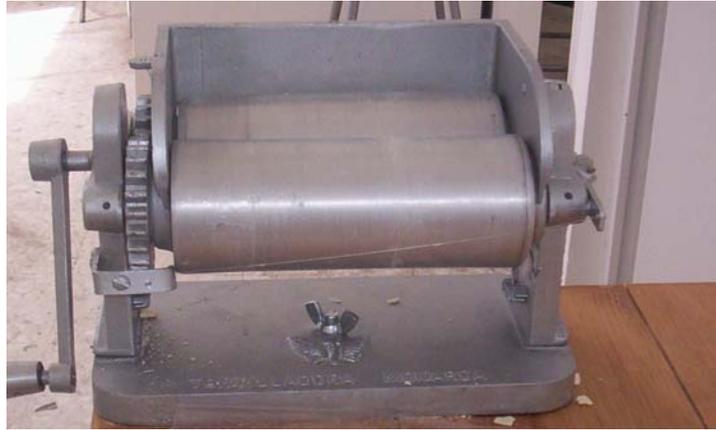


Figura 3.3. Tortilladora manual.

3.5.4 Pérdida relativa de peso de la tortilla durante el cocimiento (PP)

Se pesó cada una de las tortillas después de que alcanzaron la temperatura ambiente, utilizando los datos de peso de la tortilla antes de cocer y el peso de la tortilla después de cocer, por lo que fue posible calcular la pérdida relativa de peso que la tortilla sufrió durante el cocimiento con la siguiente fórmula:

$$PP = \left(\frac{PT1 - PT2}{PT1} \right) * 100$$

Donde: PP = pérdida de peso relativo de la tortilla durante el cocimiento; PT1= peso de la tortilla antes del cocimiento; PT2= peso de la tortilla después del cocimiento.

3.5.5 Rendimiento de masa (RM)

Este parámetro es el resultado de sumar el peso de la harina obtenida después del cocimiento óhmico mas el peso del agua necesaria para llevar la mencionada harina a un estado óptimo para la elaboración de tortillas. Se calculó con el valor obtenido en la capacidad de absorción de agua sumándole una unidad y se reportó como kg de masa/kg de harina.

$$RM = CAA + 1$$

Donde: RM = Rendimiento de masa; CAA = Capacidad de absorción de agua.

3.5.6 Rendimiento de tortilla (RT)

Es el peso de las tortillas obtenidas a partir de cierta cantidad de harina. Se calculó basándose en la siguiente fórmula:

$$RT = RM * \left(1 - \left(\frac{PP}{100}\right)\right)$$

Donde: RT= Rendimiento de tortilla; RM = Rendimiento de masa; PP = Pérdida de peso.

3.5.7 Tiempo de cocimiento y el tipo de endospermo (TC y TE)

La estimación del tiempo de cocimiento y el tipo de endospermo se hizo sobre la base del índice de flotación de acuerdo al Cuadro 2.3.

3.6. Características térmicas del grano de maíz

3.6.1. Temperaturas de gelatinización obtenidas a partir del cocimiento con el equipo óhmico

De cada una de las curvas del perfil térmico (Figura 3.4), se derivó la intensidad de corriente respecto a la temperatura, con el paquete computacional Origin 3.5, obteniendo la temperatura inicial gelatinización (primera intersección con el cero del eje Y) y la temperatura final de gelatinización (segunda intersección con el cero del eje Y) para cocer una cantidad de harina, para cada una de las muestras de las diferentes muestras de maíz.

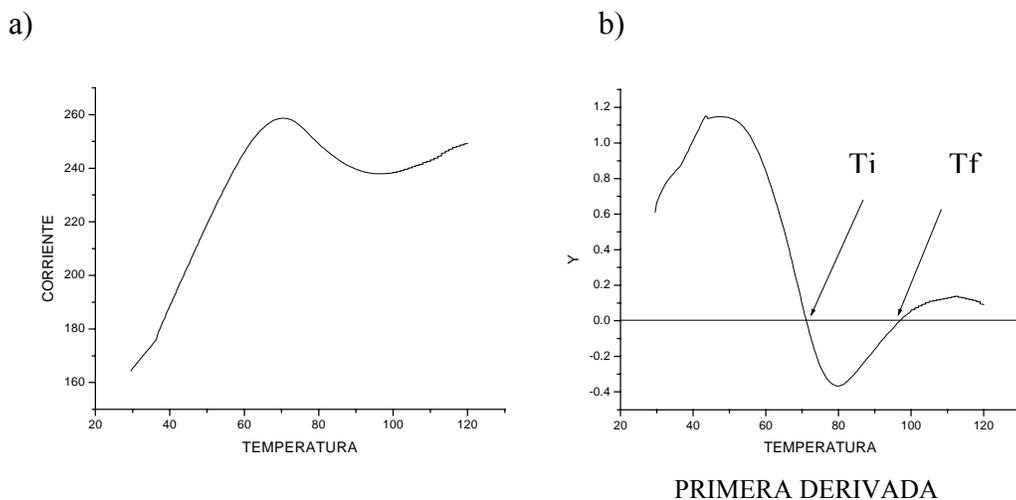


Figura 3.4. Perfil térmico del proceso de cocimiento (a) y (b) determinación de la primera derivada de la Corriente (R) respecto a la Temperatura, para obtener la temperatura inicial de gelatinización (T_i) y temperatura final de gelatinización (T_f).

3.7 Análisis de datos

La información de los atributos físicos y de calidad del grano obtenida en los dos grupos de materiales genéticos fue utilizada para el análisis e interpretación.

Se realizó un análisis de varianza simple con el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 1999) para comparar los dos grupos de materiales genéticos con respecto a los atributos obtenidos. Posteriormente se realizó el análisis de componentes principales (ACP) utilizando el procedimiento PROC PRIN de SAS (SAS,1999). El ACP genera un conjunto de nuevas variables (componentes principales) a partir de las variables originales (VO). Los nuevos componentes son combinaciones lineales donde intervienen las VO asociadas a un coeficiente que determina la contribución relativa y correlación con los nuevos componentes principales, indicados de la siguiente manera:

$$CP_i = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \dots + \lambda_n X_n$$

Con las matrices de datos en cada grupo de materiales genéticos (población y cruza simples) se realizó un análisis de correlación simple y correlación de orden, con el fin de analizar la asociación entre atributos, y para analizar la consistencia en el orden para clasificación en los atributos. Finalmente, estas matrices de datos fueron utilizados para obtener una figura “Biplot” (Yan y Kang, 2003), donde se analiza la interacción entre los materiales genéticos con los atributos en estudio por cada grupo de materiales genéticos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Comparación de los grupos de materiales genéticos

A partir de la información obtenida en los atributos físicos y de calidad de grano se realizó la comparación entre los dos grupos de materiales genéticos, las poblaciones y las cruza simples. Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) entre los dos grupos en los atributos contenido de humedad, peso de mil semillas, índice de flotación, dimensiones del grano (largo, ancho y espesor), el tiempo de cocción y en la temperatura final de gelatinización (Cuadro 4.1). En el resto de los atributos no se encontró diferencia significativa entre los dos grupos de materiales genéticos. De acuerdo a los resultados del Cuadro 4.1, los atributos con significancia estadística son los que determinan las diferencias entre las poblaciones y las cruza simples. Los valores que no muestran diferencia estadística tienen valores medios similares en los dos grupos de materiales genéticos. Las estadísticas descriptivas de cada uno de los atributos se presentan en los Cuadros A.3 y A.4 del apéndice. Los valores medios, la amplitud y la varianza de los atributos por grupos de germoplasma indican que aun cuando no existe diferencia entre grupos, dentro de grupos son importantes para diferenciar a los materiales genéticos, los cuales tienen un comportamiento que depende de la fuente de germoplasma.

Las poblaciones presentaron menores dimensiones de ancho y espesor del grano comparado con las cruza simples, lo cual se ve reflejado en un mayor peso hectolítrico pero un menor peso de mil semillas. Al ser granos más pequeños son menos los

espacios desocupados en un volumen determinado pero representan un peso menor por cada grano.

La fuente de germoplasma de cruza simples presentó los valores mas bajos de contenido de humedad, índice de flotación, longitud del grano, proporción de pericarpio y menor temperatura final de gelatinización. Siendo mayores el peso de mil semillas, ancho y espesor del grano, proporción de embrión y mayor tiempo de cocción en comparación a los registrados en la fuente de germoplasma correspondientes a las poblaciones (cuadro A.4.).

Cuadro 4.1. Cuadrados medios del análisis de varianza entre los tipos de germoplasma (Poblaciones y Cruzas simples) en los atributos físicos y de calidad de grano.

Atributos	Tipos	gle	Error	C. V. (%)	Media
Contenido de humedad (%)	55.387 **	149	0.212	5.9	7.8
Peso hectolítrico (Kg)	18.641	728	13.529	5.0	74.3
Peso de mil semillas (g)	14586.454 **	466	1461.195	17.6	217.6
Índice de flotación (%)	18734.518 **	308	615.754	38.9	63.8
Tiempo de cocción (min)	676.487 **	308	29.821	17.0	32.2
Largo de grano (mm)	28.163 **	324	1.039	10.0	10.2
Ancho de grano (mm)	17.269 **	324	0.402	7.8	8.1
Espesor de grano (mm)	7.295 **	324	0.227	10.0	4.8
Proporción de Pericarpio (%)	10.890	153	3.219	14.9	12.0
Proporción de Endospermo (%)	0.174	153	12.759	4.9	72.2
Proporción de Embrión (%)	13.816	153	9.652	19.7	15.8
Capacidad de absorción de agua	0.008	147	0.010	7.7	1.3
Rendimiento de masa	0.008	147	0.010	4.3	2.3
Rendimiento de tortilla	0.007	146	0.014	7.8	1.5
Temperatura inicial de gelatinización (° C)	0.691	294	5.269	3.2	71.6
Temperatura final de gelatinización (° C)	196.390 **	294	17.570	4.4	95.4

** Significancia al 0.01 nivel de probabilidad.

El coeficiente de variación en el índice de flotación de las cruzas es notoriamente alto debido a que los valores de esta variable van desde el 4 % como mínimo hasta el 100 % como máximo. Los valores de esta variable en las poblaciones estudiadas van desde el 44 % como mínimo hasta un 98 % como máximo lo cual se traduce en un coeficiente de variación de 18 %. Por lo tanto, la clasificación del tipo de endospermo, estimado de acuerdo al índice de flotación según la Norma Oficial Mexicana (Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002), alcanza valores de 1 a 5 (muy duros a muy suaves) en las cruzas simples y de 3 a 5 (intermedios a muy suaves) en las poblaciones (Cuadro A.1 y A.2 del apéndice). La distribución de los valores medios del índice de flotación en relación con la media influye en los valores altos del coeficiente de variación. El resto de los valores calculados del coeficiente de variación se encuentra entre los valores aceptables en el análisis de datos.

