



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

**MEJORAMIENTO GENÉTICO DE MAÍZ
ELOTERO (*Zea mays*) MEDIANTE LA
INCORPORACIÓN DE LOS GENES *Sugary 1*,
Brittle 1 y *Shrunken 2***

ANTELMO OSORIO SAENZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: **Mejoramiento genético de maíz elotero (*Zea mays*) mediante la incorporación de los genes *Sugary 1*, *Brittle 1* y *Shrunken 2***, realizada por el alumno **Antelmo Osorio Saenz** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



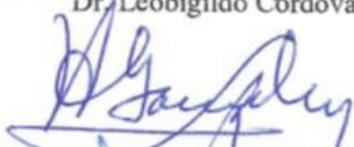
Dr. Amalio Santacruz Varela

ASESOR:



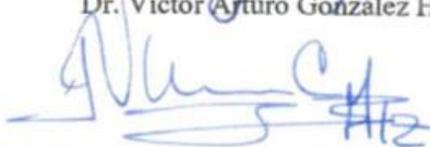
Dr. Leobigildo Córdoba Téllez

ASESOR:



Dr. Víctor Arturo González Hernández

ASESOR:



Dr. F. Víctor Conde Martínez

ASESOR:



Dr. Guillermo Carrillo Castañeda

ASESOR:



Dr. José Oscar Mascorro Gallardo

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero 2020.

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE MAÍZ ELOTERO (*Zea mays*) MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE LOS GENES *Sugary 1*, *Brittle 1* y *Shrunken 2*

Antelmo Osorio Saenz, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

En el mercado local de elotes en México predominan las razas nativas que los agricultores han seleccionado y mantenido para satisfacer sus preferencias de calidad como el sabor. En el mercado nacional los híbridos comerciales con elotes de gran tamaño son los de mayor uso y la producción se destina frecuentemente a consumidores de las grandes ciudades. Los objetivos de este estudio fueron 1) caracterizar colectas de tres razas de maíz adaptadas a Valles Altos centrales de México, dos del Bajío y una en el noroeste del país para la producción de elote para el mercado local y nacional, 2) definir la fecha óptima de cosecha de elote con base en el contenido de sólidos solubles, y 3) realizar mejoramiento genético para el incremento de azúcares mediante la incorporación el gen mutante *shrunken 2* a las mejores accesiones de cada raza. Se evaluaron 42 accesiones de maíz nativo en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Se midió la calidad mediante el contenido de sólidos solubles totales, de proteínas y un análisis sensorial, además de variables morfológicas y rendimiento de elote. Se aplicó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey. Los maíces nativos alcanzaron contenidos de sólidos solubles en promedio de 22.5 ° Brix, proteínas de 13.6 % y elotes con mejor sabor que el testigo comercial. Se obtuvieron promedios de longitud de 23.6 cm, diámetro de 5.3 cm y de 16 hileras rectas, valores similares al testigo. En rendimiento los maíces nativos registraron 14.6 t ha⁻¹ de elote entero y 9.6 t ha⁻¹ de grano fresco rebanado. La ventana óptima de cosecha fue mayor en las razas dulces con 14 a 20 ° Brix de los 24 a 32 días después de la polinización, respectivamente. Los genotipos mutantes de las razas nativas de Valles Altos con el gen *shrunken 2* mejoraron el sabor dulce del elote más que las razas dulces, pero no los superaron en sólidos solubles. Estos genotipos mejorados disminuyeron en 50 % la emergencia en campo por la presencia de este gen mutante. Existe variabilidad en los maíces nativos para satisfacer preferencias de consumo de elote entero y de grano rebanado en los Valles Altos y Bajío de México.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz dulce, grados Brix, análisis sensorial.

GENETIC IMPROVEMENT OF CORN COB (*Zea mays*) THROUGH THE INCORPORATION OF THE GENES *Sugary 1*, *Brittle 1* and *Shrunken 2*

Antelmo Osorio Saenz, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

The local market of corn on the cob in Mexico native races that farmers have selected and maintained to satisfy their quality preferences such as taste predominates. In the national market, commercial hybrids with large ears are the most commonly used and its production is often destined for consumers in large cities. The objectives of this study were 1) to characterize accessions of three mexican maize races adapted to the central highlands of Mexico, two of the midlands and one in the Northwest of the country for corn on the cob production for the local and national market, 2) to define the optimal harvest date of corn based on the content of soluble solids, and 3) to perform genetic improvement for the increase of sugar through the incorporation of the mutant gene *shrunken 2* to the best accessions of each race. Forty-two accessions of native maize were evaluated in a randomized complete blocks design with two replications. Quality was measured through the content of total soluble solids, proteins and a sensory analysis, in addition to morphological variables and corn yield. Analysis of variance and Tukey's means comparison tests were applied. The maize landraces reached average soluble solids contents of 22.5 ° Brix, 13.6 % of proteins and corn on the cob with better flavor than the hybrid control. Average of length of 23.6 cm, diameter of 5.3 cm and 16 straight rows were obtained, values similar to the control. In yield, maize landraces registered 14.6 t ha⁻¹ of whole ears and 9.6 t ha⁻¹ of fresh sliced grain. The optimum harvest period was higher in sweet maize landraces with 14 to 20 ° Brix at 24 to 32 days after pollination, respectively. Mutant genotypes of the native races of High Valleys with the *shrunken 2* gene improved the sweet taste of the corn more than the sweet races but did not exceed them in soluble solids. These improved genotypes reduced the field emergency by 50% due to the presence of this mutant gene. There is variability in native maize to satisfy consumption preferences of whole corn on the cob and sliced grain in the central highlands and midlands of Mexico.

Key words: *Zea mays*, sweet corn, Brix degrees, sensory analysis.

DEDICATORIA

A mi familia, amigos y profesores por brindarme todo el apoyo necesario para realizar este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Doctorado.

Al Colegio de Postgraduado por facilitar el uso de sus instalaciones y terreno para el establecimiento de los experimentos en campo.

A los integrantes del Consejo Particular por su orientación y sugerencias durante el desarrollo del este trabajo, así como su disposición para la revisión de la investigación.

A los estudiantes, trabajadores de campo y administrativos Genética por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Antecedentes	1
2. Planteamiento del problema.....	2
3. Objetivos	3
4. Hipótesis	3
5. Literatura citada	4
CAPÍTULO I. MAÍCES NATIVOS DE VALLES ALTOS DE MÉXICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ELOTE.....	5
1.1. Resumen	5
1.2. Abstract.....	6
1.3. Introducción.....	7
1.4. Materiales y métodos.....	9
1.5. Resultados y discusión.....	13
1.6. Conclusiones	23

1.7. Literatura citada	23
------------------------------	----

CAPÍTULO II. MAÍCES NATIVOS MEXICANOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELOTE EN EL BAJÍO	26
---	----

2.1. Resumen	26
--------------------	----

2.2. Abstract.....	27
--------------------	----

2.3. Introducción.....	28
------------------------	----

2.4. Materiales y métodos.....	30
--------------------------------	----

2.5. Resultados y discusión.....	34
----------------------------------	----

2.6. Conclusiones.....	42
------------------------	----

2.7. Literatura citada.....	42
-----------------------------	----

CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DURANTE EL DESARROLLO DEL ELOTE.....	45
--	----

3.1. Resumen	45
--------------------	----

3.2. Abstract.....	46
--------------------	----

3.3. Introducción.....	47
------------------------	----

3.4. Materiales y métodos.....	50
--------------------------------	----

3.5. Resultados y discusión.....	53
----------------------------------	----

3.6. Conclusiones.....	59
------------------------	----

3.7. Literatura citada.....	60
-----------------------------	----

CAPÍTULO IV: EMERGENCIA DE PLÁNTULA Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES EN SEMILLAS DE MAÍCES NATIVOS CON EL GEN <i>shrunkn 2</i>	62
4.1. Resumen	62
4.2. Abstract.....	63
4.3. Introducción.....	64
4.4. Materiales y métodos.....	65
4.5. Resultados y discusión.....	68
4.6. Conclusiones.....	73
4.7. Literatura citada	73
DISCUSIÓN GENERAL.....	74
CONCLUSIONES GENERALES	81
Literatura citada	82
APÉNDICE.....	83

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1. Colectas de maíces adaptados a Valles Altos usados para la caracterización de elote en Texcoco, Estado de México	10
Cuadro 1.2. Cuadrados medios de los análisis de varianza efectuados en la evaluación de 28 maíces nativos para atributos de elote. Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2015 y 2016	14
Cuadro 1.3. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables de elote de maíces nativos adaptados a Valles Altos de México durante 2015 y 2016	22
Cuadro 1.4. Vectores y valores propios de los primeros tres componentes principales de nueve variables de atributos de elote en 28 maíces nativos de Valles Altos de México durante 2015 y 2016	23
Cuadro 2.1. Colectas de maíces dulces y no dulces usados para la caracterización de elote sembrados en Roque, Celaya, Guanajuato, México.	32
Cuadro 2.2. Cuadrados medios del análisis de varianza de 15 maíces dulces y no dulces para atributos de elote. Celaya, Guanajuato, 2015 y 2016	36
Cuadro 2.3. Atributos de elote en 14 colectas de maíces nativos evaluados en Celaya, Guanajuato durante 2015 y 2016, y de un híbrido comercial usado como testigo.	38
Cuadro 2.4. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de elote de 15 maíces dulces y no dulces evaluados en Celaya, Guanajuato, 2015 y 2016	43
Cuadro 3.1. Colectas de maíces nativos de México usados para la cinética de acumulación de sólidos solubles totales en Texcoco, Estado de México	54
Cuadro 3.2. Cuadrados medios del análisis de varianza en el contenido de sólidos solubles totales en 10 fechas de muestreo de elote en Texcoco, Estado de México	56
Cuadro 4.1. Cuadrados medios para emergencia de plántulas durante 9 días de evaluación en maíces dulces con el gen <i>sh₂</i> y su versión normal	73
Cuadro 4.2. Comparación de medias en los porcentajes de emergencia de plantas de maíz no dulce (N) y dulce (D) con el gen <i>sh₂</i> a los 15 días después de la siembra.	74

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Atributos de calidad de elote de los primeros diez maíces nativos sobresalientes y del testigo comercial con base en: a) contenido de sólidos solubles totales; b) contenido de proteínas; c) sabor de elote	16
Figura 1.2. Variables morfológicas: a) longitud; b) diámetro; y c) número de hileras en los elotes de los primeros diez genotipos sobresalientes	19
Figura 1.3. Rendimiento de elote entero y de grano fresco de los diez genotipos más sobresalientes. Medias con la misma letra dentro de cada tipo de barra son estadísticamente iguales	20
Figura 2.1. Mazorcas de razas de maíces dulces y no dulces en etapa de elote (panel superior) y grano seco (panel inferior) de a) Dulce de Jalisco, b) Dulcillo del Noroeste, c) Elotes Occidentales y d) A-7573	33
Figura 3.1. Fenotipo de la raza Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste en estado de grano seco (a) y en elote (b)	53
Figura 3.2. Cinética de acumulación de sólidos solubles totales y contenido de humedad en maíces normales, mutantes dulces (<i>sugary 1</i>) y un superdulce (<i>shrunkn 2</i>)	58
Figura 3.3. Dinámica de acumulación de sólidos solubles totales en maíces con endospermo normal y dulce a los 34 días después de la polinización	61
Figura 3.4. Apariencia física del elote a los 32 días después de la polinización del control dulce GSS1453 (a) y la raza Dulce de Jalisco (b)	62
Figura 4.1. Expresión fenotípica del gen mutante <i>shrunkn 2</i> en la generación filial 2 (F ₂) en la raza Cacahuacintle (a) y Elotes Cónicos (b)	70
Figura 4.2. Acumulación de sólidos solubles totales en razas nativas con endospermo normal y dulce a los 28 días después de la polinización. A7573 control de endospermo normal y GSS1453 control de endospermo dulce	76

LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE

	Página
Cuadro 1A. Medias de variables para caracterización de elotes en 28 colectas de maíces nativos de Valles Altos. Texcoco, Estado de México, 2015 y 2016.	89
Cuadro 2A. Orden aleatorio de degustación del análisis sensorial de elote cocido de las razas adaptadas a Valles Altos, Montecillo 2015 y 2016.	91
Cuadro 3A. Escala hedónica internacional aplicado al panel de degustación del análisis sensorial de elotes cocidos en Montecillo, 2015 y 2016.	94
Cuadro 4A. Medias de genotipos con endospermo de grano normal (N), dulce (D, su_1) y superdulce (D, sh_2) en el contenido de sólidos solubles totales en diez fechas de muestreo en Montecillo, Estado de México.	99
Cuadro 5A. Acumulación de sólidos solubles totales en razas nativas con endospermo normal y dulce a los 26 y 28 días después de la polinización. A7573 control de endospermo normal y GSS1453 control de endospermo dulce.	100

LISTA DE FIGURAS DEL APÉNDICE

	Página
Figura 1A. Atributos de calidad de elote de maíces dulces y no dulces en a) contenido de sólidos solubles totales y b) de proteínas.	101
Figura 2A. Variables de apariencia física de elote: a) longitud; b) diámetro; y c) número de hileras en maíces dulces y no dulces.	101
Figura 3A. Rendimiento de elote entero, de grano fresco y de grano seco de maíces dulces y no dulces. Se indican con la letra <i>a</i> los genotipos superiores estadísticamente dentro de cada tipo de barra.	102
Figura 4A. Fenotipos mutantes de <i>sugary 2</i> , <i>brittle 1</i> , <i>shrunk 2</i> y <i>sugary 1</i> provenientes del banco de germoplasma del CIMMYT.	102

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Antecedentes

En México el elote representa un alimento muy popular entre la población, que se consume cuando el maíz se encuentra en estado fenológico lechoso-masoso, con un contenido de humedad entre 72 y 76 % (Williams, 2014). Entre las principales formas de uso del maíz tierno se encuentra al elote entero hervido o como “esquites”, un guisado en el que los granos se rebanan del elote y se cuece en agua mezclado con condimentos que varían entre regiones del país. En otros países, como Estados Unidos, el elote se usa para la industria del procesado de alimentos en forma de enlatado y congelado (Lertrat y Pulam, 2007; Singh *et al.*, 2014).

Los maíces norteamericanos son diferentes a los utilizados en México porque tienen un sabor dulce y alcanzan de 24 a 30 °Brix (Luchsinger y Camilo, 2008), dulzor debido a mutaciones recesivas ocurridas de manera natural en genes que controlan la conversión de azúcares en almidón en el endospermo de los granos de maíz (Tracy, 1997). Esta forma de aprovechamiento del maíz ofrece ventajas respecto al grano seco debido a que acorta el ciclo de crecimiento del maíz, y una vez que se ha cosechado el elote se puede comercializar la planta como forraje para la alimentación de ganado (Coutiño *et al.*, 2010).

Los agricultores mexicanos cuentan con sus propios maíces nativos dulces y no dulces para satisfacer sus preferencias de calidad de elote a nivel local, pero sin haber aplicado algún esquema de mejoramiento genético formal como la selección o la hibridación. Para la producción comercial nacional se usan híbridos no dulces como el A7573 (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010), que tiene un elote de gran tamaño y buena apariencia física o morfológica, lo que resulta atractivo para la mayoría de los consumidores del mercado mexicano. Para que un elote se considere comercializable debe tener buena apariencia visual para los consumidores, aunque las características atractivas cambian entre mercados. Por ejemplo, en el mercado internacional se ha

establecido que el elote tenga más de 14 cm de largo (Luchsinger y Camilo, 2008), con al menos 16 hileras rectas y granos llenos hasta la punta del elote (Shelton y Tracy, 2015). En los programas de mejoramiento genético para el desarrollo de variedades eloterías, además de piezas de elote comercializable (rendimiento) también se busca alta calidad medida como mejor sabor y textura, alto contenido de azúcares y larga vida de anaquel (Lertrat y Pulam, 2007), y que el producto sea agradable al comerlo (Shelton y Tracy, 2015).

En algunas razas de maíces nativos de México se ha detectado potencial genético para la producción de elote de manera comercial, como en Jala (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010), Cacahuacintle (Arellano *et al.*, 2010), Tuxpeño (Coutiño *et al.*, 2010), así como maíces de diferentes coloraciones en el grano (Ortíz-Torres *et al.*, 2013; Coutiño *et al.*, 2015). Pero se desconoce la continuidad de estos resultados para la formación de una variedad elotería para el mercado local o nacional. Estos estudios fueron dirigidos a características de elote que demanda el mercado nacional relacionadas con rendimiento, contenido de sólidos solubles totales, vida de anaquel, sabor de elote y apariencia física como tamaño de elote (longitud, diámetro, número de hileras, granos por hilera) y tamaño de grano (longitud, ancho y grosor).

2. Planteamiento del problema

En zonas como el oriente del Valle de México y El Bajío mexicano existe alta demanda de elotes por la alta densidad de población en la región central del país, como la Ciudad de México y Guadalajara. En El Bajío se pueden encontrar maíces con el sabor dulce característico de los genotipos usados para el enlatado y congelado, y que ahí se consumen como elote entero hervido. Este elote dulce difiere de las razas Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste por un mayor

contenido de azúcares en el elote, lo que hace que tenga mayor sabor dulce del elote. Desafortunadamente, en estas dos regiones no se han realizado estudios de elotes producidos por razas adaptadas a estas zonas, ni de su uso en programas de mejoramiento genético enfocados a la producción de elotes.

3. Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Identificar genotipos de las razas de maíces, tanto dulces como no dulces, aptas para el consumo como elote entero y esquites mediante variables de calidad, morfológicas y rendimiento; 2) Encontrar las variables más convenientes y simples de aplicar para su uso en el mejoramiento genético; 3) Definir las ventanas óptimas de cosecha del elote con base en el contenido de sólidos solubles y humedad; y 4) Incorporar el gen *shrunk2* a colectas de maíz sobresalientes y cuantificar la ganancia resultante en sólidos solubles totales.

4. Hipótesis

Algunas accesiones de las razas nativas de maíz de valles altos y del bajío presentarán tamaños de elote similares al testigo comercial A7573 y serán superiores en la calidad del elote.

Las variables morfológicas, de rendimiento y de calidad de elote se correlacionarán fuertemente y se identificarán grupos de variables que servirán como criterios de selección indirecta para el mejoramiento genético del elote.

La ventana óptima de cosecha de elote dependerá de cada genotipo debido a que no todos tienen el mismo ciclo fenológico y no acumularán la misma cantidad de sólidos solubles totales.

El contenido de sólidos solubles totales en la versión dulce de las razas con el gen *Srunken 2* serán mayores y tendrán un sabor más dulce que la original.