4.2 Análisis de agrupamiento de los materiales genéticos

En el análisis de agrupamiento por medio de los componentes principales se utilizaron 12 atributos en función de su importancia relativa en los tres primeros componentes principales (Cuadro 4.2). En éste cuadro se presentan los vectores característicos y la proporción de la varianza explicada por cada componente. Los coeficientes de cada componente son proporcionales al coeficiente de correlación entre las variables originales y las variables nuevas (componentes principales).

El análisis de dispersión de los materiales genéticos (cruzas simples y poblaciones) con base en los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) se presenta en la Figura 4.1. Los dos componentes explican el 42 % de la varianza de la información contenida en los 12 atributos originales correspondientes a los dos grupos (poblaciones y cruzas simples).

Cuadro 4.2. Vectores característicos y proporción de la varianza explicada por los dos primeros componentes en el análisis entre los tipos de germoplasma (Poblaciones y Cruzas simples).

Atributos	CP1	CP2	CP3
Contenido de humedad (%)	-0.132	0.177	-0.459 *
Peso hectolítrico (kg)	0.425 *	0.106	0.113
Peso de mil semillas (g)	0.067	-0.430 *	0.241
Índice de flotación (%)	-0.499 *	-0.102	-0.207
Pericarpio (%)	-0.245	0.243	-0.006
Endospermo (%)	0.377 *	-0.160	-0.409 *
Embrión (%)	-0.295 *	0.051	0.466 *
Rendimiento de masa	-0.072	0.324 *	0.330
Rendimiento de tortilla	-0.005	0.409 *	0.171
Temperatura inicial de gelatinización (° C)	0.118	0.562 *	-0.076
Temperatura final de gelatinización (° C)	-0.022	0.270	-0.337 *
Tiempo de cocción (min.)	0.489 *	0.115	0.181
Proporción de varianza explicada (%)	0.275	0.153	0.135

* Atributos que determinan las características de cada componente principal.

Con propósitos de interpretación se consideran los valores de los coeficientes mas altos del Cuadro 4.2 en relación a los primeros componentes, los cuales ayudan a describir las características de los dos grupos en la Figura 4.1. En principio, las poblaciones se encuentran concentradas en un sector de la Figura 4.1, en tanto que las cruza simples se encuentran localizadas de manera muy amplia y dispersa en el mismo grafico. Es decir, en promedio, las poblaciones cuentan con menor tiempo de cocción y valores mayores de índice de flotación, comparado con las cruza simples donde la variación entre estas características es muy amplia.

Con respecto al segundo componente (CP2) las poblaciones muestran valores mayores a la media en las variables las temperatura inicial de gelatinización, rendimiento de masa y rendimiento de tortilla, en tanto que cuentan con valores inferiores en el peso de mil semillas. Es importante resaltar que la interpretación de la Figura 4.1 se basa en el 42 % de la variación total explicada por los 12 atributos y los valores promedio coinciden con los valores de los Cuadros A3 y A4 del apéndice.

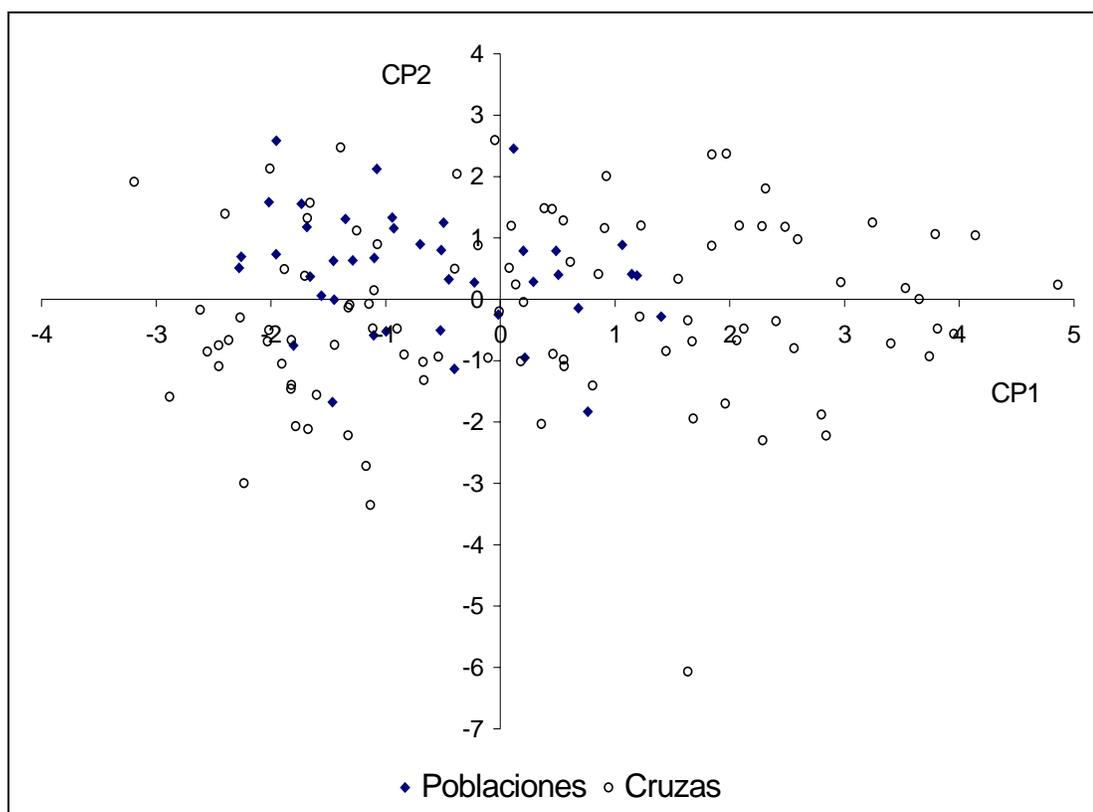


Figura 4.1. Dispersión de los materiales genéticos con base en los dos primeros componentes principales. CP1: Peso hectolítrico (+), Tiempo de cocción (+), índice de flotación (-); CP2: Rendimiento de masa y tortilla (+), Temperatura inicial de gelatinización (+), Peso de mil semillas (-).

El análisis de dispersión de la Figura 4.1 permite corroborar la diferencia entre los dos grupos de materiales genéticos (Cuadro 4.1) los cuales tienen una asociación diferente con respecto a los atributos físicos y de calidad del grano.

4.3 Análisis de correlación

Las interrelaciones entre los atributos físicos y de calidad de grano correspondientes a los dos grupos de materiales genéticos se presentan en los Cuadros 4.3 y 4.4 para las poblaciones y las cruza simples de maíz, respectivamente. En ambos cuadros se incluye la correlación simple de Pearson (arriba de la diagonal) y la correlación de orden Spearman (debajo de la diagonal).

Un análisis exploratorio de las dos matrices de correlación indica una inconsistencia en los resultados de pares de asociación entre los atributos, lo que hace suponer que las interrelaciones están determinadas en parte por el tipo de materiales genéticos que se este analizando.

Con excepción del contenido de humedad que varía entre los dos grupos de materiales, los atributos físicos (peso hectolítrico, peso de mil semillas e índice de flotación), y los componentes del grano (proporción de pericarpio, endospermo y embrión), el rendimiento de masa y de tortilla, los resultados son consistentes en los niveles de asociación directa y correlación de orden. Los coeficientes de correlación simple indican el nivel de asociación entre los atributos, en tanto que la correlación de orden indica el grado de consistencia en la ordenación de los materiales genéticos expuestos a las diferentes determinaciones de calidad.

Por otro lado, las asociaciones dentro de las dimensiones del grano (longitud, ancho y espesor), las temperaturas inicial y final de gelatinización y el tiempo de cocimiento mostraron un comportamiento totalmente diferente entre los dos grupos de materiales genéticos, lo que repercute entre las asociaciones con otros atributos.

En términos generales, el peso hectolítrico presentó correlación significativa ($p \leq 0.01$) con el índice de flotación en las poblaciones ($r=-0.591$) y ($r= - 0.838$) en las cruza simples (Cuadros 4.3 y 4.4) sin embargo no hubo correlación significativa con

las dimensiones del grano, lo cual demuestra que el peso hectolítrico no esta en función del tamaño de los granos de la muestra, pero si con la densidad (peso / volumen) de los granos.

Bajo condiciones estándar, a mayor índice de flotación menor es el tiempo de cocimiento con una correlación de -0.894 y -0.97 para las poblaciones y cruza simples, respectivamente. Los maíces suaves son menos densos debido a que tienen una mayor área porosa en comparación a los maíces de endospermo duro (Watson y Ramstand, 1987). La dureza es un indicador de la composición del endospermo y es establecido por la densidad del grano y el índice de flotación, como se mencionó anteriormente de la dureza de un grano depende el tiempo de cocimiento.

En el caso de las cruza simples, la temperatura inicial de gelatinización presentó correlación significativa ($p \leq 0.01$) con las variables peso de mil semillas, índice de flotación y tiempo de cocimiento ($r = -0.357, -0.342$ y 0.350 , respectivamente) y también presentó correlación significativa ($p \leq 0.05$) con el peso hectolítrico ($r = 0.234$) y con el rendimiento de masa ($r = 0.236$), los gránulos de almidón dependiendo de su origen pueden variar en su tamaño, su composición y el grado de cristalinidad, lo que provoca que unos sean mas resistentes que otros a los factores gelatinizantes del medio. Los granos con endospermo duro expresan una alta temperatura de gelatinización y requieren de un largo tiempo de cocción. Estos resultados coinciden con el coeficiente de correlación de orden, lo que muestra consistencia en el ordenamiento de los materiales genéticos en estos atributos. Estas condiciones no se presentaron en el grupo de las poblaciones estudiadas, pues en estas, la temperatura inicial de gelatinización solo presentó correlación significativa ($p \leq 0.05$) con la variable índice de flotación ($r = 0.345$), lo cual habla de las diferencias entre las dos fuentes de germoplasma.

La variable de rendimiento de masa depende de manera directa de la capacidad de absorción de agua, esta variable a su vez está relacionada con la dureza del

endospermo, pues en el endospermo duro los gránulos de almidón se agrupan en una red proteínica que restringe la absorción de agua (Salinas *et al.*, 1992), estas condiciones no se presentaron en las poblaciones estudiadas, pues no se encontró correlación significativa entre el rendimiento de masa con el índice de flotación y tampoco con el tiempo de cocimiento que son las variables indicadoras de la dureza del grano y a su vez el rendimiento de masa es indicador de la capacidad de absorción de agua.

Los maíces con alta capacidad de absorción de agua muestran un alto rendimiento de masa; sin embargo para obtener un alto rendimiento de tortilla, es necesario que el agua absorbida sea retenida durante la cocción y que haya una baja pérdida de peso (Mauricio *et al.*, 2004), en ambas fuentes de gemoplasma el rendimiento de tortillas estuvo correlacionado significativamente ($p \leq 0.01$) al rendimiento de masa.

En el análisis de correlación simple y de orden de los dos grupos de datos destaca la asociación entre el peso hectolítrico con el índice de flotación, la temperatura inicial de gelatinización y el tiempo de cocimiento, como relaciones directas tanto en la asociación simple como en el ordenamiento de los materiales genéticos. Por lo tanto, estos caracteres son consistentes entre los dos grupos de materiales genéticos.

Cuadro 4.3. Coeficientes de correlación simple (arriba de la diagonal) y de orden (debajo de la diagonal) de los atributos estudiados en el grupo de poblaciones de maíz.

	HUM	PH	PMILS	IF	L	A	E	PER	END	EMB	RM	RT	Ti	Tf	TC
HUM		-0.013	-0.072	-0.071	0.042	-0.015	-0.143	-0.263	-0.038	0.267	-0.210	-0.328 *	0.091	0.020	0.043
PH	0.019		0.292	-0.591 **	-0.235	0.213	-0.076	-0.299 *	0.571 **	-0.410 **	0.124	0.271	-0.279	-0.045	0.485 **
PMILS	-0.091	0.237		-0.098	0.085	0.566 **	0.333 *	-0.420 **	0.203	0.117	-0.007	0.123	-0.081	0.087	0.136
IF	-0.017	-0.572 **	-0.055		0.290	-0.282	0.382 *	0.110	-0.357 *	0.326 *	-0.210	-0.177	0.345 *	0.246	-0.894 **
L	0.077	-0.232	0.070	0.260		-0.416 **	-0.240	-0.338 *	0.080	0.192	-0.107	0.079	-0.141	-0.100	-0.319 *
A	0.003	0.191	0.502 **	-0.219	-0.404 **		0.174	0.031	0.035	-0.067	0.069	-0.074	-0.054	0.206	0.242
E	-0.148	-0.037	0.359 **	0.419 **	-0.121	0.160		0.050	-0.084	0.056	0.154	0.127	0.314 *	0.056	-0.257
PER	-0.280	-0.301 *	-0.397 **	0.156	-0.316 *	0.052	0.057		-0.549 **	-0.200	0.284	-0.050	0.188	0.029	-0.069
END	-0.060	0.508 **	0.177	-0.322 *	0.078	-0.015	-0.081	-0.565 **		-0.709 **	0.030	0.110	-0.093	-0.002	0.309 *
EMB	0.295 *	-0.412 **	0.110	0.307 *	0.238	-0.058	0.042	-0.141	-0.713 **		-0.275	-0.084	-0.050	-0.022	-0.304 *
RM	-0.163	0.223	0.004	-0.259	-0.082	0.089	0.068	0.127	0.171	-0.356 *		0.451 **	-0.106	0.113	0.223
RT	-0.286	0.270	0.062	-0.192	0.109	-0.117	0.096	-0.049	0.168	-0.153	0.472 **		-0.136	-0.155	0.113
TO	0.101	-0.296 *	0.018	0.345 *	-0.072	-0.027	0.304 *	0.171	-0.148	0.086	-0.108	-0.014		0.224	-0.194
TF	-0.024	-0.087	0.110	0.077	-0.235	0.308 *	0.008	0.034	-0.043	-0.011	0.123	-0.268	0.047		-0.117
TC	-0.003	0.479 **	0.092	-0.897 **	-0.318 *	0.223	-0.289	-0.140	0.302 *	-0.314 *	0.262	0.128	-0.189	0.006	

HUM= humedad del grano de maíz, PH=peso hectolítrico, PMILS=peso de mil semillas, IF=índice de flotación, L=largo del grano, A=ancho del grano, E=espesor del grano, PER=porcentaje del pericarpio, END=porcentaje de endospermo, EMB=porcentaje de embrión, RM=rendimiento de masa, RT=rendimiento de tortilla, TO=temperatura inicial de gelatinización, TF=temperatura final del gelatinización, TC=tiempo de cocimiento.

Cuadro 4.4. Coeficientes de correlación simple (arriba de la diagonal) y de orden (debajo de la diagonal) de los atributos estudiados en el grupo de las cruza simples de maíz.

	HUM	PH	PMILS	IF	L	A	E	PER	END	EMB	RM	RT	TO	TF	TC
HUM		-0.142	-0.274 **	0.091	-0.270 **	-0.074	-0.126	0.047	-0.018	-0.003	-0.030	0.056	0.070	0.032	-0.066
PH	-0.039		0.104	-0.838 **	0.136	-0.207 *	-0.185	-0.294 **	0.217 *	-0.105	-0.163	-0.006	0.234 *	0.047	0.776 **
PMILS	-0.318 **	0.071		-0.021	0.709 **	0.409 **	0.564 **	-0.159	0.110	-0.044	0.018	-0.164	-0.357 **	-0.161	0.016
IF	0.060	-0.861 **	-0.015		-0.029	0.137	0.304 **	0.327 **	-0.345 **	0.227 *	0.126	0.049	-0.342 **	-0.041	-0.970 **
L	-0.262 **	0.062	0.715 **	-0.006		0.033	0.172	-0.190 *	-0.002	0.100	0.128	-0.054	-0.214 *	-0.106	0.030
A	-0.102	-0.140	0.336 **	0.117	0.012		0.462 **	-0.031	0.320 **	-0.351 **	0.006	-0.032	-0.081	0.068	-0.141
E	-0.136	-0.175	0.543 **	0.248 **	0.169	0.399 **		0.047	0.089	-0.126	0.013	-0.108	-0.398 **	-0.054	-0.304 **
PER	0.049	-0.253 **	-0.120	0.333 **	-0.176	-0.002	0.085		-0.490 **	0.042	0.064	0.113	-0.020	0.021	-0.322 **
END	-0.023	0.208 *	0.070	-0.308 **	-0.078	0.361 **	0.120	-0.461 **		-0.892 **	-0.137	-0.056	0.068	0.039	0.360 **
EMB	-0.003	-0.125	-0.014	0.188 *	0.153	-0.376 **	-0.178	0.049	-0.871 **		0.120	0.003	-0.069	-0.054	-0.246 **
RM	-0.028	-0.162	0.008	0.159	0.083	0.002	-0.029	0.050	-0.118	0.061		0.433 **	0.236 *	-0.175	-0.118
RT	0.023	0.079	-0.141	0.026	-0.063	-0.013	-0.109	0.055	-0.059	-0.012	0.405 **		0.379 **	-0.027	-0.071
TO	-0.002	0.323 **	-0.296 **	-0.382 **	-0.239 *	0.028	-0.323 **	-0.047	0.083	-0.080	0.184	0.394 **		0.361 **	0.350 **
TF	0.048	0.043	-0.158	-0.024	-0.116	0.138	0.008	0.080	0.096	-0.084	-0.192 *	-0.008	0.316 **		0.043
TC	-0.041	0.815 **	0.020	-0.972 **	0.013	-0.116	-0.238 *	-0.317 **	0.332 **	-0.215 *	-0.134	-0.037	0.394 **	0.015	

HUM= humedad del grano de maíz, PH=peso hectolítrico, PMILS=peso de mil semillas, IF=índice de flotación, L=largo del grano, A=ancho del grano, E=espesor del grano, PER=porcentaje del pericarpio, END=porcentaje de endospermo, EMB=porcentaje de embrión, RM=rendimiento de masa, RT=rendimiento de tortilla, TO=temperatura inicial de gelatinización, TF=temperatura final del gelatinización, TC=tiempo de cocimiento.

4.4 Análisis gráfico de las interrelaciones entre atributos por materiales genéticos

La interacción entre los atributos estudiados con los materiales genéticos se presenta en la Figura 4.2 (A = poblaciones y B = cruzas simples). Con propósitos de interpretación de los datos, se incluye en la Figura los materiales genéticos indicados por el tipo de endospermo. Esta clasificación permite verificar la asociación de los materiales genéticos con el patrón asociado al índice de flotación (IF) y el tiempo de cocimiento (TC), donde el TC fue estimado a partir del índice de flotación, y por lo tanto mantienen una relación inversa.