5. Literatura citada

- Arellano V., J. L., A. J. Gámez V. y M. A. Ávila P. 2010. Potencial agronómico de variedades criollas de maíz Cacahuacintle en el valle de Toluca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Esp4): 37-41.
- Coutiño E., B.; V. A. Vidal M., B. Cruz G., y C. Cruz V. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (Num. Esp. 4): 57-61.
- Coutiño E., B., V. A. Vidal M., C. Cruz V., y M. Gómez G. 2015. Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1119-1127.
- Lertrat, K., and T. Pulam. 2007. Breeding for increased sweetness in sweet corn. *International Journal of Plant Breeding* 1: 27-30.
- Luchsinger L., A., y F. Camilo F. 2008. Rendimiento de maíz dulce y contenido de sólidos solubles. *IDESIA (Chile)* 26: 21-29.
- Ortiz-Torres, E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, J. A. Hernández-Guzmán, y M. Valadez-Ramírez. 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19: 225-238.
- Shelton, A. C., and W. F. Tracy. 2015. Recurrent selection and participatory plant breeding for improvement of two organic open-pollinated sweet corn (*Zea mays* L.) population. *Sustainability* 7: 5139-5152.
- Tracy W., F. 1997. History, genetics, and breeding of supersweet (shrunken2) sweet corn. In: Janick J. (Ed.). *Plant Breeding Reviews* (Vol 14), John Wiley and Sons, Inc., pp 189-236.
- Valdivia-Bernal, R., F. J. Caro-Velarde, R. Medina-Torres, M. Ortiz-Catón, A. Espinosa-Calderón, V. A. Vidal-Martínez, y A. Ortega-Corona. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloteras de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Núm. Esp. 4): 63-67.
- Williams, M. M. II. 2014. Few crop traits accurately predict variables important to productivity of processing sweet corn. *Field Crops Research* 157: 20-26.

CAPÍTULO I. MAÍCES NATIVOS DE VALLES ALTOS DE MÉXICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ELOTE¹

1.1. Resumen

El consumo de elotes de maíz (*Zea mays* L.) en México se basa en híbridos comerciales, aunque existen maíces nativos que los agricultores han seleccionado y usado para este fin. El objetivo de este estudio fue caracterizar elotes de tres razas de maíz nativo no dulces adaptadas a Valles Altos del centro de México. Se evaluaron 28 accesiones de las razas Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos en Montecillo, Estado de México en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Se midió la calidad mediante el contenido de sólidos solubles totales, de proteínas y se realizó un análisis sensorial, además de variables morfológicas y rendimiento de elote. Se aplicó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey, así como análisis de componentes principales. Los maíces nativos alcanzaron contenidos de sólidos solubles de 13.6 ° Brix, proteínas de 12.4 % y elotes con mejor sabor que el testigo comercial. Se obtuvieron longitudes de 18.5 cm, diámetros de 5.3 cm, 16 hileras y 90.8 % de llenado de grano, valores similares al testigo. En rendimientos los maíces nativos registraron 12 t ha⁻¹ de elote entero y 6.3 t ha⁻¹ de grano fresco rebanado para esquites. La longitud y diámetro de elote se pueden usar como criterios de selección en el mejoramiento genético de variables morfológicas y rendimiento, y el contenido de sólidos solubles para calidad de elote. Existe variabilidad en los maíces nativos para satisfacer preferencias de consumo de elote entero y de grano rebanado en los Valles Altos del centro de México.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz tierno, grados Brix, análisis sensorial.

¹ Aceptado con correcciones menores en revista Maydica.

1.2. Abstract

Consumption of corn on the cob (*Zea mays* L.) in Mexico is based on commercial hybrids, even though there are several native landraces selected by farmers for this purpose. The aim of this study was to characterize immature ears from three maize landraces not sweet adapted to the Mexican central highlands. We evaluated 28 accessions belonging to races Cacahuacintle, Chalqueño and Elotes Cónicos in Montecillo, Estado de México under a complete randomized blocks design with two replications. Quality was measured through total soluble solid content, protein content and a sensory analysis, along with morphologic traits and yield. An analysis of variance and comparison of means by Tukey's test, as well as a principal component analysis were applied. Native maize showed soluble solid contents of 13.6 ° Brix, protein content of 12.4 % and better tasting of immature ears than that of the commercial control. Also, the landraces produced ear length of up to 18.5 cm, diameter of up to 5.3 cm, average of 16 grain rows and 90.8 % of grain fill length, which were similar to the control. The yield of landraces reached up to 12 t ha⁻¹ of fresh unhusked ears and 6.3 t ha⁻¹ of fresh kernels for *esquites*. Ear length and diameter can be used as selection criteria for improvement of yield and morphologic traits, and soluble solid content for improvement of tender corn quality. There is variability in native maize to satisfy the consumption preferences of corn on the cob and fresh kernel consumption of the population centers of the central part of Mexico.

Key words: *Zea mays*, tender maize, degrees Brix, sensory analysis.

1.3. Introducción

El elote es una forma de consumo del maíz que se hace cuando se encuentra en estado lechoso durante la etapa de llenado de grano en un estado lechoso, con un contenido de humedad entre 72 y 76 % (Williams, 2014). Esta forma de aprovechamiento ofrece ventajas respecto al grano seco debido a que acorta la estación de crecimiento del maíz, y una vez que se ha cosechado el elote la planta se puede comercializar como forraje para la alimentación de ganado (Coutiño *et al.*, 2010).

En el mercado de elotes se reconocen características morfológicas de importancia visual para los consumidores que se deben considerar para obtener y ofrecer un producto de calidad, pero tales características cambian entre mercados. Las preferencias de elote (Lertrat y Pulam, 2007) y el acervo genético del germoplasma (Ortiz-Torres *et al.*, 2013) han influido en la expresión de características del elote entre maíces empleados para ese propósito. Para el mercado internacional se ha establecido que el elote tenga más de 14 cm de largo (Luchsinger y Camilo, 2008), con al menos 16 hileras rectas y granos llenos hasta la punta del elote (Shelton y Tracy, 2015). En los programas de mejoramiento genético para el desarrollo de variedades eloterías, además de la cantidad de piezas de elotes comercializables también se busca calidad como mejor sabor y textura, alto contenido de azúcares y larga vida de anaquel (Lertrat y Pulam, 2007), para que el producto sea más agradable y apetitoso (Shelton y Tracy, 2015).

En México, la actual producción comercial de elotes se basa en híbridos comerciales, y el de mayor uso es el A7573 (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010). A nivel nacional en 2018 se sembraron en el país 67,041 ha de maíz elotero, con un rendimiento promedio de 15.7 t ha⁻¹ (SAGARPA, 2019); los principales estados productores fueron Puebla con 15, 462 ha, Morelos con 9, 598 ha y San Luis Potosí con 8, 565 ha. El Estado de México contribuyó con 4, 313 ha de la superficie sembrada, con un rendimiento similar a la media nacional. En los Valles Altos centrales de México existen

razas nativas como Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos que localmente se usan como elote hervido y para esquites que los agricultores han seleccionado por sus preferencias en calidad.

Se han estudiado otros maíces nativos para la producción de elote en varias regiones del país, medidos en rendimiento, tamaño de elote (longitud, diámetro, número de hileras, granos por hilera), tamaño de grano (longitud, ancho y grosor) (Ortiz-Torres *et al.*, 2013; Coutiño *et al.*, 2015), contenido de sólidos solubles totales (Coutiño *et al.*, 2010; Ortiz-Torres *et al.*, 2013), vida de anaquel (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010), y sabor de elote (Fernández-González *et al.*, 2014).

El oriente del Valle de México es una zona de alta densidad poblacional, y por ende de alta demanda de elotes. Sin embargo, en esta región no se han publicado estudios de elotes producidos por razas adaptadas a esta zona, ni de su uso en programas de mejoramiento genético enfocado a la formación de elotes. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar maíces nativos de las razas Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos en cuanto a la producción de elote, mediante variables de calidad, apariencia morfológica y rendimiento de elote; y 2) identificar a los progenitores y a las variables más convenientes para su uso potencial en el mejoramiento genético.

1.4. Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron 28 colectas de maíces nativos de México provenientes del Banco de Germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 10 de ellas pertenecientes a la raza Cacahuacintle, 15 a Elotes Cónicos y tres a Chalqueño, además del híbrido elotero comercial A7573 como testigo (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Colectas de maíces adaptados a Valles Altos usados para la caracterización de elote en Texcoco, Estado de México.

Raza	Colecta/Nombre comercial	Color	Textura de endospermo
	CPue185, CPue473, ZacQ12, Cacah529,	Blanco	Harinoso
Cacahuacintle	CPue487, CPue472, CPue491, CPue476, CPue482, CPue343		
	Hgo524, Hgo503, Hgo515, Hgo437,	Azul y vino	Semi-Cristalino
Elotes	Hgo4531, Hgo4541, Hgo4511, Hgo513,		
Cónicos	Vino, Hgo416, Hgo453-2, Hgo4512, Pue618, Hgo4542, Hgo415		
		Blanco	Semi-Dentado
Chalqueño	Mich195, Mex491, Hgo428	Crema	
Testigo	A7573	Blanco	Dentado

Sitio experimental

El crecimiento de las plantas se hizo en el ciclo primavera-verano de Texcoco, Estado de México, México (19° 29' N y 98° 53' O, a 2250 msnm), por dos años consecutivos (2015 y 2016). El clima del sitio es del tipo Cb (wo)(w)(i') g, correspondiente a templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18° C. El mes más frío varía entre 6.5 y 22 °C, y la precipitación media anual es de 637 mm (García, 1988).

Diseño y unidad experimental

La evaluación de los 28 genotipos de maíz arriba indicados, se hizo en cada uno de los dos ciclos agrícolas mediante un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de 6 surcos de 5 m de longitud y 0.8 m entre surcos, con 22 plantas útiles distanciadas a 0.5 m entre ellas, con una densidad de población estimada de 50 mil plantas ha⁻¹. El manejo agronómico fue bajo un régimen de riego y una dosis de fertilización de 180N-60P-0K aplicada en dos etapas, la primera en la siembra, con la mitad de nitrógeno (urea) y todo el fósforo (fosfato diamónico), y el resto del nitrógeno fue aplicado a los 45 d después de la siembra.

Variables morfológicas y rendimiento de elote

Para estas mediciones, en cada parcela la cosecha de elotes se hizo a los 20-21 días después de la floración femenina, ya que según Shelton y Tracy (2015) y Trimble *et al.* (2016) en este tiempo el grano está en la etapa óptima de consumo como elote (estado lechoso-masoso). Por tanto, la cosecha de cada parcela dependió de la fecha de floración de cada genotipo. La floración se registró cuando 50 % de las plantas mostraron la emergencia de los estigmas del jilote (inflorescencia femenina).

Se cosecharon cinco elotes de plantas con competencia completa, a los que se removieron todas sus brácteas. A cada elote se le registró longitud (LE, cm), diámetro (DE, cm), número de hileras (NH) y llenado de grano desde la base hasta la punta del elote (LL, %). Con esos datos se estimaron los rendimientos de elote entero sin hojas (RE, t ha⁻¹) y de grano fresco rebanado manualmente con un cuchillo (RGF, t ha⁻¹). Para estandarizar los datos de RE y RGF, sus contenidos de humedad se ajustaron a 70 % (Rice y Tracy, 2013; Williams, 2014) y a una densidad de 50 mil elotes ha⁻¹ (piezas potencialmente comercializables).

Variables de calidad de elote

Contenido de sólidos solubles totales (SST, ° Brix). Se evaluó en el extracto obtenido de una mezcla homogénea de granos rebanados de 25 elotes cosechados en la etapa de consumo. Para reducir al mínimo posible las actividades metabólicas del elote cortado, la cosecha se hizo en la mañana antes de la salida del sol y los elotes se mantuvieron en hielo hasta su procesamiento. La determinación (por triplicado) de SST se hizo con un refractómetro digital (Atago Pal-1[®], Tokio, Japón), en 300 µL del extracto.

Contenido de proteínas totales (PR). Se midió en una muestra homogénea de 100 g de grano fresco de 25 elotes rebanados, la cual se secó en una estufa a 70 ° C por 72 h para desecarlos parcialmente. El grano así desecado se trituró en un molino ciclónico por 3 min, y del total se tomaron tres submuestras para determinar el contenido de humedad en una estufa a 105 ° C por 24 h, para hacer los ajustes en el contenido final de nitrógeno (base seca). El contenido de proteína se determinó mediante el método Micro-Kjeldahl 46-13.01 (AACC, 1999).

Sabor de elote (SE). Se determinó mediante una prueba sensorial ante un panel no entrenado de 40 personas (mujeres y hombres de tres grupos de edades, < 30, 30-50 y > 50 años) en cada año

de evaluación. Para preparar el elote cocido, 1 kg de grano en etapa de consumo (esquite) de cada genotipo se coció inmediatamente con agua simple embotellada por 1 h (desde el encendido del equipo y todo con el mismo nivel de regulación) en una parrilla eléctrica. Después de la cocción, se sirvieron porciones de 50 g de elote cocido. Las muestras fueron presentadas al grupo de panelistas a temperatura típica de consumo ($\approx 45^\circ\text{C}$) en vasos de plástico (30 mL). El orden de degustación de las muestras para cada persona fue aleatorio (Cuadro 1 A), y entre la evaluación de cada muestra los panelistas consumieron agua simple embotellada para lavar el paladar. A cada muestra se le evaluó el sabor en una escala hedónica de 9 puntos (Cuadro 2 A) en donde 1: me disgusta en extremo y 9: me gusta en extremo) (Stone *et al.*, 2012).

Análisis estadístico

A cada variable se le hizo análisis de varianza combinado para años después de verificar el supuesto de distribución normal. La variable diámetro de elote no se ajustó a la distribución normal ni con la transformación de datos, por lo que se aplicó análisis de varianza no paramétrico mediante la asignación de rangos combinado con la prueba de Friedman (Friedman, 1937). La prueba de comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Se calcularon coeficientes de correlación de Spearman debido a que no todas las variables cumplieron con la distribución normal, para identificar relaciones lineales entre pares de variables, y también se realizó un análisis de correlación canónica entre variables de calidad y morfológicas más rendimiento; ambos análisis de correlación se hicieron con datos estandarizados a la normal con media igual a 0 y varianza igual a la unidad, para homogeneizar las escalas de medición entre las variables. Además, se hizo un análisis de componentes principales con base en la matriz de correlaciones para determinar el valor descriptivo de cada una de ellas a la variabilidad observada. Todos los análisis de datos se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.0 (SAS Institute, 1999).

1.5. Resultados y discusión

Análisis de varianza

Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas entre genotipos ($P \leq 0.05$) para todas las variables evaluadas, excepto para la longitud de llenado de grano (Cuadro 2). El efecto de años no fue significativo en sabor de elote; es decir, el consumidor detectó diferencias entre genotipos, pero no entre años. La interacción $G \times A$ no tuvo efectos en la calidad de elote, pero sí en la apariencia física (LE) y en rendimiento (RGF).

Cuadro 1.2. Cuadrados medios de los análisis de varianza efectuados en la evaluación de 28 maíces nativos para atributos de elote. Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2015 y 2016.

Fuente de Variación	Calidad			Apariencia visual				Rendimiento	
	SST [‡]	PR	SE	LE	LL	DE	NH	RE	RGF
Genotipos (G)	2.9*	2.9***	0.6**	9.1***	17.4 ^{ns}	775.8***	14.0***	14.1***	3.3***
Años (A)	9.4*	12.8**	0.4 ^{ns}	23.0***	18.4 ^{ns}	1527.9***	0.1 ^{ns}	139.3***	86.9***
G x A	1.3 ^{ns}	1.4 ^{ns}	0.3 ^{ns}	1.7*	13.6 ^{ns}	144.9 ^{ns}	0.7 ^{ns}	2.1 ^{ns}	1.4*
Repeticiones/A	8.5**	0.6 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.8 ^{ns}	0.4 ^{ns}	14.0 ^{ns}	1.1 ^{ns}	1.9 ^{ns}	1.1 ^{ns}
Error	1.5	0.8	0.3	0.9	9.1	92.0	0.5	1.3	0.8
CV (%) [†]	11.6	8.2	8.1	5.4	3.5	6.3	5.4	12.5	17.3

*, **, *** Significativo con $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.001$, respectivamente; ^{ns} No significativo; [‡]SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas; SE, sabor; LE, longitud; DE, diámetro; LL, llenado de grano; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco; [†]CV, Coeficiente de variación.

Estas diferentes expresiones de elote observadas entre las colectas de maíz indica que la

variabilidad genética detectada entre las poblaciones caracterizadas representa una oportunidad para iniciar un programa de mejoramiento genético para la producción de elote entero y de grano para ‘esquites’ en el oriente del Valle de México, variedades que podrían aprovecharse en otras localidades de Valles Altos.

Calidad de elote

Se identificaron maíces nativos que superaron en calidad de elote al híbrido testigo A7573, en contenidos de sólidos solubles totales (SST) y proteínas totales (PR), así como en sabor (SE), como se ilustra en la Figura 1. El valor de SST se usa como una medida indirecta del contenido de azúcares, ya que incluye también ácidos orgánicos, vitaminas, compuestos fenólicos, pectinas, etc., y se incrementa con la acumulación de azúcares en el elote (Favarato *et al.*, 2016). Una colecta de la raza Chalqueño (Mich-195) sobresalió con 13.6 ° Brix, aunque Coutiño *et al.* (2010) reportaron un contenido aún mayor (15.2 °Brix) en la variedad ‘Campechano’ de la raza Tuxpeño en Chiapas.

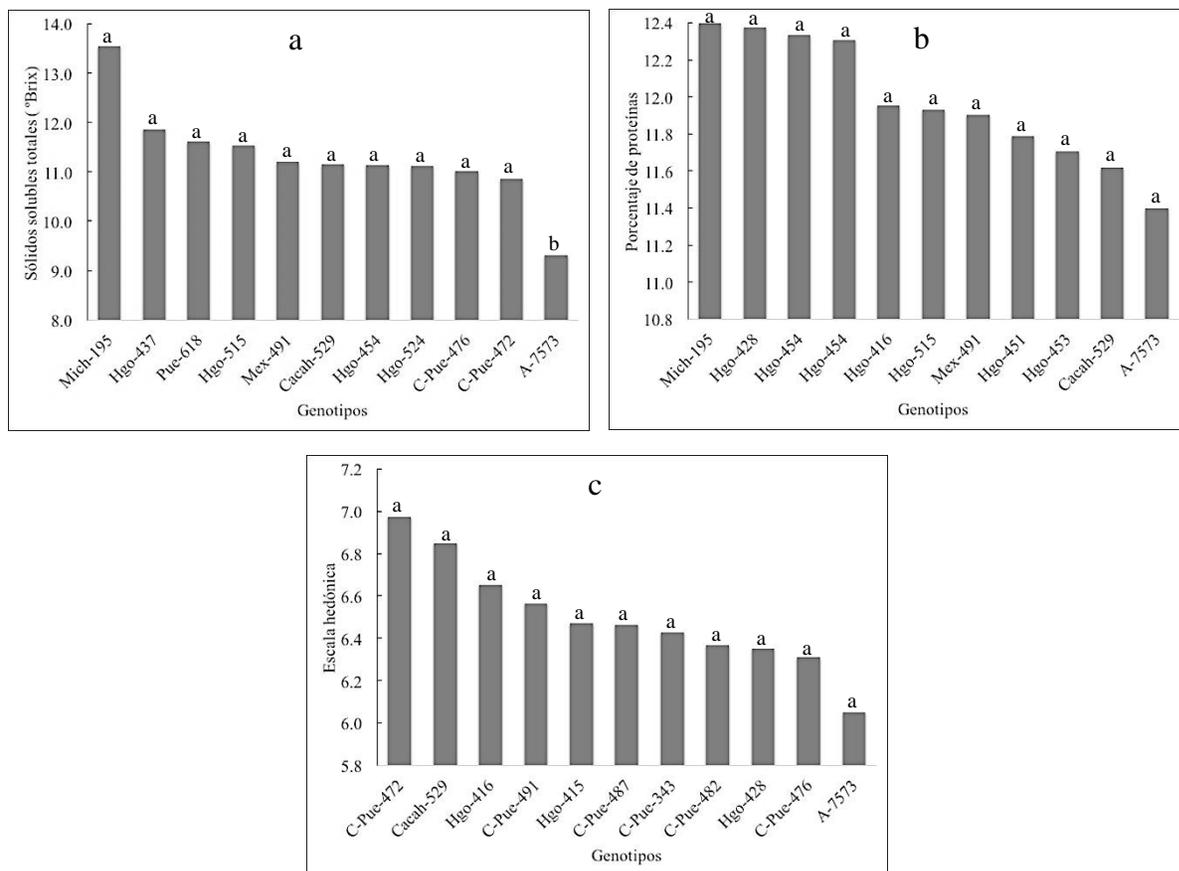


Figura 1.1. Atributos de calidad de elote de los primeros diez maíces nativos sobresalientes y del testigo comercial con base en: a) contenido de sólidos solubles totales; b) contenido de proteínas; c) sabor de elote.