En ambos casos, los materiales genéticos están ordenados en relación con el índice de flotación y la distancia de los vectores a partir del origen indica la varianza de los atributos. Entre mayor sea el vector, mayor es la capacidad de discriminación de los materiales genéticos. Así mismo, el ángulo que se forma entre los vectores indica el nivel de asociación entre los mismos. Por ejemplo, el índice de flotación y el tiempo de cocimiento están asociados negativamente, en tanto que un ángulo de 90 indica la ausencia de correlación como entre el índice de flotación y el peso de mil semillas (Cuadros 4.3 y 4.4). Es importante resaltar que las proyecciones de los atributos en la Figura 4.2 (A y B), es una representación gráfica de la información de las matrices de correlación (4.3 y 4.4) explicados por los dos primeros componentes en 38.5 y 40.6 % para las poblaciones y cruzas simples, respectivamente.

La dureza del maíz y por consecuencia el tiempo de cocimiento esta inversamente relacionada con el índice de flotación, esto se debe al tipo de almidón en el grano de maíz. Los granos duros presentan un endospermo que es de naturaleza cornea es decir, más densos, y los maíces suaves presentan un endospermo harinoso; en los primeros predominan las moléculas de amilopectina y en los suaves las de amilosa (Boyer y Shannon, 1987).

Los granos de maíz con mayor dureza presentan una combinación en el tamaño de gránulos de almidón tanto pequeños (10 micras) y gránulos mayores (11 micras), por el contrario en los maíces suaves solamente predomina un tamaño de gránulo de almidón (grande la mayor parte de las veces), lo anterior hace que los gránulos de almidón en maíces duros puedan tener una mayor compactación, por lo tanto, se espera que muestren una densidad alta y un índice de flotación bajo y un valor alto de dureza o tipo duro o muy duro de endospermo (Gaytán, 2004).

De acuerdo a las proyecciones de la Figura 4.2, los atributos que son consistentes para la discriminación en los dos grupos de materiales genéticos son el índice de flotación, en asociación negativa con el tiempo de cocimiento y el peso hectolítrico, y los componentes del grano (endospermo, pericarpio y embrión). El tiempo de cocimiento tiene una relación inversa al índice de flotación dado que éste fue estimado a partir del índice de flotación. También es importante la temperatura inicial de gelatinización con una correlación significativa ($p \leq 0.01$) con el índice de flotación $r = -0.342$ en las cruza simples, en tanto que en las poblaciones, la correlación es positiva con valor de $r = 0.345$ ($p \leq 0.05$).

El tipo de endospermo estimado por el índice de flotación varió de intermedio a muy suave en el caso de poblaciones y toda la variación (muy duro a muy suave) en el caso de las cruza (Fig. 4.2). Aunque pudiera deberse a un tamaño de muestra, la inconsistencia entre la temperatura de gelatinización y el índice de flotación en los dos grupos de materiales, la dispersión de los datos (Cuadro A.3 y A.4) y la Figura 4.2 (A y B) sugieren que la temperatura de gelatinización no depende directamente del índice de flotación ya que esta directamente asociada a las propiedades de los almidones.

La aglomeración de las poblaciones en un sector de la Figura 4.1 indica que la mayoría de las poblaciones son de mayor índice de flotación por lo tanto el tipo de endospermo de estas muestras va de intermedio a muy suave y presentan una temperatura de gelatinización mayor, lo anterior coincide con lo encontrado por Gaytán

(2004) quien concluyó que en general los maíces suaves presentan una temperatura inicial de gelatinización más alta que los maíces duros.

La misma situación ocurre al analizar la asociación ente la temperatura de gelatinización y el tiempo de cocimiento, este último calculado a partir del índice de flotación. Sin embargo, aun cuando la amplitud de los valores de la temperatura de gelatinización varía de $66.01 \leq 71.69 \leq 79.06$ en las poblaciones y de $62.75 \leq 71.58 \leq 79.42$ en las cruas simples (Cuadro A4), la interpretación de la Figura 4.2, sugiere que la temperatura inicial de gelatinización es un atributo importante para la discriminación de materiales genéticos.

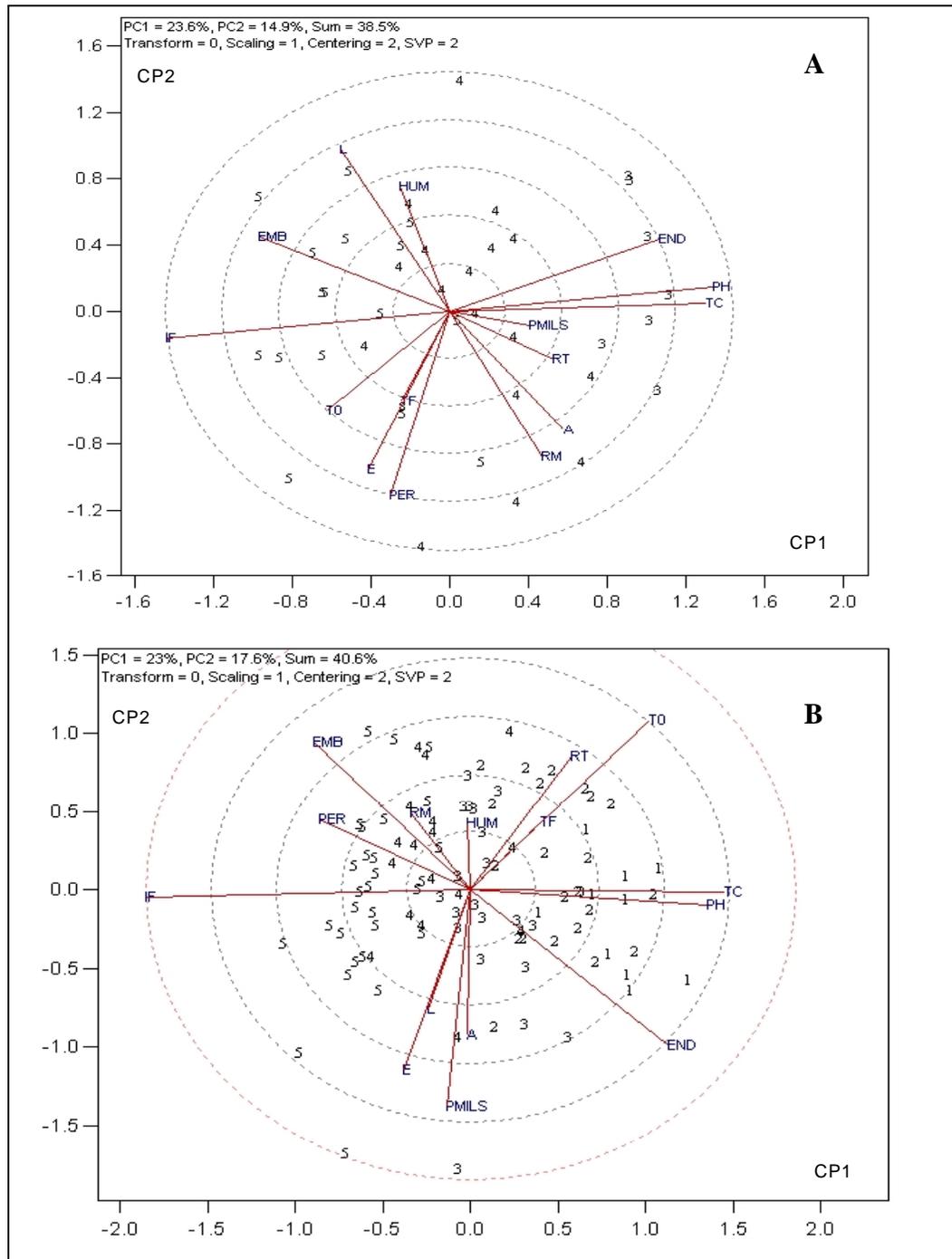


Figura 4.2. Interrelaciones entre los atributos por materiales genéticos: A) Poblaciones, B) Cruzas simples; Tipo de endospermo de materiales, 1) Muy duros, 2) Duros, 3) Intermedios, 4) Suaves, y 5) Muy suaves.

V. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y los atributos de calidad de grano permitieron diferenciar a los dos grupos de materiales genéticos.

Los atributos que contribuyeron consistentemente a la discriminación de materiales genéticos son el índice de flotación, el peso hectolítrico, el tiempo de cocimiento, la temperatura inicial de gelatinización y los componentes del grano (embrión, pericarpio y endospermo).

La asociación entre los atributos físicos y de calidad de grano dependen en parte de la interacción con el tipo de materiales genéticos.

La calidad del grano de maíz indicada por el rendimiento de masa y tortilla y la temperatura de gelatinización depende del tipo y componentes de la semilla.

VI. LITERATURA CITADA

Almeida, H.D. y L.W. Rooney. 1996. Avances en la manufactura y calidad de productos de maíz nixtamalizado. *Industria Alimentaria* 18(6):4-12.

Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano –Cereales- Parte I. Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado – especificaciones y métodos de prueba-. Diario Oficial de la Federación, 22 de Mayo de 2002.

Asp, N. G., J. M. M. Van Amelsvoort, and J. G. A. J. Hautvast. 1996. Nutritional implications of resistant starch. *Nutr. Res. Rev.* 9: 1-31.

Biliaderis, C. G. 1991. The structure and interactions of starch with food constituents. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 69: 60-78.

Bracamontes O., L.E., G.A. Herrera. y F. Canónico, 2005. Medición alternativa de la energía de activación de la gelatinización del almidón. Memorias de los Programas: Séptimo Verano de la Ciencia de la Región Centro y Cuarto Verano de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Querétaro. México.

Bressani, R., and N.S. Scrimshaw. 1958. Effect of lime treatment on *in vitro* availability of essential amino acids and solubility of protein fractions in corn. *J. Agric. Food Chem.* 6(10):774-778.

- Bryant C.M. and Hamaker B.R. Effects of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chem.* 1997, 74(2):171-175.
- Boyer, Ch. D. and J.C. Shannon. 1987. Carbohydrates of the kernel. In: *Corn chemistry and technology*. P.E. ed. Am Assoc. Cereal Chem. St. Paul, Mn. USA, p.235-272.
- Campbells, M. R., L. M. Pollak and P. J. White. 1995. Genetic variation for starch thermal and functional properties among nonmutant maize inbred. *Cereal Chem.* 72: 281-286.
- Chang, S.M., and L.C. Liu. 1991. Retrogradation of rice starches studied by differential scanning calorimetry and influence of sugars, NaCl and lipids. *J. Food Sci.* 56: 564-570.
- Dorf, C.R. 1995. *Circuitos eléctricos: Introducción y diseño*. Segunda edición. Alfaomega, Grupo editor. México, D.F. 998 p.
- Duffus C. y C. Slaughter. 1980. *Las semillas y sus usos*. AGT. Editores. México. 114 p.
- Earle F.R., J. J. Curtis and J.E. Hubbard. 1946. Composition of the component parts of the corn kernel. *Cereal Chem.* 23: 504-511.
- Englyst, H. N., S. M. Kingman, and J. H. Cummings. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European J. Clin. Nutr.* 46 (Suppl. 2) S33-S50.
- Figuroa C.J.D., M.G. Acero-Godinez, N.L. Vasco-Méndez, A. Lozano-Guzmán, L.M. Flores-Acosta, J González-Hernández. 2001. Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición.* 51(3):293:302.

- Freeman, J.E. 1973. Quality factors affecting value of corn for wet milling. Trans. ASAE 16:671.
- Gaytán M., M. 2004. Evaluación y validación de métodos para la clasificación de calidad alimentaria en maíces criollos. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México. 144 p.
- González-Hernández J., J.D.C. Figueroa, M.L. Martínez, H. Vargas and F. Sánchez-Sinecio 1995. Technological modernization of alkaline cooking process for the production of masa and tortilla (World Scientific, Singapore And London Publishing Co.) pp. 162-178.
- Gordon, T.D. 1989. Functional properties vs physiological action of total dietary fiber. Cereal Foods World. 34(7): 517-525.
- Griffith, Ch. L. 1985. Specific heat, thermal conductivity, density, and thermal diffusivity of mexican tortillas dough. Journal of Food Science. 50: 1333-1341.
- Helm J.L. and M.S. Zuber. 1992. Inheritance of pericarp thickness in corn belt maize. Crop Science 12:428-430.
- Hernández X., E. 1972. Consumo humano de maíz y el aprovechamiento de tipos con alto valor nutritivo. *In*: Simposio sobre Desarrollo y Utilización de Maíces de alto Valor Nutritivo. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. pp: 149-156.

- Hernández Z., R. 2004. Caracterización de 43 colectas de maíz del sureste de Coahuila con base en atributos de calidad del grano. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 66 p.
- Inglett, E.G. 1979. Kernel structure, composition and quality. In corn: culture, processing products. Published By The AVI Publishing Company Inc., USA.
- Karaptansions, T. D., E. P. Sakonidou, and S. N. Raphaelides, 2000. Electrical conductance study of fluid motion and heat transport during starch gelatinization. J. Food Sci. 65(1):144-150.
- Lehninger, L.A. 1972. Bioquímica. Las bases moleculares de la estructura y función celular. Ediciones Omega. Barcelona España. 1093 p.
- Lineback, D.R. and V.F. Rasper. 1988. Wheat carbohydrates. In wheat: chemistry and technology. Pomeranz Association of Cereal Chemistry, Inc St. Paul Minnesota. pp. 277-372.
- Martínez H., L.M. y P.A. Lachance. 1979. Corn (*Zea mays* L.) kernel hardness as an index of the alkaline cooking time for tortilla preparation. Journal Food Science. 44:377.
- Matus N.L., E.J. Redondo. 1997. Evaluación de los métodos que permiten el control de calidad en harina, masa y tortilla de maíz en un proceso industrial. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora . Hermosillo, Sonora, México. 87 p.
- Mauricio S., R.A., 2001. Caracterización fisicoquímica, térmica y eléctrica de razas mexicanas de maíz y evaluación de sus posibles usos en la industria alimentaria. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de los alimentos. Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Querétaro, México. 142 p.

- Mauricio S., R.A., J.D. Figueroa C., S. Taba, M. Reyes-Vega, F. Rincón S., G.A. Mendoza. 2004. Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 27(3):213-222.
- Mazurs, E.G., T.J. Schoch, and F.E Kite. 1957. Graphical analysis of the brabender viscosity curves of various starches. *Cereal Chem.* 34:141.
- Morales S.E., C. Gómez A., H.E. Martínez F., J. González-Hernández, Y. Voribiev, G. Martínez-Montes and J.L. Martínez. 1997. Determination of the temperature of gelatinization and energy of transformation of starch by dielectric dissipation induced changes. *Starch/Starke No. 7/8(49):268-272.*
- Moreno, M. E. 1996. Análisis físicos y biológicos de semillas agrícolas. UNAM. Distrito Federal, México. 313 p.
- Parrot, D.L. 1992. Use of ohmic heating for aseptic processing of food particulates. *Food Technnology.* 46(12),68-72.
- Pomeranz, Y., G.E. Hall, Z. Czuchajowska, C.R. Martín, and F.S. Lai, 1986. Test weight hardness, and breakage susceptibility of yellow dent corn hybrids. *Cereal Chem.* 63:349.
- Ruan R., J.B. Litchfield and S.R. Eckhoff. 1992. Simultaneous and non-destructive measurement of transient moisture profiles and structural changes in corn kernels during steeping using microscopic nuclear magnetic resonance imaging. *Cereal Chem.* 69: 600-606.
- SAGARPA. 2005. http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comrecre.html. Siembras y cosechas del año agrícola del 2004.

- Salinas, M., Y., F. Martinez, B. y H.J. Gómez 1992. Comparación de métodos para medir la dureza del maíz (*Zea mays* L.). Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 42(1):59-63.
- Salinas M.Y. y P. Pérez H. 1997. Calidad nixtamalera-tortillera en maíces comerciales de México. Rev. Fitotec. Mex. 20: 121-136.
- SAS 1999. SAS OnlineDoc®, Version 8, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Serna, S.S.O., M.H. Gomez, and L. W. Rooney 1994. Food uses of regular and specialty corns and their dry-milled fractions. In Specialty Corns. Chapter 9. Arnel R. Hallauer Ed. Pp. 275-297.
- Skrabanja, V., H. G. M. Liljerberg, C. L. Hedley, I. Kreft, and I. M. E. Björck. 1999. Influence of genotype and processing on the *in vitro* rate of starch hydrolysis and resistant starch formation in peas (*Pisum sativum* L). J. Agric. Food Chem. 47: 2033-2039.
- Tester, RF, and Morrison WR.. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amilose, and lipids. Cereal Chem. 1990, 67:551-557.
- Vázquez C.M.G., L.B. Guzmán, J.L.G. Andrés, F.Márquez-Sánchez, M.J. Castillo. 2003. Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocuzas. Rev. Fitotec. Mex. 26 (4): 231-238.
- Warman, A. 1982. El cultivo del maíz en México: Diversidad, Limitaciones y Alternativas. Centro de Ecodesarrollo. México, D.F. 132 p.

Watson, A.S and E.P. Ramstad. 1987. Corn: Chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists. Inc: St. Paul Minnesota. 605 pp.

Yan W, and M.S. Kang. 2003. GGE Biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press LLC, New York. 271 p.

Zobel, F.H. 1984. Starch gelatinization and mechanical properties. Chemistry and Technology. 2nd. Ed. Whistler, R.L. Miller, J.C. and Paschal, E.F. (Eds). USA. 307 p.

VII. APÉNDICE

Cuadro A. 1. Descripción de 43 poblaciones de maíz con base en atributos físicos y de calidad de grano.