De acuerdo con Coutiño *et al.* (2015), para la mayoría de los mercados de México el dulzor del elote no es un carácter que determina la preferencia de los compradores; sin embargo, el dulzor es un factor muy importante en los mercados de Estados Unidos, Canadá, India y de Asia (Singh *et al.*, 2014). En SST los maíces dulces llegan a alcanzar hasta 24-30 ° Brix en etapa de elote, que los coloca como productos de calidad para la agroindustria del procesado (Luchsinger y Camilo, 2008).

En contenido de proteínas destacaron los maíces Chalqueños y Elotes Cónicos con contenidos

de 12 %, superiores al testigo y a otros grupos de maíces nativos con promedios de 10.3 % (Vidal *et al.*, 2008) y 11.9 % (Vera-Guzmán *et al.*, 2012). Estos dos grupos de investigadores indican que estos contenidos de proteína son semejantes a los de testigos de alta calidad proteínica, pero difieren en las proporciones de aminoácidos esenciales como lisina y triptófano, los cuáles se han asociado con bajos contenidos de proteína (Vidal *et al.*, 2008).

El método más eficiente para evaluar el sabor del elote (SE) es mediante la degustación de los mismos en la etapa de consumo para el mercado (Lertrat y Pulam, 2007). Aquí sobresalió la colecta CPue472 de la raza Cacahuacintle entre todos los genotipos evaluados (Cuadro 1A), por haber sido calificado como el elote de mejor sabor por el panel de evaluación sensorial, lo que puede dar una perspectiva de las preferencias de consumo para los Valles Altos de México. Las calificaciones más bajas en SE ($\sim 5.5^\circ$ Brix) se asociaron con la coloración de grano azul, que correspondieron con Elotes Cónicos (Cuadro 1A). La apariencia de estos granos, al momento de presentarlos ante los panelistas, causaron curiosidad hasta compararse con un plato de frijoles negros (*Phaseolus vulgaris*), un alimento básico en la dieta mexicana.

Coutiño *et al.* (2015) indicaron que los productores y amas de casa de Chiapas manifestaron que las variedades de grano negro, rojo y amarillo producen elotes de mejor sabor y dulzura que los blancos, lo cual indica variación en las preferencias regionales en este aspecto. En nuestro estudio las preferencias de elote para mujeres y hombres fue un color de grano blanco. La mitad de los participantes registró una edad menor a 30 años, quienes prefirieron granos de color blanco (71.4 %). Para personas entre 30-50 y >50 años, el color de grano favorito fue el amarillo crema (43.8 y 57.1 %, respectivamente).

Se encontraron genotipos con calidad comparable a otras razas nativas ya estudiadas, por lo que

el mejoramiento genético con los materiales aquí identificados es promisorio. Para incrementar el dulzor del elote y competir en el mercado de maíces dulces, se puede recurrir a las razas Dulces de México, como Dulce de Jalisco o Dulcillo del Noroeste, que se caracterizan por un sabor dulce del elote y con esto poder ofrecer un producto aceptable para el consumidor.

Características morfológicas del elote

Los genotipos mostraron diferencias significativas en la apariencia física de elote (Figura 2), excepto para llenado de grano que presentó una media de 86.4 %. El largo de elote fluctuó en el intervalo de 15.5 (Elotes Cónicos) a 19.8 cm (Cacahuacintle); sus diámetros variaron de 3.8 (Elotes Cónicos) a 5.1 cm (Cacahuacintle); y tenían al menos 16 hileras en Chalqueño y Elotes Cónicos. Según Coutiño *et al.* (2015), la longitud y diámetro son las características que más atienden los compradores de elote en algunos mercados, mientras que en otros los consumidores prefieren que las hileras sean rectas y con granos llenos hasta la punta del elote (Shelton y Tracy, 2015).

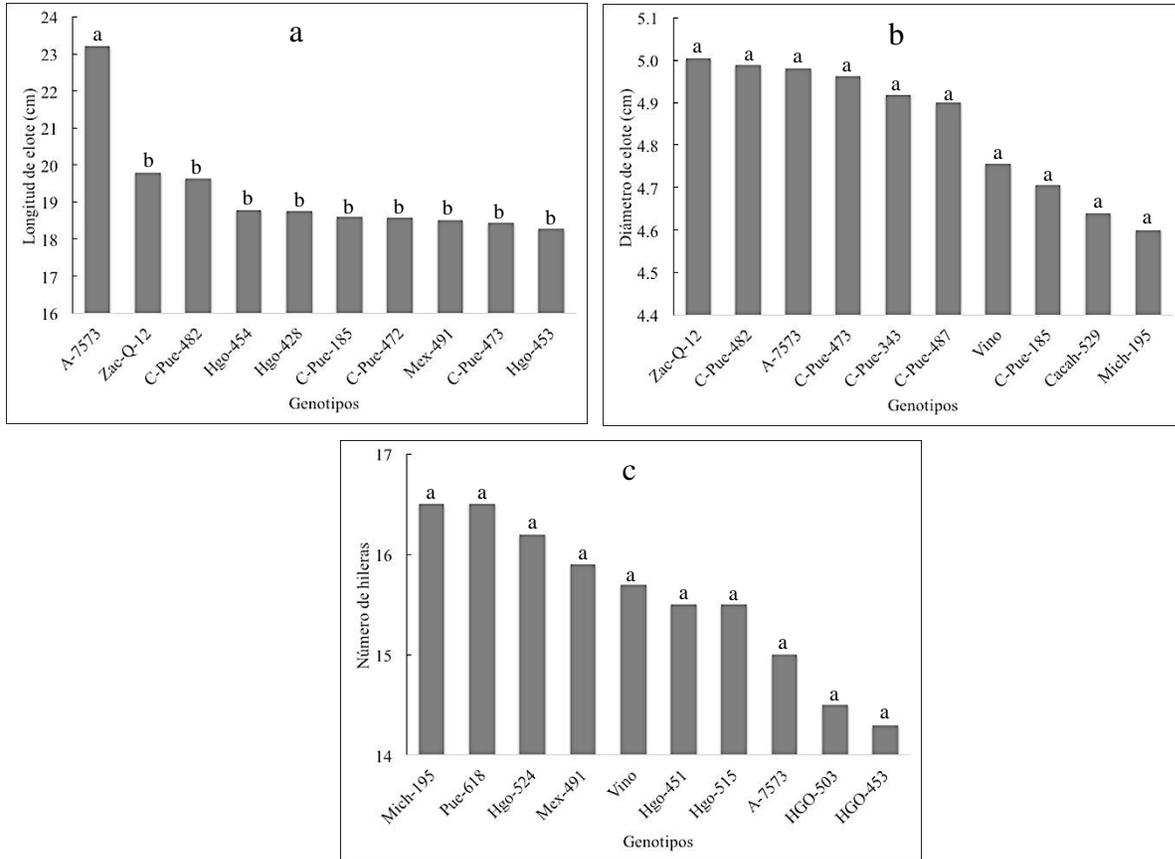


Figura 1.2. Variables morfológicas: a) longitud; b) diámetro; y c) número de hileras en los elotes de los primeros diez genotipos sobresalientes.

Entre todos los materiales aquí evaluados (Cuadro 1A) se encontraron genotipos con diferentes tamaños de elote, lo cual podría satisfacer a varios mercados o preferencias personales. Solamente en longitud de elote el testigo híbrido superó a las colectas nativas.

Rendimiento en fresco

La venta de elote entero se hace por pieza, y el aspecto físico o morfológico y tamaño de éste debe satisfacer características particulares para cada mercado. Para los esquites se toma en cuenta sólo la cantidad de grano que se obtiene del elote, una mezcla de granos chicos, medianos y

grandes. Algunos maíces de la raza Cacahuacintle fueron similares en rendimiento de elote entero y de grano fresco que el híbrido testigo (Figura 1.3).

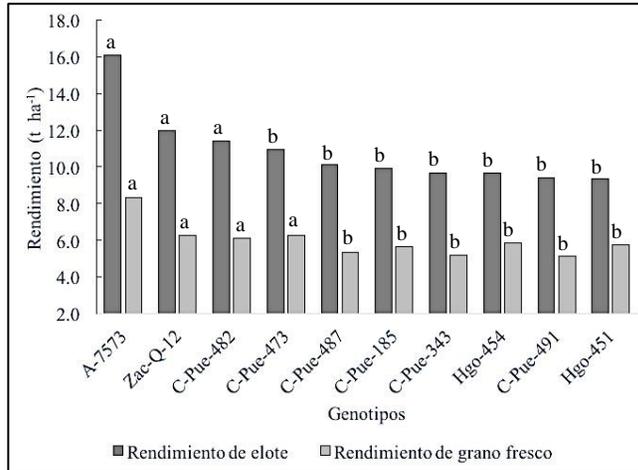


Figura 1.3. Rendimiento de elote entero y de grano fresco de los diez genotipos más sobresalientes. Medias con la misma letra dentro de cada tipo de barra son estadísticamente iguales.

En rendimiento de elote entero (RE), ZacQ12 produjo 12.0 t ha⁻¹, 4.1 (25.5 %) toneladas menos que el testigo A7573 (16.1 t ha⁻¹). El principal estado productor de elote en México para el año 2019 fue Puebla, y el rendimiento promedio fue de 13.3, lo que puede deberse a una menor tecnificación en su sistema de producción, al uso de variedades nativas o ambos casos. Aguascalientes fue el que tuvo mayor rendimiento de elote con 24.0 t ha⁻¹, aunque sólo se sembraron 1, 317 ha, menos que el Estado de México con 4, 313 ha pero más que la Ciudad de México con 902 ha.

En rendimiento de grano fresco para esquite (RGF), el maíz nativo CPue473 obtuvo 6.3 t ha⁻¹, inferior al testigo con 8.3 t ha⁻¹. Esta última variable es importante para la industria del procesado de elote (Luchsinger y Camilo, 2008; Williams, 2014), donde predominan variedades dulces para

enlatado y congelado. Para maíces no dulces como los de este estudio, su uso se asocia con la producción de esquites. En razas de maíces nativos de México, el RGF no se ha medido directamente, aunque se puede estimar por la longitud y diámetro de elote, y por la profundidad, grosor y ancho del grano. Un genotipo con mayor RGF esté relacionado con una menor proporción de elote, es decir, presenta granos profundos y esto puede mejorar la calidad y aceptación del producto en el mercado. Sin embargo, puede haber un límite en grosor del elote debido a que la venta de elote entero hervido se le pone un mango de palo que se inserta en el elote y esto puede ocasionar un orificio que puede romper completamente esta estructura si el diámetro es pequeño.

Se encontraron maíces criollos con buen rendimiento de elote, principalmente de la raza Cacahuacintle. Para incursionar en el mercado nacional es necesario iniciar con un programa de mejoramiento genético que permita igualar y hasta superar al híbrido comercial en tamaño de elote y ser competitivos en el mercado.

Relación entre variables de elote

El análisis de correlación canónica reveló que las variables de calidad están altamente relacionadas con las morfológicas y rendimiento ($r = 0.72^{***}$), lo que indica que existe una fuerte asociación directa entre los dos grupos de variables. Tal asociación puede aprovecharse para la selección indirecta de genotipos en los programas de mejoramiento genético en la región de estudio. También se encontraron relaciones lineales simples significativas ($P \leq 0.05$) entre las variables de elote (Cuadro 3). Se identificaron relaciones negativas entre variables de calidad (SST y PR), morfológicas (DE) y de rendimiento (RE y RGF), esto es, un elote de buena calidad no es el de mayor tamaño ni el que más rinde.

Cuadro 1.3. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables de elote de 28 maíces nativos adaptados a Valles Altos de México durante 2015 y 2016.

Variable	SST	PR	SE	LE	LL	DE	NH	RE	RGF
PR	0.11 ^{ns}	1.00							
SE	-0.13 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	1.00						
LE	-0.28 [*]	-0.06 ^{ns}	0.34 ^{**}	1.00					
LL	-0.07 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.41 ^{**}	1.00				
DE	-0.26 [*]	-0.35 ^{**}	0.14 ^{ns}	0.35 ^{**}	-0.06 ^{ns}	1.00			
NH	0.15 ^{ns}	0.15 ^{ns}	-0.55 ^{***}	-0.43 ^{***}	-0.18 ^{ns}	0.14 ^{ns}	1.00		
RE	-0.25[*]	-0.32[*]	0.14 ^{ns}	0.60^{***}	0.13 ^{ns}	0.80^{***}	0.11 ^{ns}	1.00	
RGF	-0.33 [*]	-0.31 [*]	0.07 ^{ns}	0.48 ^{***}	0.20 ^{ns}	0.65 ^{***}	0.19 ^{ns}	0.88^{***}	1.00

^{*}, ^{**}, ^{***} Significativo con $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.001$, respectivamente; [†] ns, sin diferencias significativas; [‡]SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas totales; SE, sabor; LE, longitud; LL, llenado de grano; DE, diámetro; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco.

El sabor de elote no se relacionó con SST, lo cual indica que la preferencia de los consumidores del panel de sabor aquí participante no está relacionada con el dulzor, como también fue reportado por Fernández-González *et al.* (2014), pero contrario a lo que encontraron Coutiño *et al.* (2010) y Gere *et al.* (2014). El rendimiento de elote entero y de grano fresco correlacionó positivamente ($P \leq 0.001$) con LE y DE; sin embargo, también se detectó una relación negativa con SST y PR ($P \leq 0.05$), lo que dificulta el mejoramiento genético simultáneo para ambos grupos de variables. Con las relaciones identificadas entre las variables de elote es posible mejorar el proceso de selección de genotipos mediante selección indirecta, por ejemplo, mejorar el rendimiento al seleccionar sólo por el diámetro de elote ($r=0.80^{***}$).

Importancia relativa de las variables

Un genotipo con buen comportamiento agronómico no siempre conjunta las mejores características de calidad, morfológicas y de rendimiento de elote. El grupo de variables correlacionadas con el rendimiento de elote, variable de mayor importancia, estuvo integrado por SST (-0.25*), PR (-0.32*), LE (0.60***), DE (0.80***), y RGF (0.88***). De acuerdo con el análisis de componentes principales (Cuadro 1. 4) del grupo de variables evaluadas, los tres primeros explicaron el 81 % de la variación fenotípica observada.

Cuadro 1.4. Vectores y valores propios de los primeros tres componentes principales de nueve variables de atributos de elote en 28 maíces nativos de Valles Altos de México durante 2015 y 2016.

Variable original	CP1	CP2	CP3
SST	-0.26	0.22	0.10
PR	-0.20	0.02	0.67
SE	0.10	-0.53	-0.18
LE	0.44	-0.21	0.26
LL	0.21	-0.27	0.53
DE	0.39	0.23	-0.33
NH	0.00	0.65	0.18
RE	0.51	0.15	0.06
RGF	0.49	0.22	0.10
Valor propio	3.43	1.87	1.19
Varianza explicada	0.38	0.21	0.13
Varianza acumulada	0.38	0.59	0.72

Las variables de mayor importancia en función de su participación en los vectores propios fueron RE, RGF, LE y DE (CP1); de éstas, LE y DE ofrecen una mejor alternativa práctica para

seleccionar genotipos de alto rendimiento con menor esfuerzo que el requerido para estimar rendimientos, y al mismo tiempo mejorar las características físicas de elote. Sabor de elote (SE) también puede usarse como variable de selección (CP2) para mejorar la calidad del elote, sin embargo, reduciría el número de hileras del elote, como se observó en el análisis de correlación (-0.55^{***}). Esto puede ser una característica desfavorable para una buena apariencia física que buscan los compradores de elote, como lo mencionan Coutiño *et al.* (2010). Para tener un producto de calidad en el mercado de elotes, es recomendable complementar el uso de correlaciones y componentes principales con los índices de selección para mejorar caracteres de calidad y rendimiento al mismo tiempo.

1.6. Conclusiones

Se identificaron genotipos de maíz nativo con características morfológicas y rendimiento de elote muy cercanos al híbrido comercial, pero hay maíces nativos superiores al testigo comercial en sólidos solubles totales, que es una medida del dulzor. La diversidad genética detectada en los maíces nativos puede satisfacer diferentes tipos de mercados locales para el consumo de elote entero o para esquites. Es conveniente y necesario el mejoramiento genético de las razas nativas para características morfológicas para competir en el mercado nacional de elotes.

1.7. Literatura citada

- AACC (American Association of Cereal Chemists). 1999. Official Methods of Analysis. ACCI Method 46-13.01, Crude Protein–Micro-Kjeldahl Method. 11th edition. St. Paul Minnesota, USA. <http://dx.doi.org/10.1094/AACCIntMethod-46-13.01>.
- Coutiño E., B.; V. A. Vidal M., B. Cruz G., y C. Cruz V. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (Num. Esp. 4): 57-61.
- Coutiño E., B., V. A. Vidal M., C. Cruz V., y M. Gómez G. 2015. Características eloterías y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1119-1127.
- Favarato, L. F., J. L. De Souza, J. C. C. Galvão, C. M. De Souza, J. M. S. Balbino, and R. C.