POBLACIÓN	TE	HUM	PH	PMILS	IF	L	A	E	PER	END	EMB	CAA	RM	RT	PP	T0	TF	TC
C-001	3	8.7	75.7	235.3	60	11.70	8.02	4.03	9.83	75.93	14.24	1.28	2.28	1.73	24.28	71.76	95.06	35
C-005	3	8.7	76.3	223.7	49	10.38	8.16	4.31	11.18	73.03	15.79	1.19	2.19	1.46	33.20	68.92	82.47	35
C-015	3	8.6	76.1	234.2	57	10.42	8.28	4.48	11.08	76.70	12.22	1.32	2.32	1.56	33.08	71.73	90.21	35
C-017	3	8.9	76.2	186.5	50	9.40	8.21	4.25	12.36	73.03	14.61	1.39	2.39	1.61	32.40	70.55	88.66	35
C-019	3	8.3	77.2	239.3	54	10.22	8.47	4.57	12.13	74.26	13.61	1.34	2.34	1.59	31.95	72.36	100.07	35
C-021	3	9.4	77.4	201.5	49	10.30	8.32	4.36	10.65	75.16	14.19	1.28	2.28	1.50	34.48	70.73	99.32	35
C-031	3	8.5	74.5	211.8	60	10.27	8.65	4.17	13.46	75.54	11.01	1.31	2.31	1.26	45.45	71.01	102.35	35
C-002	4	8.9	74.6	223.7	69	10.91	7.80	4.47	10.65	73.23	16.13	1.28	2.28	1.63	28.35	71.27	96.27	30
C-004	4	9.0	76.8	211.1	77	10.81	7.82	4.79	9.00	74.74	16.26	1.25	2.25	1.41	37.15	70.36	95.37	30
C-008	4	9.5	76.4	199.5	69	10.76	6.69	4.11	9.82	73.09	17.09	1.10	2.10	1.52	27.32	71.27	96.81	30
C-009	4	8.3	72.5	197.6	71	11.14	6.97	4.44	13.62	69.53	16.85	1.24	2.24	1.48	33.69	67.28	81.01	30
C-016	4	8.8	75.0	192.6	69	9.57	8.20	5.11	13.49	74.67	11.84	1.41	2.41	1.61	33.08	76.61	93.12	30
C-018	4	8.3	73.0	219.4	79	9.50	7.96	5.20	14.93	69.10	15.97	1.45	2.45	1.62	33.66	71.27	97.54	30
C-025	4	9.2	72.5	208.7	79	10.06	8.63	4.25	13.52	68.85	17.62	1.24	2.24	1.44	35.62	73.18	102.31	30
C-028	4	8.6	74.7	197.5	79	10.03	7.54	4.43	12.80	73.01	14.19	1.17	2.17	1.33	38.73	70.72	100.04	30
C-030	4	9.1	73.1	209.0	67	11.08	8.74	4.06	13.98	68.63	17.39	1.18	2.18	1.47	32.51	71.78	99.06	30
C-032	4	9.1	75.4	207.3	76	10.44	7.60	4.61	11.41	72.82	15.77	1.33	2.33	1.63	30.01	71.81	100.62	30
C-033	4	7.7	75.4	240.4	76	11.20	8.13	4.59	11.86	71.43	16.71	1.44	2.44	1.75	28.47	69.82	100.26	30
C-034	4	8.8	75.6	207.5	67	11.63	6.81	4.25	12.67	68.33	19.00	1.45	2.45	1.57	35.98	70.80	96.78	30
C-035	4	8.0	73.7	173.7	74	10.88	6.82	4.17	12.90	73.39	13.71	1.26	2.26	1.67	26.02	70.18	97.00	30
C-036	4	8.6	74.5	178.7	74	11.03	6.68	4.27	10.89	75.98	13.13	1.43	2.43	.	.	69.90	100.58	30
C-040	4	8.7	75.8	199.6	71	10.50	8.12	4.44	13.84	72.96	13.21	1.32	2.32	1.42	38.59	70.36	98.27	30
C-041	4	8.2	76.7	234.7	72	10.59	8.23	4.73	12.46	75.65	11.88	1.26	2.26	1.70	24.79	71.38	97.03	30
C-042	4	8.9	75.0	192.5	61	10.05	8.42	4.31	17.33	69.60	13.07	1.52	2.52	1.61	36.16	68.77	98.48	35
C-043	4	8.5	75.2	200.3	79	11.54	7.33	4.38	11.58	76.53	11.90	1.28	2.28	1.59	30.01	71.27	96.81	30
C-003	5	8.9	74.8	244.2	87	10.43	7.86	4.70	9.12	70.24	20.64	1.23	2.23	1.57	29.53	71.27	94.64	30

C-006	5	9.4	71.7	209.8	85	11.04	6.90	4.99	10.30	71.52	18.18	1.26	2.26	1.54	31.53	72.08	100.98	30
C-007	5	8.7	71.3	213.6	92	11.01	8.62	4.74	12.74	68.98	18.28	1.24	2.24	1.48	34.00	74.03	93.85	25
C-010	5	8.9	72.1	212.9	89	10.22	8.14	4.38	10.98	71.65	17.38	1.21	2.21	1.44	34.84	73.08	98.81	25
C-011	5	8.4	72.3	184.5	87	9.85	7.57	4.56	15.73	67.79	16.48	1.30	2.30	1.40	39.19	77.05	101.50	30
C-012	5	8.6	72.5	211.3	87	10.69	7.21	4.65	14.61	71.16	14.23	1.17	2.17	1.33	38.88	75.73	97.40	30
C-013	5	9.1	75.7	198.1	91	10.78	6.73	4.64	14.10	73.40	12.50	1.27	2.27	1.56	31.24	75.30	91.11	25
C-014	5	8.0	74.4	217.1	83	11.57	6.90	4.68	11.82	75.72	12.46	1.32	2.32	1.55	33.17	74.40	96.71	30
C-020	5	8.8	76.5	219.2	84	9.58	8.39	4.85	14.24	71.19	14.58	1.34	2.34	1.49	36.23	72.00	101.16	30
C-022	5	8.9	72.6	188.3	93	11.88	6.90	4.39	13.64	71.52	14.85	1.43	2.43	1.65	32.13	71.81	95.00	25
C-023	5	9.6	72.4	187.7	84	11.67	7.13	4.41	12.88	68.14	18.98	1.23	2.23	1.34	40.04	73.40	96.45	30
C-024	5	9.1	73.7	229.0	88	11.58	7.70	4.62	12.81	70.82	16.37	1.26	2.26	1.46	35.46	70.00	91.92	25
C-026	5	8.5	74.3	208.7	88	10.39	8.58	4.63	14.75	71.39	13.86	1.27	2.27	1.50	34.11	70.54	99.53	25
C-027	5	8.9	75.5	224.9	92	11.11	8.41	4.69	9.02	75.52	15.46	1.17	2.17	1.39	35.78	71.10	101.19	25
C-029	5	8.3	74.9	258.1	90	10.73	8.89	4.79	11.83	71.01	17.16	1.31	2.31	1.51	34.82	71.21	103.49	25
C-037	5	8.2	.	141.9	88	10.18	6.34	4.12	15.32	68.94	15.74	1.21	2.21	1.53	30.71	71.60	95.80	25
C-038	5	8.0	72.9	190.5	97	11.21	7.59	4.82	13.58	69.06	17.36	1.23	2.23	1.64	26.31	71.81	93.74	25
C-039	5	9.1	72.4	203.1	91	11.58	7.19	4.17	10.25	74.84	14.91	1.33	2.33	1.36	41.72	71.09	97.78	25

TE= tipo de endospermo, HUM= humedad del grano (%), PH= peso hectolítrico (Kg), PMILS= peso de mil semillas (g), IF= índice de flotación(%), L= largo(mm), A= ancho(mm), E= espesor(mm), PER= porcentaje de pericarpio, END= porcentaje de endospermo, EMB= porcentaje de embrión, CAA= capacidad de absorción de agua (L/Kg), RM= rendimiento de masa, RT= rendimiento de tortilla, PP= pérdida de peso de la tortilla, TO= temperatura inicial de gelatinización(°C), TF= temperatura final de gelatinización(°C), TC= tiempo de cocimiento de la tortilla(min.).

Cuadro A.2. Descripción de 99 cruzas simples experimentales de maíz con base en atributos físicos y de calidad de grano.

CRUZAS	TE	HUM	PH	PMILS	IF	L	A	E	PER	END	EMB	CAA	RM	RT	PP	Ti	Tf	TC
18x13	1	7.4	81.1	224.6	14	9.66	8.63	4.73	11.44	75.48	13.08	1.33	2.33	1.63	30.02	73.81	95.36	40
18x16	1	7.3	79.7	166.8	13	8.51	8.20	4.80	12.13	73.64	14.23	1.33	2.33	1.51	35.38	71.79	95.31	40
18x41	1	7.1	77.8	224.7	16	9.05	9.20	5.27	12.47	79.31	8.22	1.22	2.22	1.33	40.03	73.63	102.58	40
18x42	1	7.3	81.1	242.9	6	9.57	8.37	4.99	11.57	74.93	13.50	1.23	2.23	1.23	45.05	71.81	96.63	45
18x52	1	7.4	78.5	225.4	8	9.02	8.81	4.73	11.88	73.75	14.38	1.35	2.35	1.45	38.48	71.27	95.73	45
18x53	1	7.6	78.4	180.5	10	9.19	8.02	4.55	10.25	79.51	10.25	1.41	2.41	1.53	36.70	73.26	92.29	45
18x54	1	7.8	81.0	210.5	8	9.80	8.67	4.84	10.56	74.19	15.25	1.19	2.19	1.38	37.18	73.08	96.45	45
18x56	1	6.9	78.4	241.2	17	10.00	9.44	4.67	10.50	80.00	9.50	1.30	2.30	1.55	32.47	72.72	89.93	40
18x58	1	6.8	75.6	214.5	12	10.66	8.92	4.98	8.66	82.68	8.66	1.30	2.30	1.54	32.99	74.71	96.27	45
42x54	1	7.4	81.5	276.9	13	11.59	8.19	4.73	11.58	69.21	19.21	1.23	2.23	1.50	32.68	70.96	92.32	40
15x17	2	7.9	75.1	306.2	37	12.22	8.60	5.23	11.65	74.51	13.84	1.35	2.35	1.42	39.72	68.63	92.70	40
15x54	2	6.9	75.2	296.7	32	12.04	8.21	4.64	13.57	68.71	17.72	1.50	2.50	1.52	39.33	75.48	93.01	40
15x58	2	7.4	76.9	283.6	32	10.62	8.47	4.90	10.00	75.00	15.00	1.46	2.46	1.51	38.43	73.08	89.93	40
17x11	2	7.5	75.1	222.2	34	9.91	8.17	5.05	11.23	67.40	21.37	1.45	2.45	1.54	37.14	73.44	94.44	40
17x12	2	7.5	74.2	228.6	39	10.03	8.33	5.16	9.97	78.71	11.32	1.58	2.58	1.65	36.18	73.99	93.01	35
17x15	2	6.7	78.1	225.9	27	10.03	8.45	4.60	10.58	79.89	9.52	1.19	2.19	1.51	30.88	73.56	93.60	40
17x41	2	7.0	76.4	208.8	30	9.23	8.69	5.74	11.38	71.86	16.77	1.20	2.20	1.33	39.80	71.61	94.99	40
17x42	2	7.8	76.5	181.0	28	8.76	7.55	4.51	9.40	76.92	13.68	0.93	1.93	1.23	35.90	70.54	95.00	40
17x52	2	7.1	76.8	160.0	36	8.61	6.98	4.11	10.10	71.99	17.92	1.27	2.27	1.34	41.02	72.16	98.05	40
17x54	2	6.8	75.8	201.9	38	9.58	7.92	4.79	9.66	79.44	10.90	1.25	2.25	1.58	30.07	70.37	94.62	35
17x56	2	7.4	76.3	183.9	32	9.49	7.35	4.86	14.50	69.52	15.99	1.27	2.27	1.60	29.56	73.81	95.17	40
18x11	2	8.0	79.0	198.6	21	9.47	8.60	4.71	11.98	71.56	16.47	1.30	2.30	1.64	28.62	75.25	97.90	40
18x12	2	7.1	80.7	227.8	24	9.24	8.80	4.86	13.52	74.53	11.95	1.38	2.38	1.61	32.51	71.63	95.23	40
18x14	2	8.7	78.6	201.4	29	8.80	8.27	4.85	12.77	72.63	14.60	1.29	2.29	1.57	31.54	75.62	98.26	40
18x15	2	7.3	78.0	198.4	30	8.93	8.22	4.71	14.34	73.53	12.13	1.35	2.35	1.48	36.82	71.45	95.64	40
42x12	2	7.9	80.6	232.7	40	12.40	7.46	4.54	10.22	81.72	8.06	1.38	2.38	1.59	33.10	71.28	86.71	35