- Guarçoni. 2016. Qualitative attributes and postharvest conservation of green ears of maize grown on different cover crops in organic no-till system. *Revista Ceres* 63: 532-537.
- Fernández-González, I., J. L. Jaramillo-Villanueva, J. A. Hernández G., y P. Cadena-Íñiguez. 2014. Evaluación agronómica y sensorial de ocho genotipos de maíz (*Zea mays* L.) para la producción de elote. *Agroproductividad* 7: 47-51.
- Friedman, M. 1937. The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association* 32: 675-701.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía. UNAM, México, D.F. 217 p.
- Gere, A., V. Losó, A. Györey, S. Kovács, L. Huzsvai, A. Nábrádi, Z. Kókai, and L. Sipos. 2014. Applying parallel factor analysis and Tucker-3 methods on sensory and instrumental data to establish preference maps: case study on sweet corn varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94: 3213-3225.
- Lertrat, K., and T. Pulam. 2007. Breeding for increased sweetness in sweet corn. *International Journal of Plant Breeding* 1: 27-30.
- Luchsinger L., A., y F. Camilo F. 2008. Rendimiento de maíz dulce y contenido de sólidos solubles. *IDESIA (Chile)* 26: 21-29.
- Ortiz-Torres, E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, J. A. Hernández-Guzmán, y M. Valadez-Ramírez. 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19: 225-238.
- Rice, R. R., and W. F. Tracy. 2013. Combining ability and acceptability of temperate sweet corn inbreds derived from exotic germplasm. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 138: 461-469.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do.
- SAS Institute. 1999. SAS Procedures Guide, Release 8.0. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1643 p.
- Shelton, A. C., and W. F. Tracy. 2015. Recurrent selection and participatory plant breeding for improvement of two organic open-pollinated sweet corn (*Zea mays* L.) population. *Sustainability* 7: 5139-5152.
- Singh, I., S. Langyan and P. Yadava. 2014. Sweet corn and corn-based sweeteners. *Sugar Technology* 16(2): 144-149.
- Stone, H., R. N. Bleibaum, and H. A. Thomas. 2012. *Sensory Evaluation Practices*. Fourth edition. Academic Press. San Diego, CA, USA. 438 p.

- Trimble, L., S. Shuler, and W. F. Tracy. 2016. Characterization of five naturally occurring alleles at the Sugary1 locus for seed composition, seedling emergence, and isoamylase1 activity. *Crop Science* 56: 1927-1939.
- Valdivia-Bernal, R., F. J. Caro-Velarde, R. Medina-Torres, M. Ortiz-Catón, A. Espinosa-Calderón, V. A. Vidal-Martínez, y A. Ortega-Corona. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloterías de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Núm. Esp. 4): 63-67.
- Vera-Guzmán, A. M., J. L. Chávez-Servia, y J. C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Proteína, lisina y triptófano en poblaciones nativas de maíz Mixteco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35 (Núm. Esp. 5): 7-13.
- Vidal M., V. A., G. Vázquez C., B. Coutiño E., A. Ortega C., J. L. Ramírez D., R. Valdivia B., M. J. Guerrero H., F. J. Caro V., y O. Cota A. 2008. Calidad proteínica en colectas de maíces criollos de la sierra de Nayarit, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31 (Núm. Esp. 3): 15-21.
- Williams, M. M. II. 2014. Few crop traits accurately predict variables important to productivity of processing sweet corn. *Field Crops Research* 157: 20-26.

APÍTULO II. MAÍCES NATIVOS MEXICANOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELOTE EN EL BAJÍO²

2.1. Resumen

La producción de elote en el bajío mexicano se hace a través de la siembra de híbridos comerciales. Existen maíces nativos en ésta área que se consumen en menor cantidad y se encuentran en mercados pequeños u orillas de carretera para su venta. El objetivo de este estudio fue caracterizar elotes de dos razas de maíz nativo adaptadas al Bajío y otro del Noroeste de México. Se evaluaron 14 colectas de las razas Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste en Celaya, Guanajuato en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Se midió la calidad mediante el contenido de sólidos solubles totales y de proteínas, además de variables morfológicas y rendimiento de elote. Se realizó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey. Los maíces nativos alcanzaron contenidos de sólidos solubles de 22.5 ° Brix y proteínas de 13.6 %. En variables morfológicas se registraron longitudes de elote de 23.6 cm que superaron al testigo, diámetros de 5.2 cm y 16 hileras rectas. En rendimientos los maíces nativos registraron 14.6 t ha⁻¹ de elote entero y 9.6 t ha⁻¹ de grano fresco rebanado. Existe variabilidad en los maíces nativos para satisfacer preferencias de consumo de elote entero y de grano rebanado en el Bajío mexicano.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz dulce, grados Brix.

² En preparación para su envío a alguna revista.

2.2. Abstract

Corn on the cob production at the Mexican midlands it is done through commercial hybrids. There are native maize in this area that are consumed in smaller quantities and are found in local markets or roadside for sale. The objective of this study was to characterize immature ears from two maize landraces adapted to Mexican midlands and another from the northwest of Mexico. We evaluated 14 accessions belonging to races Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco and Dulcillo del Noroeste in Celaya, Guanajuato under a randomized complete block design with two replications. Quality was measured through total soluble solids contents and protein content, in addition to morphological traits and yield. An analysis of variance and comparison of means by Tukey's test were applied. Native maize showed soluble solids contents of 22.5 °Brix and protein content of 13.6 %. In morphological traits, the landraces produced ear of 23.6 cm that exceeded the control, diameter of 5.2 cm and 16 straight rows. The yield of native maize reached 14.6 t ha⁻¹ of fresh unhusked ears and 9.6 t ha⁻¹ of fresh kernels. There is variability in native maize to satisfy the consumption preferences of tender corn and fresh kernels in the Mexican midlands population.

Palabras clave: *Zea mays*, sweet corn, degrees Brix.

2.3. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de cultivos más importantes en la dieta mexicana. Un consumo popular entre la población es en forma de elote, cuando el grano se encuentra en un estado lechoso-masoso, con un contenido de humedad entre 70 y 80 % (Silva *et al.*, 2006; Williams II, 2014). Tal consumo es como elote entero hervido o asado, o cocinado en forma de “esquites”, platillo en el que los granos se separan del olote y se cuecen en agua adicionada con condimentos que dependen de cada región. En otros países, como Estados Unidos, el elote se usa para la industria del procesado de alimentos en forma de enlatado y congelado (Tracy, 1993; Lertrat y Pulam, 2007; Singh *et al.*, 2014) y se cosechan de maíces que se caracterizan por un sabor dulce y alcanzan de 24 a 30 ° Brix (Luchsinger y Camilo, 2008). Tan alta dulzor se debe a mutaciones recesivas ocurridas de manera natural en genes que controlan la conversión de azúcares en almidón en el endospermo de los granos de maíz (Tracy, 1997), y que dieron origen al llamado “maíz superdulce”.

En México, la producción comercial de elote se basa en materiales no dulces, y el híbrido A-7573 es el más usado para este fin (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010), por su elote de gran tamaño y buena apariencia física, lo que resulta atractivo para la mayoría de los consumidores del mercado mexicano. Por su parte, los agricultores cuentan con sus propios maíces nativos dulces y no dulces que han mantenido para satisfacer sus preferencias de elote a nivel local, pero sin haberlos sometido a algún esquema de mejoramiento genético formal.

Para que un elote sea comercializable debe de tener las características propias del mercado; por

ejemplo, una longitud superior a 14 cm (Luchsinger y Camilo, 2008; Marshall y Tracy, 2003; Shelton y Tracy, 2015), al menos 16 hileras rectas y con granos llenos hasta la punta del elote (Shelton y Tracy, 2015). Los programas de mejoramiento para el desarrollo de variedades eloterías, además del rendimiento y características físicas del elote, también se han centrado en la búsqueda de una mejor calidad, como un buen sabor y textura, alto contenido de azúcares (Matos *et al.*, 2007), así como una larga vida de anaquel (Lertrat y Pulam, 2007), de tal manera que el producto resultante sea agradable de comer y sea durable (Shelton y Tracy, 2015).

En algunas razas de maíces nativos de México se ha detectado potencial genético para la producción de elote, como en las razas Jala (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010), Cacahuacintle (Arellano *et al.*, 2010), Tuxpeño (Coutiño *et al.*, 2010), maíces de diferentes coloraciones en el grano (Ortiz-Torres *et al.*, 2013; Coutiño *et al.*, 2015) y en variedades comerciales (Fernández-González *et al.*, 2014). Estos estudios fueron dirigidos a características de elote relacionadas con rendimiento, contenido de sólidos solubles totales, vida de anaquel, sabor de elote y apariencia física como tamaño de elote (longitud, diámetro, número de hileras, granos por hilera) y tamaño de grano (longitud, ancho y grosor).

En El Bajío mexicano hay alta demanda de elote, así como alta diversidad de variedades usadas para este fin, incluyendo maíces con el sabor dulce característico de los genotipos usados para el enlatado y congelado pero que aquí se consumen como elote entero hervido. En esta misma zona se usa la raza Elotes Occidentales se usa para la producción de elote, aunque en menor escala que los híbridos comerciales. También se encuentran dos razas de maíces dulces: Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste (SEMARNAT, 2012), los cuales podrían considerarse como una opción más

para el consumo de elotes y para en la industria alimentos procesados. No hay información científica sobre el potencial de las razas de maíz antes mencionadas para la producción de elote en esta región.

Los objetivos de este estudio fueron: a) identificar genotipos de razas de maíces dulces y no dulces para el consumo como elote entero y esquites mediante variables de calidad, apariencia física y rendimiento; y b) encontrar relaciones simples entre las variables calidad, apariencia morfológica y rendimiento de elote para su uso en el mejoramiento genético.

2.4. Materiales y métodos

Material vegetal

Se evaluaron 14 colectas de maíces nativos de México (Cuadro 2.1), una de ellas perteneciente a la raza Elotes Occidentales, 11 a Dulce de Jalisco y dos a Dulcillo del Noroeste (Figura 2.1); además se incluyó al híbrido elotero comercial A-7573 como testigo por ser el de mayor extensión en México para la producción comercial de elote.

Cuadro 2.1. Colectas de maíces dulces y no dulces usados para la caracterización de elote sembrados en Roque, Celaya, Guanajuato, México.

Raza	Colecta/Nombre comercial	Características físicas del grano	
		Color	Tipo de endospermo
Elotes Occidentales	Roque	Rosa	Harinoso
Dulce de Jalisco	Jal204, Guan141, Jali304, Jali300, Zac1821,	Amarillo,	y Dulce
	Sina88, Chih235, Zac79, Jal300, Zac182-2, Gto100	Rojo Naranja	
Dulcillo del Noroeste	Son140, Sin34	Amarillo,	y Dulce
		Rojo Naranja	
Testigo comercial	A7573	Blanco	Dentado

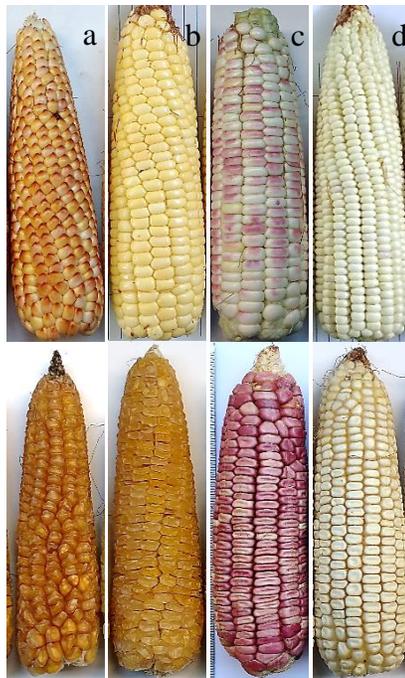


Figura 2.1. Mazorcas de razas de maíces dulces y no dulces en etapa de elote (panel superior) y con grano seco (panel inferior) de a) Dulce de Jalisco, b) Dulcillo del Noroeste, c) Elotes Occidentales y d) A7573.

Sitio y diseño experimental

Las evaluaciones experimentales se realizaron en el ciclo primavera-verano por dos años consecutivos (2015 y 2016) en el campo agrícola del Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Guanajuato (20°34' N y 100°49' O, a 1767 msnm). En cada año se usó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de 2 surcos de 5 m de longitud y 0.8 m entre surcos, con 22 plantas útiles distanciadas a 0.5 m entre ellas, con una densidad de población estimada en 50 mil plantas ha⁻¹. El manejo fue bajo un régimen de riego y una fertilización de 120N-60P-0K en una sola aplicación a los 45 días después de la siembra.

Variables de calidad de elote

Se midió el contenido de sólidos solubles totales (SST, °Brix) mediante un extracto obtenido de una mezcla homogénea de granos rebanados de cinco elotes en la etapa de consumo. Para mantener al mínimo posible las actividades metabólicas del elote cosechado, la cosecha se realizó en la mañana antes de la salida del sol y los elotes se mantuvieron en hielo hasta su procesamiento, aproximadamente dos horas después. La determinación (por triplicado) de SST se hizo con un refractómetro digital (Atago Pal-1[®], Tokio, Japón) en 300 µL del extracto.

Se determinó el contenido de proteínas totales (PR, %) en una muestra homogénea de 100 g de grano fresco de cinco elotes rebanados, la muestra se secó en una estufa a 70 ° C por 72 h para desecarlos parcialmente. El grano desecado fue triturado en un molino ciclónico por 3 min, y del total se extrajeron tres submuestras para determinar el contenido de humedad en una estufa a 105 ° C por 24 h para hacer los ajustes en el contenido final de nitrógeno (base seca). El contenido de proteína se determinó mediante el método Micro-Kjeldahl 46-13.01 (AACC, 1999).

Variables de apariencia física y rendimiento de elote

Para estas mediciones, en cada parcela la cosecha de elotes se hizo a los 20-21 días después de la floración femenina, ya que, según Shelton y Tracy (2015) y Trimble *et al.* (2016), en esta edad el grano está en la etapa óptima de consumo como elote (estado lechoso-masoso); por lo tanto, la cosecha de cada parcela dependió de la fecha de floración de cada genotipo. La floración se registró cuando 50 % de las plantas mostraron la emergencia de los estigmas del jilote (inflorescencia femenina).

Se cosecharon cinco elotes de plantas con competencia completa, a los que se removieron todas sus brácteas. A cada elote se le registró longitud (LE, cm), diámetro (DE, cm) y número de hileras (NH). Con esos datos se estimaron los rendimientos de elote entero sin hojas (RE, t ha⁻¹), de grano fresco rebanado manualmente con un cuchillo (RGF, t ha⁻¹). Para estimar el rendimiento de grano seco (RGS, t ha⁻¹), las mazorcas de la parcela se cosecharon después de que alcanzaron la madurez fisiológica. Para estandarizar los datos de RE y RGF, sus contenidos de humedad se ajustaron a 70 % (Rice y Tracy, 2013; Williams, 2014) y considerando una cantidad de 50 mil elotes ha⁻¹ (piezas potencialmente comercializables), en correspondencia con la densidad de población utilizada. En el RGS, la humedad se ajustó a 14 % y se cuantificó la producción obtenida en toda la superficie útil de la parcela.

Análisis estadístico

A cada variable se le aplicó análisis de varianza combinado para años; previamente, se verificó el supuesto de distribución normal. La prueba de comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Se calcularon coeficientes de correlación de Pearson para identificar relaciones

lineales entre pares de variables con datos estandarizados a la normal con media igual a 0 y varianza igual a la unidad, para homogeneizar las escalas de medición entre las variables. Todos los análisis de datos se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.0 (SAS Institute, 1999).

2.5. Resultados y discusión

Análisis de varianza

Se encontraron diferencias significativas en el comportamiento de los genotipos y en todas las variables evaluadas ($P \leq 0.01$) en los atributos de elote medidos (Cuadro 6). No se detectaron diferencias entre años (ambientes), excepto en el contenido de sólidos solubles totales de los elotes atribuido a la influencia ambiental. Se detectó interacción genotipo \times ambiente en rendimiento de grano seco (RGS).

Cuadro 2.2. Cuadrados medios del análisis de varianza de 15 maíces dulces y no dulces para atributos de elote. Celaya, Guanajuato, 2015 y 2016.

Fuentes de Variación	Calidad		Apariencia física			Rendimiento		
	SST	PR	LE	DE	NH	RE	RGF	RGS
Genotipos (G)	1.2***	7.2**	16.3**	0.25**	13.7***	15.0***	7.0**	2.5**
Años (A)	1.3*	0.1 ns	8.4 ns	0.01 ns	0.3 ns	5.4 ns	0.2 ns	2.7 ns
G \times A	0.2 ns	0.1 ns	1.4 ns	0.07 ns	2.4 ns	3.9 ns	2.1 ns	3.2**
Repeticiones/A	0.3 ns	1.8 ns	0.1 ns	0.12 ns	5.9 ns	1.9 ns	1.0 ns	5.5**
Error	0.2	2.0	2.5	0.07	2.6	2.9	2.1	1.0
CV (%)	10.4	12.7	8.3	5.3	11.4	14.4	20.1	16.7

*, **, ***Significativo con $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.001$, respectivamente; ns, no significativo; SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas; LE, longitud; DE, diámetro; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco; RGS, rendimiento de grano seco; CV, coeficiente de variación.

La variabilidad observada en las expresiones fenotípicas de los genotipos ha sido encontrada en otras razas nativas de México para otras regiones; esto confirma que es posible realizar mejoramiento genético para la obtención de variedades eloterias para la región de El Bajío.

Calidad de elote

Se identificaron maíces nativos con calidad de elote comparable a la del testigo A7573 (Cuadro 2.3). En contenido de sólidos solubles totales (SST) los genotipos de las razas dulces (Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste) presentaron valores mayores en grados Brix que el testigo. Jal-204 sobresalió con 22.5 °Brix, superior a lo reportado por Coutiño *et al.* (2010) con 15.2 °Brix en la variedad ‘Campechano’, de la raza Tuxpeño en el estado de Chiapas.

Cuadro 2.3. Atributos de elote en 14 colectas de maíces nativos evaluados en Celaya, Guanajuato durante 2015 y 2016, y de un híbrido comercial usado como testigo.

Colecta	Calidad		Apariencia visual			Rendimiento (t ha ⁻¹)		
	SST (°Brix)	PR (% N)	LE (cm)	DE (cm)	NH	RE	RGF	RGS
Jal204	22.5 ^a	10.5 ^{a-c}	17.9 ^c	5.2 ^a	15.9 ^a	12.6 ^{a-c}	7.8 ^{ab}	7.2 ^{ab}
Guan141	18.5 ^{ab}	10.8 ^{a-c}	19.3 ^{bc}	4.7 ^{ab}	13.8 ^{a-c}	12.1 ^{a-c}	7.8 ^{ab}	5.7 ^{ab}
Jali304	20.2 ^a	10.3 ^{a-c}	16.9 ^c	5.2 ^a	16.7 ^a	12.6 ^{a-c}	9.6 ^a	5.7 ^{ab}
Jali300	20.9 ^a	12.6 ^{a-c}	18.7 ^c	5.0 ^{ab}	14.0 ^{a-c}	13.5 ^{ab}	8.0 ^{ab}	5.7 ^{ab}
Zac1821	21.1 ^a	11.1 ^{a-c}	18.6 ^c	4.9 ^{ab}	14.3 ^{a-c}	12.2 ^{a-c}	8.1 ^{ab}	5.5 ^{ab}
Sina88	14.8 ^{a-c}	11.4 ^{a-c}	19.3 ^{bc}	5.0 ^{ab}	16.0 ^a	13.3 ^a	7.3 ^{ab}	5.7 ^{ab}
Chih235	19.7 ^a	12.3 ^{a-c}	20.3 ^{ab}	4.5 ^b	10.8 ^{bc}	10.9 ^{bc}	6.1 ^{ab}	5.3 ^{ab}
Zac79	18.5 ^{ab}	9.4 ^{bc}	17.7 ^c	4.4 ^b	12.6 ^{a-c}	10.2 ^{bc}	6.3 ^{ab}	5.5 ^{ab}
Jal300	19.8 ^a	11.5 ^{a-c}	17.2 ^c	4.9 ^{ab}	14.7 ^{ab}	10.3 ^{bc}	6.1 ^{ab}	4.9 ^c
Zac1822	19.1 ^a	9.5 ^{bc}	19.3 ^{bc}	4.8 ^{ab}	13.7 ^{a-c}	12.2 ^{a-c}	7.6 ^{ab}	6.9 ^{ab}
Gto100	14.5 ^{a-c}	9.2 ^c	16.5 ^c	4.6 ^{ab}	15.3 ^a	8.6 ^c	4.7 ^b	5.1 ^{ab}
Son140	19.3 ^a	13.6 ^a	18.7 ^c	4.7 ^{ab}	13.5 ^{a-c}	10.5 ^{bc}	5.8 ^{ab}	5.8 ^{ab}
Sin34	16.7 ^{a-c}	13.1 ^{ab}	18.9 ^{bc}	4.6 ^{ab}	15.5 ^a	10.9 ^{bc}	5.3 ^b	5.5 ^{ab}
Roque	7.6 ^{bc}	11.3 ^{a-c}	23.6 ^a	4.8 ^{ab}	10.3 ^c	14.6 ^{ab}	8.2 ^{ab}	7.6 ^a
A7573	8.7 ^{bc}	12.9 ^{a-c}	23.1 ^{ab}	5.2 ^a	15.5 ^a	16.3 ^a	8.1 ^{ab}	8.6 ^a
DSM	10.2	3.2	4.2	0.7	4.2	4.5	3.7	2.6
Media	17.4	11.5	19.2	4.8	14.1	11.7	6.8	5.7

SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas; LE, longitud; DE, diámetro; LL, llenado de grano; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco; RGS, rendimiento de grano seco. Medias con la misma letra dentro de cada columna, no son diferentes uno del otro con $p=0.05$.

En mercados como Estados Unidos los maíces dulces en etapa para consumo de elote se usan como hortaliza o para el enlatado y congelado por su sabor dulce, pericarpio delgado y endospermo

con textura suave (Kwiatkowski y Clemente, 2007), y los genotipos usados para este propósito deben tener de 24 a 30 ° Brix para que se consideren como materia prima de buena calidad (Luchsinger y Camilo, 2008).

Los maíces dulces nativos de este estudio representan una opción adicional para el consumo como elote entero o en forma de esquites, y podrían usarse en la agroindustria del procesado de elote dado el alto valor en grados Brix que registraron, aunque es necesario mejorar características agronómicas al tratarse de poblaciones con poco mejoramiento genético para que puedan ser competitivos en rendimiento. Los maíces no dulces como A7573 son los de mayor popularidad en México, donde la dulzura no es determinante en la preferencia de los compradores de elote (Coutiño *et al.*, 2015), sino que es más importante la apariencia física como tamaño, diámetro, número de hileras, llenado de grano y color de grano, cuya apreciación varía entre mercados.

Los mayores contenidos en proteínas correspondieron a los dos genotipos de la raza Dulcillo del Noroeste, estadísticamente igual al testigo A7573. Sono140 (Dulcillo del Noroeste) registró 13.6 % de proteína, el testigo A7573 12.9 %, Jali300 (Dulce de Jalisco) 12.6 % y Roque (Elotes Occidentales) 11.3 %. Estos contenidos son similares a lo encontrado en otros grupos de maíces nativos con valores promedio de 10.3 % (Vidal *et al.*, 2008) y 11.9 % (Vera-Guzmán *et al.*, 2012); estos dos estudios también indican que los valores mencionados de proteína son semejantes a los de testigos de alta calidad proteínica, pero que tienen mayores proporciones de algunos aminoácidos como lisina y triptófano.

Apariencia física de elote

Es de destacar que algunos maíces nativos, sin haber sido sometidos a mejoramiento genético

formal, poseen mazorcas con apariencia física similar a las exhibidas por el híbrido A7573 (Cuadro 2.3). Los elotes más largos correspondieron a los maíces no dulces Roque (Elotes Occidentales) y el testigo con 23.6 y 23.1 cm de longitud, respectivamente. Los maíces Jal-204 (Dulce de Jalisco) y A7573 mostraron los mayores diámetros de elote con 5.2 cm, mientras que en número de hileras se encontraron genotipos con 16 hileras por mazorca, igual que el testigo.

La variedad Roque de la raza Elotes Occidentales presentó los elotes de mayor longitud, pero también con menor número de hileras por mazorca (10), característica que no es atractiva para algunos mercados (Coutiño *et al.*, 2015) y que reduce la aceptación de los consumidores (Shelton y Tracy, 2015); no obstante, esta característica se podría mejorar mediante retrocruza con maíces de muchas hileras. Algunos genotipos de la raza Dulce de Jalisco tuvieron mejores expresiones fenotípicas en apariencia física que Dulcillo del Noroeste, lo que se explica en parte porque están más adaptadas a la región del Bajío.

Si bien algunos genotipos igualaron en apariencia física al testigo elotero de mayor uso en México, aunque es necesario homogeneizar las características distintivas de cada población nativa mediante mejoramiento genético de acuerdo con las preferencias de consumo de cada mercado.

Rendimiento de elote y de grano fresco

La venta de elotes se realiza por pieza; sin embargo, conocer los rendimientos de cada genotipo ayuda a valorar su potencial para usarse como variedad elotera. Las tres razas de maíz estudiadas mostraron diferencias estadísticas entre ellas en las variables evaluadas y se detectaron genotipos con rendimientos muy cercanos al híbrido A7573, que produjo los mayores rendimientos (Cuadro

2.3). Los mejores rendimientos de elote entero (RE) se registraron en los maíces no dulces, y fluctuaron desde 8.6 t ha⁻¹ en Gto100 hasta 16.3 t ha⁻¹ en A7573. El híbrido y el genotipo Roque de la raza Elotes Occidentales, rindieron estadísticamente igual, con una diferencia de 1.7 t ha⁻¹ más del A7573.

En el estado de Guanajuato se tiene el segundo mayor rendimiento de elote a nivel nacional con 21.8 t ha⁻¹ pero con poca superficie sembrada, 1,627 ha. Sus altos rendimientos pueden deberse a la mejora continua en el desarrollo de híbridos destinados para un mayor rendimiento de grano blanco por la gran competencia que existe entre las empresas productoras de semilla. Por ello, algunos productores les ven potencial para la producción de elote y los destinan para este propósito, como también lo han hecho para la producción de forraje verde para el ganado.

Un mayor rendimiento de elote no siempre se relaciona con la cantidad de piezas comercializables. Para el mercado nacional, el genotipo Roque se acerca en volumen de elote producido al híbrido comercial, pero le hace falta tener un mayor diámetro y más número de hileras para que pueda competir realmente en este tipo de mercado. Este material genético presenta un grano de color rojo/rosa que se logra percibir en etapa de elote y posiblemente eso pueda darle un valor agregado, además de tener otras características de calidad.

Las razas dulces tuvieron RE menores a los no dulces debido a que tienen menor longitud de elote y grano de menor peso de grano. Esto por ser de endospermo tipo dulce que acumula menos almidón que los no dulces durante el proceso de maduración del grano debido a una mutación en la ruta de biosíntesis de carbohidratos (Tracy, 1997). El rendimiento de grano fresco (RGF) es útil

para conocer el potencial de los genotipos para esquites. En el presente estudio A7573 y Roque (no dulces) fueron estadísticamente iguales en RGF, con una mínima diferencia en rendimiento de 0.1 t ha^{-1} , lo que indica que Roque tiene mayor proporción de grano en comparación con el lote dado los rendimientos de lote entero obtenidos en estos dos genotipos, discutidos anteriormente. Entre los maíces dulces, Jali-304 registró 9.6 t ha^{-1} de grano fresco, estadísticamente superior en 1.5 t ha^{-1} al obtenido por el híbrido comercial.

En la actualidad, en el mercado mexicano el consumo de esquites se basa en maíces no dulces; sin embargo, con las debidas estrategias de mercado y de mejoramiento genético los maíces nativos dulces podrían incursionar con éxito para este propósito y competir con híbridos no dulces como el A7573. Un genotipo con buen rendimiento de lote entero y de grano fresco también debe de tener buena producción de semilla, variable a la que en este estudio se le llamó rendimiento de grano seco (RGS). Los maíces dulces fueron los más bajos en RGS debido a que la mutación que impide la conversión de azúcares a almidón provoca la formación de granos arrugados o deshidratado por la pérdida de humedad y, en consecuencia, con menor peso de la semilla. Entre los maíces dulces, Jali304 fue el mejor en RGF, pero fue superado por Jal204 y Zac1822 en RGS, lo que indica que conviene involucrar un mayor número de características agronómicas para que un genotipo sea considerado como buena variedad elotera.

Relación entre las variables de lote

El contenido de sólidos solubles totales (SST) se relacionó negativamente ($P \leq 0.001$) con la longitud de lote (Cuadro 8), lo que indica que los elotes más largos como Roque y A7573 tienden a ser de un sabor menos dulce al compararlos con los maíces de las razas dulces. Una de las

características de los maíces dulces es el grano arrugado cuando el grano alcanza su madurez comercial y de menor peso que los granos con acumulación normal de almidón, lo que se refleja en la correlación negativa ($P \leq 0.01$) entre SST y el rendimiento de grano seco (RGS).

Cuadro 2.4. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de elote de 15 maíces dulces y no dulces evaluados en Celaya, Guanajuato, 2015 y 2016.

Variable	SST	PR	LE	DE	NH	RE	RGF	RGS
PR	-0.09 ns	1.00						
LE	-0.62***	0.43*	1.00					
LL	-0.25 ns	-0.26 ns	0.08 ns					
DE	0.01 ns	-0.29 ns	-0.24 ns	1.00				
NH	0.15 ns	-0.18 ns	-0.42*	0.47**	1.00			
RE	-0.39*	-0.16 ns	0.34*	0.76***	0.10 ns	1.00		
RGF	-0.02 ns	-0.37*	-0.06 ns	0.80***	0.13 ns	0.82***	1.00	
RGS	-0.47**	-0.15 ns	0.31 ns	0.58**	-0.03 ns	0.74***	0.57**	1.00

*, **, ***Significativo con $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.001$, respectivamente; ns, no significativo; SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas totales; LE, longitud de elote; DE, diámetro de elote; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco; RGS, rendimiento de grano seco.

En los maíces evaluados, un mayor diámetro de elote también estuvo asociado con un mayor número de hileras y mayores rendimientos. Se observó correlación positiva entre los tres tipos de rendimiento estimados, por lo que seleccionar genotipos por cualquiera de estas variables se espera un buen resultado en las demás. Con las correlaciones identificadas se puede mejorar el proceso de mejoramiento genético al permitir elegir los criterios de selección más convenientes y así reducir el trabajo que involucra en el campo.

2.6. Conclusiones

Roque, de la raza Elotes Occidentales posee una longitud de elote igual que el testigo comercial, pero le falta mayor diámetro y número de hileras para que pueda competir en mercados de El Bajío. Las razas dulces superaron al híbrido comercial en el contenido de sólidos solubles totales y un genotipo lo superó en rendimiento de grano fresco, por lo que estas colectas representan una opción adicional para el consumo de elote entero y para esquites.

2.7. Literatura citada

- AACC (American Association of Cereal Chemists). 1999. Official Methods of Analysis. Methods 46-13.01. 11th. edition. St. Paul Minnesota, USA. <http://dx.doi.org/10.1094/AACCIntMethod-46-13.01>.
- Arellano V., J. L., A. J. Gámez V. y M. A. Ávila P. 2010. Potencial agronómico de variedades criollas de maíz cacahuacintle en el valle de Toluca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Esp4): 37-41.
- Coutiño E., B.; V. A. Vidal M., B. Cruz G. y C. Cruz V. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4): 57-61.
- Coutiño E., B., V. A. Vidal M., C. Cruz V. y M. Gómez G. 2015. Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (5): 1119-1127.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Diario Oficial de la Federación. Acuerdo por el que se determinan centros de origen y centros de diversidad genética del maíz. México, D.F. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5276453&fecha=02/11/2012.
- Favarato, L. F., J. L. De Souza, J. C. Cardoso G., C. Marciano S., J. M. De Souza B. and R. Carvalho G. 2016. Qualitative attributes and postharvest conservation of green ears of maize grown on different cover crops in organic no-till system. *Rev. Ceres, Vicosa* 63(4): 532-537.
- Fernández S., R., L. A. Morales C. y A. Gálvez M. 2013. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Sup.3-A): 275-283.
- Fernández-González, I., J. L. Jaramillo-Villanueva, J. A. Hernández G. y P. Cadena-Iñiguez. 2014. Evaluación agronómica y sensorial de ocho genotipos de maíz (*Zea mays* L.) para la producción de elote. *Agroproductividad* 7(6): 49-51.

- Friedman, M. 1937. The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association* 32 (200): 675-701.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. 217 p.
- Gere, A., V. Losó, A. Györey, S. Kovács, L. Huzsvai, A. Nábrádi, Z. Kókai and L. Sipos. 2014. Applying parallel factor analysis and Trucker-3 methods on sensory and instrumental data to establish preference maps: case study on sweet corn varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94: 3213-3225.
- González C., F., A. Peña R. y G. Nuñez H. 2006. Etapas de corte, producción y calidad forrajera de híbridos de maíz de diferente ciclo biológico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29 (Especial 2): 103-107.
- Lertrat, K. and T. Pulam. 2007. Breeding for increased sweetness in sweet corn. *International Journal of Plant Breeding* 1(1):27-30.
- Luchsinger L., A. y F. Camilo F. 2008. Rendimiento de maíz dulce y contenido de sólidos solubles. *IDESIA (Chile)* 26 (3): 21-29.
- Ortíz-Torres, E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, J. A. Hernández-Guzmán y M. Valadez-Ramírez. 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19 (2): 225-238.
- Rice, R. R. and W. F. Tracy. 2013. Combining ability and acceptability of temperate sweet corn inbreds derived from exotic germplasm. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 138 (6): 461-469.
- SAS Institute. 1999. SAS Procedure Guide, Release 8.0. Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1643 p.
- Shelton, A. C. and W. F. Tracy. 2015. Recurrent selection and participatory plant breeding for improvement of two organic open-pollinated sweet corn (*Zea mays* L.) population. *Sustainability* 7: 5139-5152.
- Tracy W., F. 1997. History, genetics, and breeding of supersweet (shrunken2) sweet corn. In: Janick J (Ed) *Plant Breeding Reviews* (Vol 14), John Wiley and Sons, Inc., pp 189-236.
- Trimble, L., S. Shuler and W. F. Tracy. 2016. Characterization of five naturally occurring alleles at the *Sugary1* locus for seed composition, seedling emergence, and *Isoamylase1* activity. *Crop Science* 56: 1927-1939.
- Valdivia-Bernal, R., F. J. Caro-Velarde, R. Medina-Torres, M. Ortiz-Catón, A. Espinoza-Calderón, V. A. Vidal-Martínez y A. Ortega-Corona. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloteras de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4):63-67.
- Vera-Guzmán, A. M., J. L. Chávez-Servia y J. C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Proteína, lisina y triptófano en poblaciones nativas de maíz Mixteco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35 (Especial 5): 7-13.

Vidal M., V. A., G. Vázquez C., B. Coutiño E., A. Ortega C., J. L. Ramírez D., R. Valdivia B., M. J. Guerrero H., F. J. Caro V. y O. Cota A. 2008. Calidad proteínica en colectas de maíces criollos de la sierra de Nayarit, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31 (Especial 3): 15-21.

Williams II, M. M. 2014. Few crop traits accurately predict predict variables important to productivity of processing sweet corn. *Field Crops Research* 157: 20-26.

CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DURANTE EL DESARROLLO DEL ELOTE

3.1. Resumen

La cosecha de elote en México frecuentemente se hace con un muestreo visual del elote, días después de la siembra o de la polinización sin importar el sabor dulce lo cual mejora la calidad del producto en el mercado. El objetivo de este estudio fue generar la dinámica de acumulación de sólidos solubles durante el desarrollo del elote para establecer la ventana de cosecha de cada genotipo con esta variable. Se evaluaron 13 colectas de las razas Cacahuacintle, Chalqueño, Elotes Cónicos, Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste en Montecillo, Estado de México en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Se determinó el contenido de sólidos solubles y la humedad del elote durante 14 días iniciando a los 16 días después de la polinización. Se aplicó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey. Las razas Dulces tuvieron mayor ventana de cosecha debido a una mutación que presentan que disminuye la dureza del grano en el proceso de maduración y hace que el elote permanezca por más tiempo apto para el consumo. Se alcanzaron sólidos solubles de 22.3 ° Brix a los 34 días después de la polinización en las razas dulces y superaron al testigo con endospermo no dulce y al testigo dulce. La ventana de cosecha fue de los 22 a 28 días después de la polinización en variedades no dulces con humedades de grano entre 83 a 85 % y de 24 a 32 días en los dulces con humedad de 72 a 80 %. Las razas de maíz dulce pueden mejorar la calidad de elote entero y de grano para esquite en el mercado mexicano.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz dulce, grados Brix, cosecha.

3.2. Abstract

Harvest date of corn on the cob production in Mexico is often done with a visual inspection of the tender kernels, days after sowing or pollination regardless of the sweet taste which improves the quality of tender corn in the market. The aim of this study was to generate the accumulation kinetics of soluble solids during tender corn development to establish the optimum harvest window of each genotype. We evaluated thirteen collections belonging to Cacahuacintle, Chalqueño, Elotes Conicos, Elotes Occidentales, Dulce de Jalisco and Dulcillo del Noroeste races in Montecillo, Mexico under a complete blocks design with two replications. Content of soluble solids and moisture of the tender corn was measured for 14 days starting at 16 days after pollination. An analysis of variance and comparison of means by Tukey's test were applied. Sweet landraces had a greater harvest window due to a mutation that decreases the hardness of the kernel in the ripening process and makes immature ears remain longer suitable for consumption. Sweet landraces reached soluble solids of 22.3 ° Brix at 34 days after pollination and they surpassed the sweet control and non-sweet corn races. Harvest window was from 22 to 28 days after pollination in non-sweet varieties with kernel moisture between 83 to 85% and from 24 to 32 days after pollination in sweet corn with 72 to 80% of humidity. Sweet corn races can improve the quality of unhusked ears and fresh kernel consumption in the Mexican market.

Palabras clave: *Zea mays*, sweet corn, soluble solids, harvest date.

3.3. Introducción

El elote es un alimento muy apreciado e importante en México, que se cosecha de siembras de varias razas nativas usadas en el país para satisfacer esta demanda de elote. Dado que las preferencias en la calidad de elote cambian entre consumidores y entre mercados nacionales, existe una gran diversidad de maíces que se usan para este propósito, desde poblaciones nativas hasta híbridos comerciales, aunque no fueron desarrollados para este fin. El término elote se refiere a la mazorca en la etapa fenológica lechoso-masoso, y cualquier tipo de maíz puede utilizarse para la producción de elote. A nivel local, la calidad de elote incluye un buen sabor y textura de los granos de elote, más una serie de atributos de tamaño y aspecto físico que son los primeros que toma en cuenta el consumidor. Por lo tanto, para que un elote pueda comercializarse en varios mercados debe reunir diversas características específicas.