42x14	2	7.3	82.5	277.4	25	10.93	8.07	4.86	11.39	69.44	19.17	1.14	2.14	1.53	28.38	68.50	89.86	40
42x17	2	7.6	79.2	206.2	39	10.32	7.30	4.10	12.20	66.54	21.26	1.24	2.24	1.54	31.32	70.91	93.91	35
53x12	2	7.1	74.6	189.8	30	10.33	7.59	4.19	10.92	70.77	18.31	1.33	2.33	1.55	33.58	73.81	93.73	40
53x18	2	7.0	79.3	228.5	30	10.90	8.72	4.41	10.95	72.62	16.43	1.28	2.28	1.61	29.57	74.35	97.86	40
53x19	2	7.3	78.5	184.3	32	9.98	8.47	4.41	8.50	73.31	18.18	1.30	2.30	1.66	27.56	74.89	98.36	40
53x20	2	7.0	81.6	229.7	21	10.31	8.59	4.56	9.68	77.71	12.61	1.35	2.35	1.66	29.51	74.17	96.81	40
11x15	3	7.0	74.3	182.5	55	9.98	7.64	4.63	13.62	71.59	14.78	1.41	2.41	1.59	34.20	71.23	95.08	35
11x42	3	6.9	77.5	255.8	54	11.11	8.14	4.56	11.23	70.05	18.72	1.23	2.23	1.44	35.50	70.58	95.38	35
11x52	3	6.7	73.8	204.3	47	10.58	8.81	4.78	9.75	75.21	15.04	1.37	2.37	1.46	38.55	70.77	98.85	35
15x12	3	7.0	76.5	278.1	57	11.70	8.30	4.58	13.25	70.60	16.14	1.31	2.31	1.35	41.62	72.26	93.37	35
15x14	3	7.6	75.9	271.0	50	11.28	8.30	4.92	10.34	70.57	19.08	1.22	2.22	1.45	34.53	71.31	96.81	35
15x16	3	6.7	73.6	253.6	54	10.85	8.81	4.75	11.73	73.07	15.20	1.21	2.21	1.34	39.59	71.87	95.59	35
15x18	3	7.3	74.9	264.4	54	11.24	7.69	5.08	11.71	70.27	18.02	1.27	2.27	1.32	41.70	70.69	101.13	35
15x19	3	7.0	73.7	332.0	44	10.81	8.99	5.49	9.85	76.52	13.63	1.02	2.02	1.22	39.51	63.48	92.45	35
15x42	3	7.0	72.3	257.7	60	12.31	7.66	4.56	11.75	70.49	17.77	1.29	2.29	1.54	32.52	70.96	89.95	35
15x60	3	6.8	76.0	291.7	52	10.73	8.49	5.79	9.21	74.42	16.37	1.37	2.37	1.55	34.65	74.65	94.09	35
17x13	3	7.3	73.4	204.4	58	11.18	7.47	4.90	9.88	69.14	20.99	1.58	2.58	1.70	34.22	73.44	94.46	35
17x14	3	7.0	73.9	225.9	56	10.72	8.18	4.64	10.38	72.96	16.67	1.56	2.56	1.52	40.71	73.51	90.29	35
17x16	3	6.8	73.0	202.4	43	10.63	7.93	4.55	11.80	69.84	18.36	1.21	2.21	1.63	26.11	71.30	94.25	35
17x18	3	7.2	72.0	201.5	55	10.42	8.19	4.75	11.24	77.53	11.24	1.10	2.10	1.51	28.15	71.85	95.26	35
17x19	3	7.7	74.4	235.0	43	10.38	7.91	4.60	12.06	66.76	21.18	1.25	2.25	1.45	35.63	72.80	98.93	35
18x17	3	7.1	77.7	213.8	44	9.00	7.64	4.83	13.81	69.40	16.79	1.35	2.35	1.60	32.05	73.33	94.93	35
42x11	3	7.9	77.8	269.5	57	11.00	8.55	5.33	9.62	81.01	9.37	1.19	2.19	1.55	28.89	70.93	91.00	35
42x13	3	7.7	76.2	240.0	59	11.61	7.95	4.89	10.89	81.09	8.02	1.31	2.31	1.38	40.18	68.32	91.79	35
42x15	3	7.7	78.0	217.0	53	10.76	8.18	4.74	14.88	69.76	15.37	1.25	2.25	1.33	40.70	71.23	95.95	35
53x16	3	7.3	79.0	206.8	49	9.87	8.55	4.41	7.47	76.00	16.53	1.21	2.21	1.53	30.82	71.27	100.44	35
53x52	3	7.7	73.4	195.2	50	9.88	8.58	3.95	14.63	70.43	14.94	1.30	2.30	1.59	30.59	71.27	92.83	35
11x12	4	6.7	76.1	269.7	69	11.20	8.44	5.03	12.86	69.29	17.85	1.25	2.25	1.52	32.51	70.55	95.21	30
11x14	4	7.0	74.8	229.3	79	9.66	8.31	5.27	12.89	70.31	16.81	1.16	2.16	1.47	31.95	70.96	88.27	30

11x16	4	7.5	76.0	246.0	74	9.22	8.46	5.40	12.02	67.77	20.20	1.32	2.32	1.66	28.51	72.31	98.85	30
11x18	4	7.7	74.5	166.6	70	11.68	8.16	4.68	11.35	68.60	20.05	1.34	2.34	1.46	37.90	68.85	93.85	30
11x19	4	7.3	70.0	271.2	78	8.61	8.21	5.53	11.20	71.04	17.76	1.29	2.29	1.44	37.18	68.36	85.47	30
11x41	4	6.6	74.8	250.3	63	10.36	8.04	5.19	11.23	71.66	17.11	1.34	2.34	1.60	31.92	71.92	94.81	30
11x53	4	7.1	72.1	229.9	75	11.45	8.22	4.41	11.27	68.31	20.42	1.33	2.33	1.40	39.82	70.38	96.15	30
11x56	4	7.1	74.0	229.0	68	10.87	8.60	5.17	12.38	68.07	19.55	1.45	2.45	1.67	31.87	71.35	96.93	30
15x11	4	8.7	72.5	319.8	69	11.61	8.75	5.68	10.83	76.50	12.67	1.25	2.25	1.43	36.47	70.33	98.39	30
15x52	4	7.0	72.3	209.5	68	9.76	7.98	4.77	12.07	71.21	16.72	1.18	2.18	1.35	37.85	70.18	100.09	30
17x53	4	7.0	70.8	165.9	75	9.46	7.62	4.56	10.94	71.32	17.74	1.19	2.19	1.42	35.28	71.45	95.18	30
42x41	4	7.5	77.0	209.7	63	10.70	7.29	4.63	11.97	66.90	21.13	1.32	2.32	1.57	32.29	68.77	93.61	30
42x53	4	8.3	73.2	203.4	77	11.12	7.27	4.40	11.03	67.62	21.35	1.38	2.38	1.65	30.93	72.36	95.00	30
53x11	4	7.4	75.7	253.1	70	10.23	9.26	5.27	10.74	75.42	13.84	1.22	2.22	1.62	27.29	75.08	98.99	30
53x13	4	7.7	74.9	169.5	61	9.44	7.94	4.41	11.64	70.18	18.18	1.36	2.36	1.64	30.47	75.07	99.35	35
53x14	4	7.5	74.4	191.2	68	10.63	8.36	4.48	12.29	75.71	12.00	1.33	2.33	1.45	38.00	75.62	99.89	30
53x17	4	6.7	74.9	195.9	64	10.58	8.27	4.36	16.18	66.31	17.51	1.35	2.35	1.73	26.41	73.99	95.18	30
11x13	5	6.5	72.5	238.3	92	10.86	8.20	4.51	11.45	69.55	18.99	1.36	2.36	1.51	35.92	69.62	88.46	25
11x20	5	6.9	70.5	178.8	88	8.63	8.18	5.02	11.00	71.52	17.48	1.42	2.42	1.41	42.00	69.42	94.23	25
11x54	5	6.6	70.7	196.7	91	10.31	8.35	4.11	11.02	67.51	21.47	1.33	2.33	1.21	48.01	72.50	97.70	25
14x11	5	7.1	71.7	253.4	98	10.64	8.49	5.40	12.65	70.41	16.95	1.29	2.29	1.51	34.11	70.00	104.43	25
14x12	5	7.0	66.2	248.5	94	10.77	8.35	5.18	14.09	72.36	13.55	1.38	2.38	1.62	31.93	70.19	97.31	25
14x13	5	7.3	68.4	271.6	100	11.46	9.16	5.98	12.58	71.55	15.88	1.33	2.33	1.29	44.93	68.15	88.92	25
14x15	5	7.1	68.3	263.6	99	11.91	8.56	4.89	12.47	73.09	14.44	1.35	2.35	1.41	39.75	70.50	97.66	25
14x16	5	6.8	70.5	320.3	94	10.78	10.46	6.74	10.83	74.73	14.44	1.39	2.39	1.55	35.34	65.98	91.12	25
14x19	5	7.6	68.6	212.6	100	9.45	8.69	4.87	11.55	70.14	18.31	1.32	2.32	1.42	38.64	71.31	93.48	25
14x42	5	7.0	70.9	239.8	94	9.80	8.52	5.54	11.93	72.25	15.83	1.28	2.28	1.63	28.67	67.06	87.26	25
14x52	5	7.6	70.6	254.3	95	9.55	8.33	6.15	13.56	68.22	18.22	1.50	2.50	1.43	42.77	66.97	88.91	25
14x53	5	7.0	65.9	267.5	99	10.24	9.15	5.93	13.36	70.04	16.59	1.34	2.34	1.63	30.23	72.66	94.63	25
14x54	5	6.9	70.0	263.2	93	10.43	8.65	5.35	14.31	68.43	17.25	1.30	2.30	1.37	40.66	71.15	95.83	25
14x56	5	7.0	72.1	276.5	93	11.49	8.97	5.72	13.49	70.12	16.39	1.41	2.41	1.68	30.39	71.75	100.19	25