A nivel nacional, el híbrido A7573 se considera el mejor maíz elotero por su mazorca de gran tamaño, apariencia visual y su vida postcosecha, características que atraen al consumidor y al vendedor minorista. Otra característica que se describe frecuentemente en la literatura es el sabor dulce del elote. Para la mayoría del mercado mexicano esta característica no define la preferencia hacia algún tipo de elote, ya que antes de comerlo se acostumbra agregarle condimentos como mayonesa, queso, limón y chile, que modifican el sabor de los granos. Además, en el mercado nacional no se tiene registro de un elote dulce comercial, pero en algunas zonas de El Bajío mexicano como Guanajuato comienza a venderse este tipo de maíces que llegan a la vía de la importación.

El sabor dulce del elote se ha estudiado desde dos perspectivas: a) contenido de sólidos solubles totales (SST) y b) cuantificación de azúcares. En México el sabor dulce del elote se ha basado principalmente en el contenido de SST expresados en grados Brix. Estas mediciones se han realizado en la raza Tuxpeño, Comiteco (Coutiño *et al.*, 2010) y maíces de diferente coloración de grano (Ortíz-Torres *et al.*, 2013), en donde el máximo valor reportado es de 15.1 ° Brix en la raza Tuxpeño (Coutiño *et al.*, 2010). Estos maíces mencionados no son dulces en comparación con los maíces que se usan como hortaliza y en la industria del congelado y enlatado de elote en Estados Unidos, Canadá y países de Asia (Singh *et al.*, 2014).

Las variedades de maíz dulce usadas para este propósito tienen mutaciones ocurridas de manera natural en la conversión de azúcares a almidón (Trimble *et al.*, 2016), lo que ocasiona que se acumule mayor cantidad de azúcares en el elote y un sabor más dulce. A estas mutaciones se les conoce como mutantes *Sugary 1 (su₁)* y *Shrunken 2 (sh₂)*. En contenido de SST se ha reportado que variedades que contienen el gen *su₁* alcanzan contenidos de 12.4 (Cardoso *et al.*, 2002) y 20 (Lazcano *et al.*, 2011) ° Brix a los 20-25 días después de la polinización. En variedades con el gen *sh₂* se ha encontrado 15 ° Brix (Lazcano *et al.*, 2011) a los 20 días después de la polinización y de 16.4 ° Brix cuando el elote alcanza un contenido de humedad entre 70-75 % (Solomon *et al.*, 2012). Estas variedades dulces (*sh₂*) son las que están comercializándose en mercados de El Bajío como Celaya, Irapuato y Comonfort en el estado de Guanajuato.

La fecha de cosecha es un factor importante en la calidad del elote para el consumo fresco y para la industrialización, la cual varía entre genotipos y ambientes de producción. En variedades dulces mutantes se han realizado estudios de la cinética de acumulación de carbohidratos (De Vries

y Tracy, 2016). Con las mutaciones *su1* y *sh2* los elotes se cosechan usualmente entre 18-22 días después de la polinización (Singh *et al.*, 2014), que es cuando alcanzan altos contenidos de azúcares y pueden acumular más de tres (*su1*) y ocho (*sh2*) veces el contenido de sacarosa que el maíz normal sin las mutaciones (Lertrat y Pulam, 2007). En el maíz normal, que son las más usadas para la producción de elote en México, la cosecha se puede realizar desde los 85 a 90 días después de la siembra en algunas variedades criollas de Chiapas (Coutiño *et al.*, 2015), de 15 a 18 días después de la polinización como en la raza Jala (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010) o de forma visual (Favarato *et al.*, 2014); sin embargo, estos índices de cosecha pueden coincidir o no con una alta acumulación de sólidos solubles totales, contenido que puede estar correlacionado con el sabor dulce del elote y con ello se podría ofrecer un elote de mayor calidad.

En los Valles Altos y El Bajío de México existe alta demanda en el consumo de elote al concentrar grandes como la Ciudad de México y Guadalajara, respectivamente. En estas regiones se adaptan las razas Cacahuacintle, Chalqueño, Elotes Cónicos para Valles Altos, y Elotes Occidentales para El Bajío, las cuales satisfacen una parte del consumo local de elote entero hervido y de esquites. En el Bajío y Norte del país también se encuentra la raza Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste (SEMARNAT, 2012). En estos maíces no se encontraron reportes sobre su evaluación para la producción de elote ni los contenidos de SST que presentan. Actualmente el sabor dulce no es una característica importante en el mercado de Valles Altos, pero representa una oportunidad para dar valor agregado de dulzor y poder satisfacer la demanda de elotes dulces para algunos mercados nacionales como en El Bajío. El objetivo de este trabajo fue generar la dinámica de acumulación de SST en razas adaptadas a Valles Altos para definir la ventana óptima de cosecha

de cada genotipo y evaluar el posible uso de razas de El Bajío al mercado de Valles Altos como fuente genética para el mejoramiento.

3.4. Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron 13 colectas de maíces nativos de México pertenecientes a seis razas que incluye a dos razas dulces con fenotipo de grano translúcido y arrugado cuando el grano se seca (Figura 3.1). Además, se agregaron dos testigos híbridos comerciales, A7573 y Gss1453 (Cuadro 3.1). A7573 es un híbrido para la producción de elotes no dulces en México, mientras que Gss1453 es híbrido superdulce que contiene el gen mutante *shrunkened 2* (*sh₂*), usado para la industria del enlatado y congelado en mercados como Estados Unidos. La mutación *sh₂* produce un fenotipo de grano más arrugado que las dulces porque acumulan más cantidad de azúcares (Figura 4A).



Figura 3.1. Fenotipo de la raza Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste en estado de grano seco (a) y en elote (b).

Cuadro 3.1. Colectas de maíces nativos de México usados para la cinética de acumulación de sólidos solubles totales en Texcoco, Estado de México.

Raza	Colecta/Nombre comercial	Color	Textura de endospermo
Cacahuacintle	CPue185, CPue472, Cacah529	Blanco	Harinoso
Chalqueño	Hgo428	Blanco crema	Semi-cristalino
Elotes Cónicos	Hgo416	Azul	Semi-cristalino
Elotes Occidentales	Roque	Rosa	Harinoso
Dulce de Jalisco	Zac182	Naranja	Dulce*
Dulcillo del Noroeste	Sin34	Amarillo	Dulce*
Testigo 1	A7573	Blanco	Dentado
Testigo 2	Gss1453	Amarillo	Dulce**

*Genotipos con gen *sugary 1*; **Genotipo con gen *shrunk 2*. Las demás colectas no presentan ningún tipo de mutación, son normales para la síntesis de almidón en el endospermo.

Sitio y diseño experimental

Las plantas se sembraron y crecieron en el ciclo primavera-verano 2017 en Montecillo, Texcoco, Estado de México, México (19° 29' N y 98° 53' O, a 2250 msnm). El clima es del tipo Cb (wo)(w)(i') g, correspondiente a templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18° C. El mes más frío varía entre 6.5 y 22 °C, y la precipitación media anual es de 637 mm (García, 1988).

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de 10 surcos de 5 m de longitud y 0.8 m entre surcos, con 110 plantas útiles distanciadas a 0.5 m entre ellas, con una densidad de población estimada de 50 mil plantas ha⁻¹. El manejo fue bajo un régimen de riego y una dosis de fertilización de 180N-60P-0K aplicada en dos etapas, la primera en la siembra con la mitad de nitrógeno (urea) y todo el fósforo (fosfato diamónico) y el resto del nitrógeno a los 45 d después de la siembra.

Cinética de acumulación de sólidos solubles totales

Para efectuar esta evaluación se realizaron diez fechas de muestreo para la determinación de sólidos solubles totales (SST) a intervalos de dos días a partir de los 16 días después de la polinización. En cada fecha de muestreo se cosecharon cinco elotes de los que se obtuvo un extracto homogéneo para la cuantificación de SST expresados en ° Brix. Para mantener al mínimo posible las actividades metabólicas del elote cosechado, la cosecha se realizó en la mañana antes de la salida del sol y los elotes se mantuvieron en hielo hasta su procesamiento. La determinación (por triplicado) de SST se hizo con un refractómetro digital (Atago Pal-1[®], Tokio, Japón), en 300 µL del extracto. Los elotes se cosecharon de surcos centrales de cada parcela/genotipo para disminuir los efectos genéticos que ocasiona el polen de otros maíces en el contenido de sólidos solubles totales, llamado efecto de xenia.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza para cada una de las 10 fechas de muestreo del contenido de SST; de manera previa, se verificó el supuesto de distribución normal. La prueba de comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Todos los análisis de datos se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.0 (SAS Institute, 1999).

3.5. Resultados y discusión

La acumulación de sólidos solubles totales (SST) en el desarrollo del elote fue diferente ($P \leq 0.05$) entre los genotipos después de 18 días después de la polinización (Cuadro 3.2). Las diferencias encontradas pueden atribuirse a las diferentes cantidades de azúcares y otros compuestos orgánicos solubles que se acumularon durante el desarrollo del grano de elote.

Cuadro 3.2. Cuadrados medios del análisis de varianza en el contenido de sólidos solubles totales en 10 fechas de muestreo de elote en Texcoco, Estado de México.

Días después de la polinización	Genotipo	Repetición	C.V.
16	1.09 ns	0.03 ns	10.7
18	2.27 *	0.06 ns	10.1
20	6.6 ***	2.3 *	6.9
22	12.9 ***	1.5 ns	5.4
24	24.2 ***	0.9 ns	9.6
26	32.2 ***	1.9 ns	5.0
28	48.2 ***	0.3 ns	7.1
30	46.1 ***	0.03 ns	8.4
32	54.4 ***	7.1 *	8.2
34	63.1 ***	0.07 ns	9.4

A los 16 días después de la polinización (ddp) el contenido de SST fue bajo y no se detectaron diferencias entre los genotipos. Conforme avanzó la maduración del elote, los genotipos continuaron acumulando SST hasta llegar a un cierto nivel máximo (Figura 3.2), cuyo valor estuvo en función del tipo de mutación presente en el endospermo del grano. La máxima acumulación de SST fue en los maíces dulces. La mutación *sugary 1* (*su₁*) incrementó rápidamente los niveles de SST hasta los 28 ddp, después continuó aumentando, pero con menor rapidez hasta el último día de muestreo. El dulce testigo superdulce con el gen *shrunked 2* (*sh₂*) aumentó su contenido de SST

hasta el día 26 para después disminuir conforme pasaron los días. Por su parte, los maíces no dulces (normales) prácticamente dejaron de acumular SST a partir de los 18 ddp.

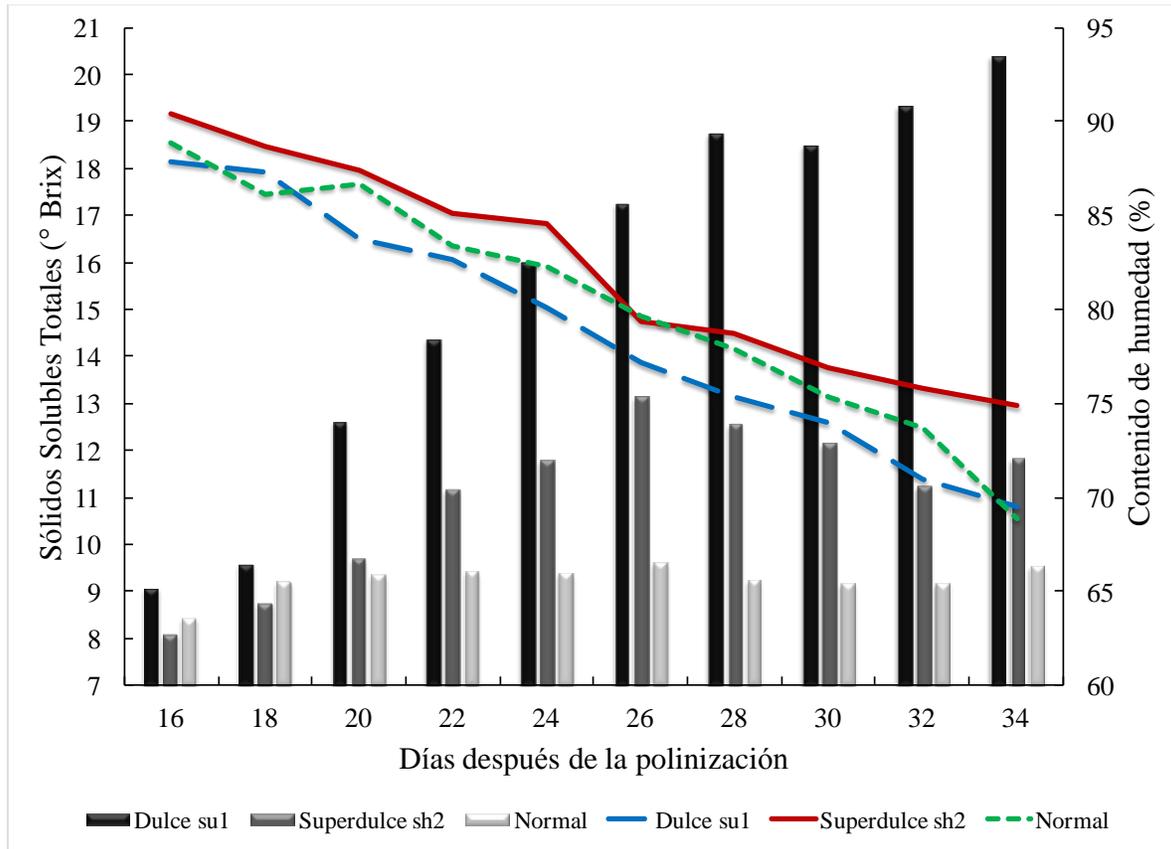


Figura 3.2. Cinética de acumulación de sólidos solubles totales y contenido de humedad en maíces normales, mutantes dulces (*sugary 1*) y un superdulce (*shrunkened 2*).

La acumulación de SST fue creciente hasta alcanzar un valor máximo en cada genotipo. Los maíces *su1* mostraron aumento progresivo en todas las diez fechas de muestreo y no disminuyó el contenido de sólidos solubles después de los 26 ddp, como ocurrió con el testigo dulce *sh2*. En este tiempo *sh2* acumuló 13.1 ° Brix, su máximo contenido, mientras que *su1* 19.4 ° Brix con contenidos de humedad de 78 y 75 %, respectivamente.

En cuanto al contenido de humedad en el grano, el maíz dulce *sh₂* presentó siempre el mayor contenido en todas las fechas evaluadas, atribuible a la poca o nula síntesis de almidón que probablemente hizo que se retuviera más agua al no tener una presión de salida ocasionada por la formación de almidón como en los otros maíces dulces y no dulces. Los maíces no dulces (normales) mostraron un comportamiento intermedio en el nivel de deshidratación entre los dos tipos de maíz dulce. Presentaron mayores contenidos de agua en todas las fechas de evaluación que el dulce *su₁*. Una posible explicación es que este maíz dulce acumuló muchos sólidos solubles como azúcares, proteínas, etc., pero menor proporción de agua que los maíces normales y que al otro dulce *sh₂*.

Los contenidos de SST encontrados en este trabajo son similares a los encontrados en genotipos *sh₂* y en *su₁*, en los mismos tiempos de cosecha. En *sh₂* Solomon *et al.* (2012) reportan 16.4 ° Brix con humedad entre el 70-75 % y Lazcano *et al.* (2002) 15 ° Brix a los 20 ddp. En genotipos con *su₁* han encontrado 12.4 (Cardoso *et al.* (2002) y 20 ° Brix (Lazcano *et al.*, 2011) a los 20 ddp. Según Worranjida *et al.* (2013), tales diferencias dependen del fondo genético, del ambiente, del sistema de producción, tiempo de cosecha, contenido de humedad e incluso de la estación de crecimiento. En el contenido de azúcares se esperaría menor variación ambiental por ser un carácter controlado por reacciones bioquímicas y por enzimas, y por ende de expresión genéticamente.

El valor de SST se usa como una medida indirecta del contenido de azúcares, aunque también incluye ácidos orgánicos, vitaminas, compuestos fenólicos, pectinas, etc., y su valor se incrementa con la acumulación de azúcares en el elote (Favarato *et al.*, 2016). En este trabajo los mutantes *su₁*

registraron mayores contenidos de SST que los mutantes *sh₂*. Derivado de lo anterior, es razonable pensar que a mayor contenido de SST no siempre correlaciona con un mayor dulzor de elote, particularmente entre maíces mutantes dulces (*su₁* y *sh₂*). Variedades comerciales con *sh₂* son los de mayor uso por ser el de mayor dulzor al tener diferente composición de azúcares. En la etapa lechosa (20 días después de la polinización), el maíz *sh₂* contiene 29.9 % de sacarosa, cerca de 3 veces más azúcar que *su₁* (10.2 %) y 8 veces más que el maíz normal (3.5 %) (Lertrat y Pulam, 2007).

Las curvas de acumulación de SST y de contenido de humedad permitieron identificar las ventanas de cosecha para cada tipo de elote crecido en el área de influencia de Montecillo. Estas fechas de cosecha conjuntan al contenido de SST y el grado de maduración de los granos del elote de forma visual y manual para determinar la etapa lechosa-masosa en cada fecha de muestreo de tal manera que sea apta para su consumo. Para maíces con endospermo normal o no dulces como A7573, la cosecha de elotes es de los 22 a 26 ddp con contenidos de 8-10 ° Brix (Figura 3.3) y humedades entre 75-85 %. En la raza Jala, Valdivia-Bernal *et al.* (2010) indican que la ventana óptima de cosecha es entre los 15-18 ddp en Xalisco, Nayarit, una zona más cálida que Montecillo, aunque el extracto del grano para realizar las mediciones de SST las diluyeron en agua y no es comparable con el procedimiento que se siguió en este estudio.