14x60	5	7.2	70.1	219.1	98	10.06	8.35	5.80	13.25	72.73	14.03	1.21	2.21	1.31	40.76	68.75	95.43	25
15x13	5	7.8	69.0	267.2	91	11.42	8.17	5.50	11.70	74.65	13.65	1.23	2.23	1.40	37.27	69.14	97.23	25
15x20	5	7.5	70.9	242.6	83	10.83	7.68	4.79	11.36	69.81	18.84	1.35	2.35	1.53	34.90	67.95	88.91	30
15x41	5	7.2	71.5	242.7	86	10.25	8.27	5.47	13.45	72.84	13.71	1.14	2.14	1.51	29.34	69.73	102.94	30
15x56	5	7.2	71.0	213.3	82	10.08	8.15	4.65	12.50	68.29	19.21	1.44	2.44	1.39	43.30	73.71	91.09	30
17x60	5	7.6	72.5	164.5	89	8.81	8.09	5.46	12.60	69.69	17.72	1.19	2.19	1.44	34.15	69.46	92.65	25
53x54	5	7.7	73.9	236.3	88	10.82	8.58	4.62	10.70	68.45	20.85	1.26	2.26	1.56	30.97	70.00	90.44	25
54x18	5	7.6	70.7	189.0	86	9.12	9.07	4.93	12.75	72.55	14.71	1.21	2.21	1.43	35.15	70.33	97.99	30
54x19	5	8.2	68.9	173.7	91	8.89	8.41	4.70	12.01	70.67	17.31	1.27	2.27	1.59	30.20	77.43	96.67	25
54x20	5	8.1	70.8	176.3	92	7.91	8.94	5.06	12.45	72.45	15.09	1.34	2.34	1.61	31.02	74.17	97.18	25
54x42	5	8.3	66.2	147.4	87	8.65	7.91	4.64	12.66	69.62	17.72	1.30	2.30	1.55	32.68	72.54	96.81	30
54x52	5	8.6	68.3	182.5	88	8.43	9.07	4.43	9.81	69.81	20.38	1.34	2.34	1.41	39.58	69.63	91.32	25
54x53	5	8.2	64.4	199.5	81	9.11	9.19	4.74	11.79	75.36	12.86	1.35	2.35	1.61	31.22	70.00	95.37	30
54x56	5	7.7	60.7	153.7	100	8.53	8.42	4.15	13.41	71.95	14.63	1.43	2.43	1.74	28.21	73.81	92.10	25
54x58	5	8.2	67.3	170.8	86	8.44	9.42	4.29	12.16	74.90	12.94	1.27	2.27	1.50	33.90	71.68	95.33	30

TE= tipo de endospermo, HUM= humedad del grano (%), PH= peso hectolítrico (Kg), PMILS= peso de mil semillas (g), IF= índice de flotación(%), L= largo(mm), A= ancho(mm), E= espesor(mm), PER= porcentaje de pericarpio, END= porcentaje de endospermo, EMB= porcentaje de embrión, CAA= capacidad de absorción de agua (L/Kg), RM= rendimiento de masa, RT= rendimiento de tortilla, PP= pérdida de peso de la tortilla, TO= temperatura inicial de gelatinización(°C), TF= temperatura final de gelatinización (°C), TC= tiempo de cocimiento de la tortilla(min.).

Cuadro A.3. Estadísticas descriptivas de los atributos físicos de los grupos de cruza
simples y poblaciones.

Atributos	Grupos	N	Media	Max	Min	Amplitud	CV	E.E.
Contenido de humedad (%)	Cruzas	108	7.38	8.75	6.53	2.21	6.4	0.045
	Poblaciones	43	8.72	9.56	7.71	1.85	4.9	0.065
	Promedio	151	7.76	9.56	6.53	3.03	9.8	0.062
Peso hectolítrico (Kg)	Cruzas	520	74.16	82.97	60.00	22.97	5.7	0.185
	Poblaciones	210	74.51	78.80	70.43	8.37	2.4	0.121
	Promedio	730	74.26	82.97	60.00	22.97	5.0	0.136
Peso de mil semillas (g)	Cruzas	339	221.08	334.60	115.70	218.90	19.4	2.328
	Poblaciones	129	208.58	269.70	138.00	131.70	10.4	1.909
	Promedio	468	217.63	334.60	115.70	218.90	17.7	1.784
Índice de flotación (%)	Cruzas	224	59.01	100.00	4.00	96.00	47.3	1.864
	Poblaciones	86	76.37	98.00	44.00	54.00	18.0	1.481
	Promedio	310	63.83	100.00	4.00	96.00	40.7	1.475
Longitud de grano (mm)	Cruzas	240	10.03	12.60	7.42	5.17	11.1	0.072
	Poblaciones	86	10.69	12.01	9.21	2.80	6.4	0.073
	Promedio	326	10.20	12.60	7.42	5.17	10.4	0.059
Ancho de grano (mm)	Cruzas	240	8.28	10.54	6.68	3.86	7.2	0.039
	Poblaciones	86	7.76	9.15	6.30	2.85	9.4	0.078
	Promedio	326	8.14	10.54	6.30	4.24	8.3	0.037
Espesor de grano (mm)	Cruzas	240	4.84	7.24	3.91	3.33	10.7	0.034
	Poblaciones	86	4.50	5.34	3.84	1.50	7.3	0.035
	Promedio	326	4.75	7.24	3.84	3.40	10.5	0.028
Proporción de Pericarpio (%)	Cruzas	112	11.85	17.91	7.47	10.44	14.8	0.165
	Poblaciones	43	12.45	17.33	9.00	8.33	15.3	0.291
	Promedio	155	12.02	17.91	7.47	10.44	15.0	0.145
Proporción de Endospermo (%)	Cruzas	112	72.21	82.68	62.19	20.49	5.4	0.365
	Poblaciones	43	72.28	76.70	67.79	8.91	3.7	0.404
	Promedio	155	72.23	82.68	62.19	20.49	4.9	0.286
Proporción de Embrión (%)	Cruzas	112	15.94	22.89	8.02	14.86	21.2	0.319
	Poblaciones	43	15.27	20.64	11.01	9.63	14.8	0.344
	Promedio	155	15.76	22.89	8.02	14.86	19.7	0.250

N= número de repeticiones, Max= máximos, Min= mínimos, CV= coeficiente de variación, E.E.= error estándar.

Cuadro A.4. Estadísticas descriptivas de los atributos de calidad de grano de los grupos de cruza simples y poblaciones.

Atributos	Grupos	N	Media	Max	Min	Amplitud	CV	E.E.
Capacidad de absorción de agua (L/kg harina)	Cruzas	106	1.31	1.58	0.93	0.66	7.9	0.010
	Poblaciones	43	1.29	1.52	1.10	0.42	7.0	0.014
	Promedio	149	1.30	1.58	0.93	0.66	7.7	0.008
Rendimiento de masa (Kg masa/Kg de harina)	Cruzas	106	2.31	2.58	1.93	0.66	4.5	0.010
	Poblaciones	43	2.29	2.52	2.10	0.42	3.9	0.014
	Promedio	149	2.30	2.58	1.93	0.66	4.3	0.008
Rendimiento de tortilla	Cruzas	106	1.52	1.93	0.96	0.98	12.8	0.019
	Poblaciones	42	1.54	2.09	1.05	1.04	12.4	0.029
	Promedio	148	1.52	2.09	0.96	1.13	12.7	0.016
Temperatura inicial de gelatinización (° C)	Cruzas	210	71.58	79.42	62.75	16.67	3.3	0.163
	Poblaciones	86	71.69	79.06	66.01	13.05	3.0	0.230
	Promedio	296	71.61	79.42	62.75	16.67	3.2	0.133
Temperatura final de gelatinización (° C)	Cruzas	210	94.87	105.80	84.40	21.40	4.0	0.262
	Poblaciones	86	96.66	106.91	77.88	29.03	5.2	0.541
	Promedio	296	95.39	106.91	77.88	29.03	4.5	0.248
Tiempo de cocción (min)	Cruzas	224	33.13	45.00	25.00	20.00	18.3	0.405
	Poblaciones	86	29.83	35.00	25.00	10.00	11.3	0.365
	Promedio	310	32.21	45.00	25.00	20.00	17.5	0.321

N= número de repeticiones, Max= máximos, Min= mínimos, CV= coeficiente de variación, E.E.= error estándar.