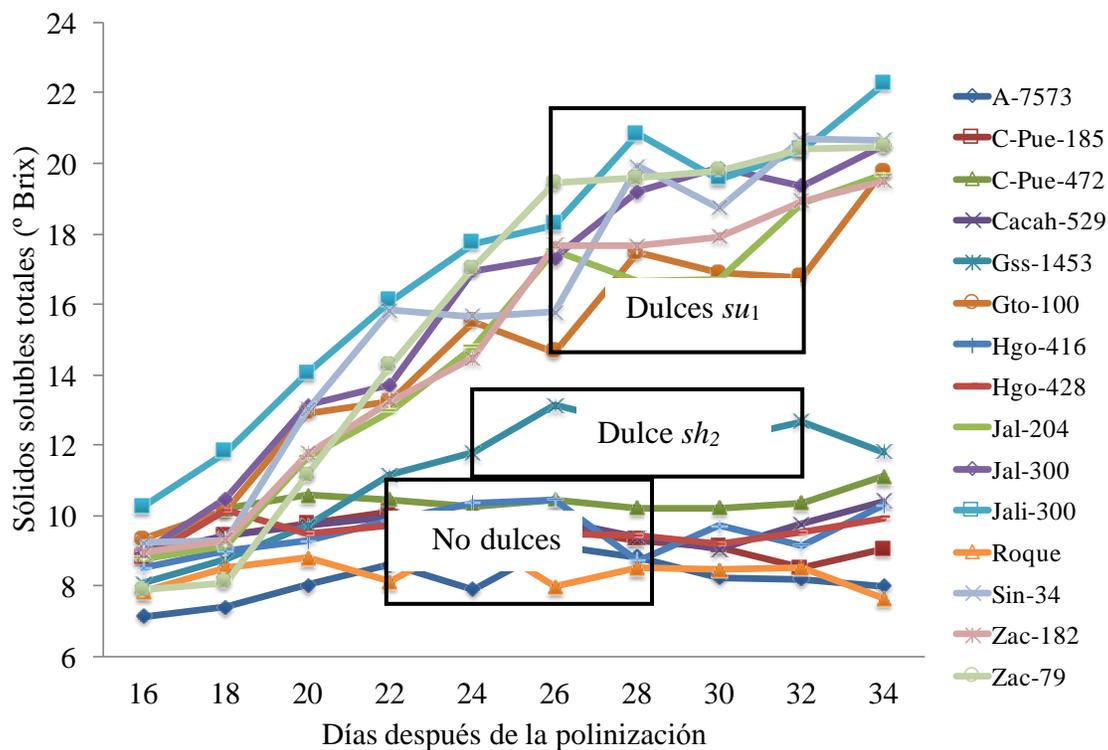


Figura 3.3. Ventanas de cosecha con base en la acumulación de sólidos solubles totales y grado de madurez del grano en maíces con endospermo normal no dulce y dulce.

Para genotipos dulces la ventana de cosecha se puede ampliar a una semana más tarde que los no dulces porque la mayoría de ellos alcanza su máximo contenido de SST a los 28 ddp con apariencia apta para su consumo. Las mutaciones presentes en los maíces dulces les permiten mantenerse turgentes y suaves para su consumo durante la etapa de elote al no formar gran cantidad de almidón. Según Singh *et al.* (2014), los elotes de maíces con las mutaciones su_1 o sh_2 se cosechan usualmente entre 18-22 días después de la polinización. En este estudio, hecho en clima templado de valles altos, los mutantes su_1 pueden cosecharse desde los 26 a 32 ddp con contenidos de 16-20 ° Brix y humedades de 72-85 %.

Para *sh₂* el periodo de cosecha se amplía 2 días, de los 24 a los 32 ddp debido a que este mutante presenta una fuerte reducción en almidón inducida por el gran incremento en azúcares, causando que los granos maduros (secas) se vean colapsados, angulares, opacos y quebradizos (Lertrat y Pulam, 2007); pero durante su desarrollo duran más tiempo turgentes y aptos para el consumo. Sin embargo, este grano presenta más ataque de plagas (*Helicoverpa zea*) que después de los 32 días los daños causan un mal aspecto visual del elote, pero conserva una apariencia física aceptable para el consumo y el sabor dulce (Figura 3.4).



Figura 3.4. Apariencia física del elote a los 32 días después de la polinización del control dulce GSS1453 (a) y la raza Dulce de Jalisco (b).

Los investigadores O'Hare *et al.* (2015) mencionan que la etapa de consumo comercial del maíz dulce *sh₂* es a los 20 ddp, mientras que para Santos *et al.*, (2014) afirman que es a los 22 ddp cuando está en estado fenológico R4-R5. Las fechas óptimas para consumo de elote varían entre genotipos y ambientes de producción.

3.6. Conclusiones

Se identificaron las fechas de cosecha de diferentes genotipos en base a altos contenidos de sólidos solubles totales y humedad en el grano de elote para ofrecer un producto de mejor calidad. Elotes dulces con los genes *sugary 1* y *shrunkened 2* contienen mayor cantidad de sólidos solubles

totales y se pueden cosechar desde los 24 hasta los 32 ddp, mientras que para los no dulces de 22 a 28 ddp.

3.7. Literatura citada

- Cardoso E. T., Cruz de Melo Sereno M. J. y Barbosa Neto J. F. 2002. Genetic progress for adaptative traits in sweet corn populations. *Maydica*, 47: 121-126.
- Coutiño E., B. V. A. Vidal M., B. Cruz G. y C. Cruz V. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4): 57-61.
- Coutiño E., B., V. A. Vidal M., C. Cruz V. y M. Gómez G. 2015. Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (5): 1119-1127.
- De Vries BD y Tracy WF. 2016. Characterization of endosperm carbohydrates in *isa2-339* maize and interactions with *sul-ref*. *Crop Science Society of America*, 55: 2277-2286.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Diario Oficial de la Federación. Acuerdo por el que se determinan centros de origen y centros de diversidad genética del maíz. México, D.F. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5276453&fecha=02/11/2012.
- Favarato, L. F., J. L. De Souza, J. C. Cardoso G., C. Marciano S., J. M. De Souza B. and R. Carvalho G. 2016. Qualitative attributes and postharvest conservation of green ears of maize grown on different cover crops in organic no-till system. *Revista Ceres, Vicososa* 63 (4): 532-537.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ed. Instituto de Geografía. UNAM, México, D.F. 217 p.
- Lazcano C, Revilla P, Malvar RA and Domínguez J. 2011. Yield and fruit quality of four sweet corn hybrids (*Zea mays*) under conventional and integrated fertilization with vermicompost. *Journal of Science of Food Agriculture*, 91:1244–1253.
- Lertrat, K. and T. Pulam. 2007. Breeding for increased sweetness in sweet corn. *International Journal of Plant Breeding* 1(1):27-30.
- O'Hare TJ, Fanning KJ y Martin IF. 2015. Zeaxanthin biofortification of sweet-corn and factors affecting zeaxanthin accumulation and color change. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 572:184-187.
- Ortiz-Torres, E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, J. A. Hernández-Guzmán y M. Valadez-Ramírez. 2013. Rendimiento y

- calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19 (2): 225-238.
- Santos PHAD, Pereira MG, Trindade RDS, Silva da Cunha K, Entringer GC and Julio Vettorazzi JCF. 2014. Agronomic performance of super-sweet corn genotypes in the north of Rio de Janeiro. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14: 8-14.
- SAS Institute. 1999. SAS Procedure Guide, Release 8.0. Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1643 p.
- Singh, I., S. Langyan and P. Yadava. 2014. Sweet corn and corn-based sweeteners. *Sugar Technology* 16(2): 144-149.
- Schultz JA, Juvik JA. 2004. Current model for starch synthesis and the *sugary enhancer1 (se1)* mutation in *Zea mays*. *Plant Physiology and Biochemistry* 42: 457-464.
- Solomon I KF and Zeppa MA. 2012. Genetic effects and genetic relationships among shrunken (sh2) sweet corn lines and F1 hybrids. *Euphytica* 185:385–394.
- Trimble, L., S. Shuler and W. F. Tracy. 2016. Characterization of five naturally occurring alleles at the Sugary1 locus for seed composition, seedling emergence, and Isoamylase1 activity. *Crop Science* 56: 1927-1939.
- Valdivia-Bernal, R., F. J. Caro-Velarde, R. Medina-Torres, M. Ortiz-Catón, A. Espinoza-Calderón, V. A. Vidal-Martínez y A. Ortega-Corona. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloteras de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4):63-67.
- Worranjida J, Lertrat K y Suriharn B, 2013. Combining ability of super sweet corn inbred lines with different ear sizes for ear number and whole ear weight. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 45 (3) 468-477.

CAPÍTULO IV: EMERGENCIA DE PLÁNTULA Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES EN SEMILLAS DE MAÍCES NATIVOS CON EL GEN *shrunk* 2

4.1. Resumen

Los maíces amarillos dulces enlatados son muy populares como ingredientes de varios platillos en la comida mexicana y se considera como una hortaliza en otros países como Estados Unidos. En México no se producen maíces dulces y el consumo de elotes de este tipo ya sea enlatado o como elote entero proviene de la importación. El objetivo de este estudio fue incorporar el gen mutante *shrunk* 2 a tres razas de maíz adaptadas a Valles Altos del centro de México para incrementar el sabor dulce del elote. Se utilizaron tres colectas pertenecientes a las razas Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos en Montecillo, Estado de México. Se midió el contenido de sólidos solubles totales en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Se aplicó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey. El contenido de sólidos solubles fue mayor en las versiones dulces mutantes de las razas originales y alcanzaron valores de 15.3 ° Brix, similar al testigo comercial dulce con el mismo gen mutante. Sin embargo, la emergencia de los maíces dulces disminuyó cerca del 50 % en comparación con la versión original debido a los efectos desfavorables del gen *shrunk* 2 en el vigor de las plantas y al efecto de la depresión endogámica en las poblaciones nativas. Sin embargo, el vigor puede mejorarse significativamente con mejoramiento genético. Las versiones mutantes de las poblaciones nativas estudiadas representan una alternativa de consumo de elotes dulces en zonas aledañas a Valles Altos.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz dulce, *shrunk* 2, grados Brix.

4.2. Abstract

Canned yellow sweet corn is very popular as ingredients of various dishes in Mexican food and is considered as a vegetable in other countries such as the United States. In Mexico, sweet corn is not produced and the consumption of this type of tender maize either canned or as unhusked ear comes from importation. The aim of this study was to introduce *shrunk2* gene into three maize landraces adapted to the Mexican central highlands to increase the sweet taste of tender corn. Three collections belonging to the races Cacahuacintle, Chalqueño and Elotes Cónicos were evaluated in Montecillo, Estado de México. Total soluble solids content was measured in a complete block design with two replications. Variance analysis and Tukey's means comparison test were applied. Soluble solids content was higher in mutant sweet versions and reached values of 15.3 ° Brix, similar to the sweet commercial control with the same mutant gene. However, the emergence of sweet corn decreased by about 50% compared to original version due to unfavorable effects of the *shrunk2* gene on plant vigor and the effect of inbreeding depression on native populations. However, plant emergence can be significantly improved easily with plant breeding. The mutant versions of the native populations studied represent an alternative of consumption of sweet corn in areas close to central highlands.

Palabras clave: *Zea mays*, sweet corn, *shrunk2*, degrees Brix.

4.3. Introducción

Los maíces dulces con el gen mutante *shrunked 2* (*sh₂*) son muy populares como hortalizas en países como Estados Unidos y Canadá. En México su consumo se limita a la forma enlatada de este producto que se usa como ingrediente en la preparación de diversos platillos. Aunque en algunas zonas del centro del país ya se consumen estos maíces dulces en forma de elote entero hervido. Originalmente, el maíz dulce solamente contenía al gen recesivo *sugary 1* (*su₁*), que ante la búsqueda de seguir incrementando el contenido de azúcares en el elote se encontraron otros genes mutantes como el *sugary 2*, *brittle 1* y *shrunked 2* (*sh₂*). Variedades con el gen *sh₂* son los que tiene mayor valor comercial porque contienen del 15 al 30 % de azúcares y con ello superan a otros maíces dulces como los *su₁* que tienen de 9 a 14 % de azúcares y a maíces no dulces con solo 3 % (Creech, 1965; Texeira *et al.*, 2013). Estos altos niveles de azúcares son debidos a que estos granos no producen la ADP-glucosa pirofosforilasa, lo que resulta en una gran reducción de la producción de almidón y el consecuente incremento de azúcares en el endospermo (Dodson-Swenson y Tracy, 2015).

Los maíces dulces tienen algunas características agronómicas indeseables como poca emergencia en campo, bajo vigor de planta y susceptibilidad a plagas y enfermedades (Tracy, 2001). Los genotipos que contienen el *sh₂* son lo que presentan mayor problema de vigor porque su producción de almidón es muy poca o nula por causa de la mutación que posee, la cual forma granos de aspecto chupado o arrugado, con apariencia de no ser semillas no viables.

Viesselmann *et al.* (2014) publicaron que utilizaron germoplasma de la raza Cacahuacintle como una fuente genética para la adaptación a climas templados de variedades dulces que contienen a los genes *su₁* y *sh₂*. Pero no se encontraron estudios para el incremento de azúcares

con genes mutantes a razas mexicanas para su uso como elote dulce. En localidades de El Bajío mexicano, como Celaya y Comonfort, se siembran híbridos comerciales como GSS1453 y Overland para atender la demanda de elotes dulces para su consumo como elote entero hervido. En esta misma zona se consume la raza Elotes occidentales, un elote de gran tamaño con color de grano rojo/morado, la usan para asarlo a las brasas por sus características en textura más firme del grano, en contraste con los maíces dulces que son muy suaves por el tipo de mutación que poseen y no son aptos para ser asados.

El consumo de elote en los Valles Altos centrales de México proviene de las razas Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Occidentales de manera local, y su principal uso es como elote hervido, asado o en esquite. No obstante, en esta región predomina el A7573 por las características físicas y de postcosecha del elote, combinado con una escasez de elotes nativos. En el mercado de elotes es importante tener productos de calidad y que sean novedosos. Una opción más para el consumidor es ofrecer las mismas razas a las que están acostumbrados, pero con sabor más dulce del elote y pueda usarlo como elote entero hervido o en granos cortados como ingredientes frescos de varios platillos. El objetivo de este trabajo fue incorporar el gen *shrunkn 2* mediante cruzamientos entre plantas a estas tres poblaciones nativas de Valles Altos y evaluar la emergencia de semilla sembrada en campo y los sólidos solubles de los elotes producidos por estas razas portando el gen *sh2*.

4.4. Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron tres accesiones de maíces nativos de México adaptados a los Valles Altos: CPue 185, Hgo 428 e Hgo 416 de la raza Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos, respectivamente.

A estas colectas se les incorporó el gen *shrunkened 2* (*sh2*) como sigue: se utilizó una colecta del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) como donador del gen *sh2*, y con este genotipo en 2016 se polinizaron manualmente a las tres razas para obtener la generación filial 1 (F₁). Debido a que el gen *sh2* se expresa en condición homocigótica recesiva, en 2017 se realizó la autofecundación de plantas F₁ para así obtener la F₂. En la F₂ este gen presentó una segregación mendeliana (confirmado por pruebas de X²), y en la población se seleccionó una cuarta parte de semillas con el fenotipo característico del gen, reconocible porque son de aspecto chupado y muy arrugado (Figura 4.1).



Figura 4.1. Expresión fenotípica del gen mutante *shrunkened 2* (flechas rojas) en la generación filial 2 (F₂) en la raza Cacahuacintle (a) y Elotes Cónicos (b).

En 2018 se obtuvo la generación F_{2:3} de las razas Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos para cuantificar la ganancia en contenido de sólidos solubles totales por la presencia de *sh2* en condición homocigótica recesiva y también para evaluar en campo la emergencia de plántulas derivadas por germinación de esas semillas. Como testigo se usó un testigo híbrido comercial

superdulce Gss1453 que contiene el gen *sh2*, el cual es usado para la producción de elote dulce para consumo en fresco en algunas zonas de El Bajío como Celaya y para industria del enlatado y congelado en mercados como Estados Unidos.

Sitio y diseño experimental

El crecimiento de las plantas se efectuó en el ciclo primavera-verano de 2018 en Montecillo, Texcoco, Estado de México, México (19° 29' N y 98° 53' O, a 2250 msnm). El clima es del tipo Cb (wo)(w)(i') g, correspondiente a templado con verano fresco largo, temperatura media anual entre 12 y 18° C. El mes más frío varía entre 6.5 y 22 °C, y la precipitación media anual es de 637 mm (García, 1988).

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de cinco surcos de 5 m de longitud y 0.8 m entre surcos, distanciadas a 0.5 m entre ellas, con una densidad de población estimada de 50 mil plantas ha⁻¹. El manejo fue bajo un régimen de riego y una dosis de fertilización de 180N-60P-0K aplicada en dos etapas, la primera en la siembra con la mitad de nitrógeno (urea) y todo el fósforo (fosfato diamónico) y el resto del nitrógeno a los 45 d después de la siembra. Debido a que el fenotipo dulce de elote se expresa en condición homocigótica recesiva del gen *sh2*, en las tres poblaciones F_{2:3} superdulces estudiadas, se realizaron polinizaciones controladas de cada elote para evitar que el grano recupere la apariencia normal por la influencia de polen de otros maíces.

Emergencia de plantas superdulces

A las plantas F_{2:3} superdulces también se les evaluó la capacidad de emergencia comparadas con su versión normal para medir el efecto que causa este gen en vigor inicial de las plantas mutantes. Se registró la emergencia diariamente después de los 8 días de la siembra y hasta los 16

días. Con los datos obtenidos se calculó un índice de emergencia para asignar una calificación a los genotipos durante este periodo de tiempo.

Contenido de sólidos solubles totales

En la población F_{2:3} superdulce con control de la polinización se realizaron dos fechas de muestreo para la determinación de sólidos solubles totales (SST): a los 26 y 28 días después de la polinización, periodo óptimo para la cosecha de estos genotipos por tener buena acumulación de SST (determinado en experimentos previos). En cada fecha de muestreo se cosecharon cinco elotes para obtener un extracto homogéneo para la cuantificación de SST expresados en ° Brix. La determinación (por triplicado) de SST se hizo con un refractómetro digital (Atago Pal-1[®], Tokio, Japón) en 300 µL del extracto.

Análisis de datos

A cada variable se le hizo análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Antes de esto se verificó el supuesto de distribución normal a cada variable estudiada. Todos los análisis de datos se efectuaron con el paquete estadístico SAS 8.0 (SAS Institute, 1999).

4.5. Resultados y discusión

Análisis de varianza

La emergencia de las plantas en semillas de maíz con el gen *shrunk2* disminuyó drásticamente en comparación con versión original desde los siete días después de la siembra (Cuadro 4.1). El efecto de las repeticiones entre los bloques no tuvo efecto significativo en el comportamiento del genotipo.

Cuadro 4.1. Cuadrados medios para emergencia de plántulas durante 9 días de evaluación en maíces dulces con el gen *sh2* y su versión normal.

Días después de la siembra	Genotipo	Repetición	C.V.
7	4473.1***	63.3 ns	15.8
8	3900.6***	10.3 ns	11.4
9	3545.6***	24.5 ns	9.5
10	3291.1***	26.5 ns	8.2
11	3062.6***	10.0 ns	8.0
12	2927.1***	9.5 ns	6.9
13	2902.9***	9.5 ns	6.9
14	2934.9***	10.3 ns	7.3
15	2792.5***	15.0 ns	6.5
VE	47.3***	0.3 ns	7.8

Emergencia de plantas superdulces

La velocidad de emergencia también fue diferente durante los días evaluados y fue mayor a los 7 días después de la siembra. En los demás días la emergencia hubo algún tipo de condición adversa que les impidió emerger rápidamente como la profundidad de siembra, disponibilidad de agua o algún daño mecánico en la semilla. Los maíces con endospermo normal (N, versión original nativo) mostraron porcentajes de emergencia de 92 al 96 % a los 7 después de la siembra (dds), mientras que los superdulces (D, *sh2*, versión mutada) fue de 20 al 30 % (Cuadro 4.2). A los 15 días

dds el máximo porcentaje de emergencia en los superdulces nativos fue de 52 %, mientras que el híbrido comercial alcanzó a 73 % de plantas emergidas en este mismo tiempo, como era de esperarse por el grado de mejoramiento genético que tiene.

Cuadro 4.2. Medias de los porcentajes de emergencia de plantas de maíz no dulce (N) y dulce (D) con el gen *sh2*, de los 7 a los 15 días después de la siembra.

Colecta	Endospermo/ Genotipo	Días después de la siembra									VE
		7	8	9	10	11	12	13	14	15	
CPue185	N (SH2/SH2)	93 a	95 a	96 a	96 a	97 a	97 a	98 a	98 a	98 a	12 a
CPue185	D (<i>sh2/sh2</i>)	21 bc	34 bc	40 c	43 c	48 c	49 c	50 c	51 c	52 c	6 c
Hgo428	N (SH2/SH2)	96 a	99 a	99 a	100 a	12 a					
Hgo428	D (<i>sh2/sh2</i>)	24 bc	32 c	37 c	39 c	43 c	45 c	45 c	47 c	47 cd	5 c
Hgo416	N (SH2/SH2)	92 a	97 a	96 a	97 a	98 a	12 a				
Hgo416	D (<i>sh2/sh2</i>)	20 bc	26 cd	31 c	34 c	36 c	38 c	38 c	39 c	39 d	4 c
Gss1453	D (<i>sh2/sh2</i>)	33 b	52 b	56 b	64 b	68 b	70 b	72 b	72 a	73 a	8 b
DSM		21.8	18.1	15.9	14.5	14.5	12.9	13.1	13.9	12.4	1.7

Nota: Se eliminaron los datos de A7573 porque presentó muy bajo porcentaje de emergencia al tener dos años en almacenamiento no adecuado.

Los maíces dulces presentaron bajo vigor de semilla y poca emergencia en campo, factores que restringen su cultivo. En este estudio las causas del bajo vigor también se atribuyen a la alta susceptibilidad de las poblaciones nativas al efecto de la endogamia. Para mitigar el problema del

vigor se han aplicado tratamientos de poliaminas como putrescina y espermidina (pequeños compuestos nitrogenados policatiónicos alifáticos) que mejoran esta característica al estar relacionados con el metabolismo de hormonas vegetales (Huang *et al.*, 2017). Esta misma característica también se puede mejorar durante el proceso de mejoramiento genético al seleccionar maíces con alto vigor en campo, como se ha hecho con los híbridos comerciales.

Contenido de sólidos solubles totales

En contenido de sólidos solubles, el análisis de varianza realizado encontró diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las razas nativas no dulces y sus versiones dulces a los 26 (***) y 28 (***) días después de la polinización, con coeficientes de variación del 2.8 y 3.8, respectivamente. Las versiones dulces tuvieron mayores contenidos de SST que las versiones originales no dulces (Figura 4.2), cuyos valores específicos se detallan en el Cuadro 4A.

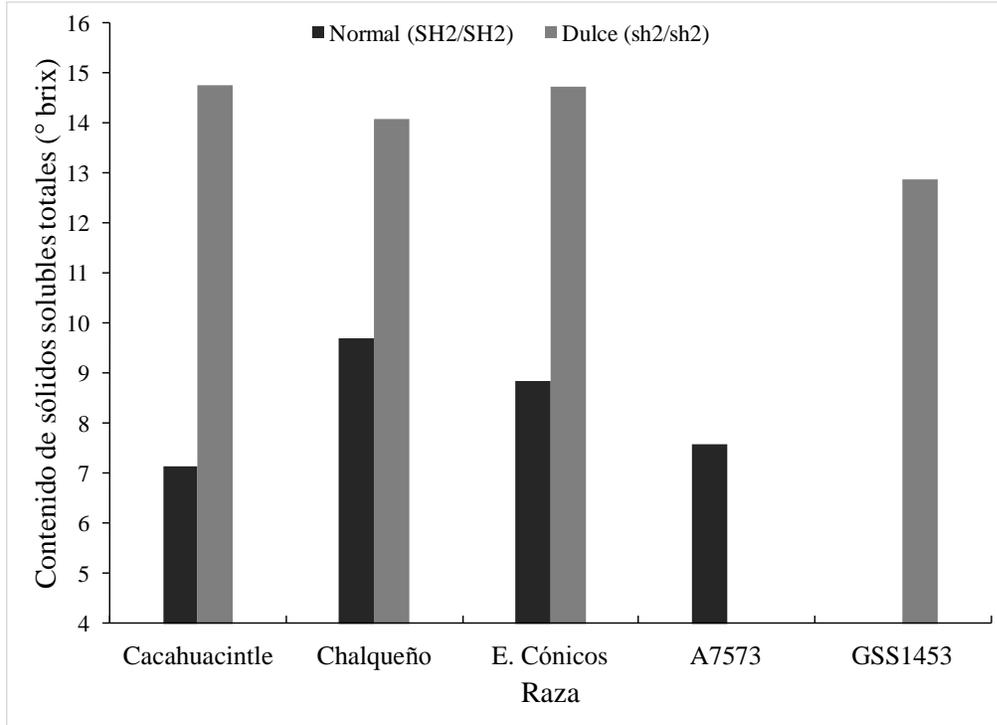


Figura 4.2. Acumulación de sólidos solubles totales en razas nativas mexicanas con endospermo normal o dulce, a los 28 días después de la polinización. A7573 es el testigo comercial de endospermo normal, y GSS1453 es el testigo comercial de endospermo dulce.

Para la mayoría de los genotipos, la máxima acumulación de SST se alcanzó a los 26 ddp, en donde el máximo valor fue 15.3 ° Brix en Cacahuacintle dulce (sh_2/sh_2), superior al híbrido comercial GSS1453 (sh_2/sh_2) y a su versión normal (SH2/SH2). Szymanek *et al.* (2015) reporta que en una variedad dulce sh_2/sh_2 el máximo nivel de azúcares se alcanzó a los 21 ddp con humedades entre 74 y 75 %. En esta tesis la máxima acumulación se encontró a los 26 ddp con 77 % de humedad (Capítulo III). Esto indica que existen condiciones ambientales y genotípicas particulares en cada zona de producción de elote.

4.6. Conclusiones

Se logró introducir el gen mutante *shrunk2* a tres razas nativas mexicanas adaptadas a valles altos que incrementó el contenido de sólidos solubles totales desde 7 a 15.3 ° Brix. Sin embargo, este mejoramiento en dulzor provocó pérdidas en vigor de las plántulas durante la germinación en campo. Se tienen maíces nativos que se comparan en el sabor dulce de los híbridos superdulces comerciales para el enlatado y congelado, aunque es necesario mejorar características agronómicas para poder competir en el mercado de los maíces dulces.

4.7. Literatura citada

- Creech, R.G. 1965. Genetic control of carbohydrate synthesis in maize endosperm. *Genetics* 52:1175–1186.
- Dodson-Swenson H G and Tracy F W. 2015. Endosperm carbohydrate composition and kernel characteristics of *shrunk2-intermediate* (*sh2-i/sh2-i Su1/Su1*) and *shrunk2-intermediate-sugary1-reference* (*sh2-i/sh2-i su1-r/su1-r*) in Sweet Corn. *Crop Science Society of America*, 55:2647–2656.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ed. Instituto de Geografía. UNAM, México, D.F. 217 p.
- Huang Y, Lin C, He F, Li Z, Guan Y, Hu Q and Hu J. 2017. Exogenous spermidine improves seed germination of sweet corn via involvement in phytohormone interactions, H₂O₂ and relevant gene expression. *BMC Plant Biology* 17:1.
- SAS Institute. 1999. SAS Procedures Guide, Release 8.0. Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 1643 p.
- Tracy, W.F. 2001. Sweet corn. *In: Specialty corns*. A.R. Hallauer, editor. 2nd ed. CRC Press, New York. pp. 155–196.
- Viesselmann, L M, De Vries B, Dodson BHG, and Tracy FW. 2014. Recurrent Selection for Seedling Growth of Sweet Corn in Cool Temperatures, *Crop Science Society of America* 54:1033–1040.
- Szymanek M, Tanas W and Kassab FH. 2015. Kernel carbohydrates concentration in *sugary-1*, *sugary enhanced* and *shrunk2* sweet kernel. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7: 260-264.

DISCUSIÓN GENERAL

La identificación y colecta de maíces nativos mexicanos para uso elotero condujo a efectuar estudios para la identificación de los mejores genotipos dentro de cada raza con el propósito de generar variedades eloteras mejoradas. Primero se realizó la colecta de tres razas adaptadas a la región de Valles Altos y otras dos de El Bajío. La colecta Dulcillo del Noroeste se evaluó en El Bajío por tener condiciones ambientales más cercanas a su lugar de adaptación.

Los maíces nativos estudiados de las dos áreas geográficas sobresalieron en características de calidad, en comparación con el híbrido comercial A7573 como son mayores contenidos de sólidos solubles totales (más dulces), mayor contenido de proteínas totales y de mejor sabor de elote para el caso de elotes de Valles Altos. En El Bajío no se pudieron realizar las pruebas de degustación de elotes de razas estudiadas en Bajío.

La calidad de elote puede ser el factor más importante para el mercado local. Por ejemplo, el consumidor común de Valles Altos puede preferir un elote de Cacahuacintle porque le encuentra un mejor sabor de grano, y en aspecto le gustan los granos grandes y blancos, y además que sea dulce, características suficientes para que se considere un producto bueno. Sin embargo, para el resto del mercado nacional (otras grandes ciudades), el tamaño de elote es la característica más importante para la producción comercial, como mencionaron Coutiño *et al.* (2015) en cuanto a que los compradores de elote de una región de Chiapas no buscan el sabor dulce de elote, sino que el elote sea de gran tamaño. Para mercados internacionales como Estados Unidos, la calidad es el principal factor para tener un buen elote; en este país han desarrollado variedades eloteras con un

alto contenido de azúcares que les llaman dulces y superdulces, en donde el consumidor no se guía por la apariencia física del elote, sino por el sabor, textura y suavidad (Lertrat y Pulam, 2007).

De todas las razas nativas aquí estudiadas se identificaron genotipos que en variables de tamaño de elote (longitud, diámetro y número de hileras) igualan o superan al híbrido comercial de referencia. Sin embargo, dichas características no están combinadas en una sola población, sino que se encuentran en diferentes razas y es lo que identifica a cada una de estas poblaciones. En Celaya, Guanajuato para longitud de elote se encontró a la colecta Roque (Elotes Occidentales) con 23.6 cm que igualó al híbrido comercial A7573 con 23.1 cm, pero Roque tiene menos hileras y menos diámetro de elote. Zac-Q-12 (Cacahuacintle) también destacó por tener un diámetro de elote similar al testigo, 5.1 y 5.0 cm, respectivamente. Cacahuacintle es el principal tipo de elote que se encuentra en los mercados locales de Valles Altos, cuya gran ventaja es que posee un gran sabor y textura de grano masoso. En épocas de escasez de elotes de híbridos, el Cacahuacintle llega a tener un sobreprecio de 30 pesos mexicanos por elote (dependiendo del tamaño) en mercados de Toluca, Estado de México, en comparación con el elote de los híbridos que llega a costar 15 pesos aproximadamente, entre ellos el A7573.

Tener un producto con características de la raza Cacahuacintle podría ser competitivo con el elote del híbrido comercial si se mejora la longitud de elote (tendiendo a grande) mediante la incorporación de genes para esta característica de la raza Elotes Occidentales, por ejemplo, o incluso de la raza Jala. En adición, se tienen que implementar esquemas de mejoramiento para evitar que las plantas se caigan (acame) en campo, porque esto es uno de los principales problemas de producción de las razas nativas. En número de hileras y disposición de hileras rectas de elote,

sobresale Mich-195 (Chalqueño), el cual tiene potencial como una fuente de genes para el mejoramiento genético. La raza Chalqueño se caracteriza por tener un grano semi-dentado (cristalino), de color amarillo cremoso, característica que se aproxima al híbrido A7573.

Otra opción para el mercado de elote es el maíz azul (Elotes Cónicos) con alto contenido de antocianinas (Ford, 2000). Se ha reconocido la relevancia nutracéutica de las antocianinas como antioxidantes, anticancerígenas y reductores de triglicéridos de colesterol (De Pascual y Sánchez, 2008). Estos maíces podrían ser posicionados inicialmente en pequeños mercados que conocen los beneficios del consumo de este elote, principalmente dirigido a gente adulta que aprecia estas características nutracéuticas. Los maíces azules también representan una fuente genética para otras poblaciones en coloración de grano (capa de pericarpio y aleurona), y ello toma más relevancia cuando ya se tiene una variedad elotera que se encuentra en el mercado y se quiera generar un elote de color azul debido a la demanda de los consumidores.

Las razas Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste, se consideran fuentes nativas del gen *sugary 1* (*su1*). Los cruzamientos hechos con genotipos mutantes de referencia (banco de germoplasma del CIMMYT) homocigóticos para este *locus*, indican que estas dos razas tienen el gen *su1*. También coinciden con las características fenotípicas de este gen como es un grano arrugado y chupado cuando se seca el grano y con aspecto traslúcido (Schultz y Juvik, 2004). Esta es una de las mejores opciones de valor agregado para incrementar de manera significativa el sabor dulce del elote a las razas nativas, lo cual sería más eficiente que el aprovechamiento de efectos aditivos (heterosis de una cruce de dos genotipos con alta aptitud combinatoria general o específica para esta característica) como lo proponen diversos investigadores (Coutiño *et al.*, 2010); Valdivia *et*

al., 2010); y Ortíz-Torres *et al.*, 2013). Además, con la presencia del gen *su*₁ no habría interacción importante con el ambiente para el sabor dulce, como lo señalan los autores antes mencionados.

En México se han realizado varios trabajos sobre características eloteras en otras razas nativas, en características como tamaño de elote (longitud, diámetro, número de hileras, granos por hilera), tamaño de grano (longitud, ancho y grosor) (Ortiz-Torres *et al.*, 2013; Coutiño *et al.*, 2015), contenido de sólidos solubles totales (Coutiño *et al.*, 2010; Ortiz-Torres *et al.*, 2013), vida de anaquel (Valdivia-Bernal *et al.*, 2010) y sabor de elote (Fernández-González *et al.*, 2014). No obstante, ningún grupo ha generado algún producto final (variedad elotera) que sea útil tanto para el beneficio de los agricultores o para el mercado de semilla híbrida; es decir, seguimos dependiendo primariamente de la producción de híbridos comerciales no eloteras a para el consumo de elote en este país.

Cabe destacar que después de caracterizar a las colectas de las razas nativas en estudio, se ha continuado con el proceso de mejoramiento genético. Previamente se realizó una cinética de acumulación de sólidos solubles totales en etapa de elote para conocer el comportamiento de los genotipos en esta variable y determinar una ventana óptima de cosecha. Los genotipos de la raza Dulce de Jalisco y Dulcillo del Noroeste presentaron una ventana de cosecha más larga y sus granos con más contenido de sólidos solubles totales, por contener el *su*₁, gen mutante que reduce los niveles de conversión de los azúcares fotosintetizados por la planta a almidón. Estas razas (y todas las demás) no tienen trabajo de mejoramiento genético formal. El gen *su*₁ representa una alternativa de consumo local para mejorar la dulzura, textura y suavidad de elote. Para el mercado nacional e internacional existe otro gen mutante llamado *shrunk 2 (sh*₂*)* que acumula aún más contenidos de azúcares, y es el que se usa comercialmente para la industria del enlatado y

congelado (Lertrat y Pulam, 2007) en Estados Unidos y Canadá. En este trabajo se decidió introducir el gen *sh₂*, pero se cuentan con dos genes mutantes más dentro de las poblaciones nativas de Valles Altos y de Bajío: *sugary 2 (su₂)* y *brittle 1 (bt₁)*. Los fenotipos resultantes de los diferentes cruzamientos coinciden con los ya reportados en la literatura. El gen *su₁* de granos arrugados y translúcidos; *su₂*, de grano normal pero opaco; *bt₁* y *sh₂* de granos muy arrugados, quebradizos y opacos (Schultz y Juvik, 2004).

Los resultados aquí obtenidos mostraron un incremento en el contenido de sólidos solubles totales en elotes en las versiones mutadas de la raza Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos. Los contenidos de SST fueron similares al testigo comercial utilizado, el híbrido GSS1453. Se incrementó el contenido de azúcares en elote, pero disminuyó casi al 50 % el porcentaje de emergencia de plántulas en semillas sembradas en campo. Se tiene reportes que el gen *sh₂* tiene poco vigor y emergencia de plántula y esto representa una restricción para el uso extensivo de variedades dulces de este tipo. Para tratar de mejorar este problema se han aplicado poliaminas como la espermidina que han mejorado la respuesta en la velocidad de germinación y el crecimiento de las plantas (Huang *et al.*, 2017).

Para mejorar características agronómicas como vigor de plantas y morfológicas (tamaño) de elote se deben de implementar esquemas de mejoramiento formales. A continuación, se presentan tres alternativas:

- a) **Selección recurrente de hermanos completos:** con este método de selección se busca mejorar a la población en características de interés, que para este caso sería aumentar el vigor de las plantas de maíces mutantes dulces con *sh₂*, homogeneizar el tamaño de elote para que se más grande, mejorar la resistencia al acame de raíz y tallo, resistencia a

enfermedades como la roya y mantener o aumentar la calidad nutritiva de elote en contenido de lisina y triptofano en cada raza. En general, este método consiste en formar cerca de 250 familias de hermanos completos a partir de una población o raza de interés, las cuales se evalúan las familias en varias localidades en donde se pretende cultivar este maíz posteriormente, se seleccionan las mejores familias en base a las mejores características de elote (10-20 %) y se mezclan. La mezcla se siembra en un lote asilado para que se recombinen y nuevamente se eligen las mejores 250 familias de hermanos completos para iniciar con el segundo ciclo de mejoramiento. El número de ciclos de selección a realizar depende de varios factores, los más importantes son la disponibilidad de recursos humanos y económicos y el tipo de herencia de las características a mejorar (si es de efectos aditivos o de dominancia).

- b) **Retrocruzas:** con este método se busca recuperar la raza original ya que durante la inserción del sh_2 mediante un cruzamiento y la planta resultante tiene solamente 50 % del genoma de la raza de interés. Se realizan cruzamientos recurrentes hacia la raza nativa, generalmente hasta 5 retrocruzas, lo cual asegura cerca del 99 % (98.4) del genoma original. El inconveniente es por una parte que las razas originales no han tenido trabajo de mejoramiento formal, de modo que sólo tendría la característica más dulce, pero sin mejorar otras características. El otro inconveniente es que el tiempo para recuperar el genoma de interés sería 5 años si se hace un ciclo por año como se hace en el Colegio. Este tiempo se puede reducir a más de la mitad, en un año y medio si se realizan tres ciclos de cultivo al año como lo hacen las empresas nacionales de semilla híbrida.

c) **Hibridación:** el propósito por la que se propone este método es para obtener recurso económico para financiar el programa de mejoramiento genético mediante selección o retrocruz. Muchos programas fracasan porque no hay continuidad en las evaluaciones por falta de presupuesto y lleva a disminuir el número de genotipos y localidades a evaluar en el mejor de los casos. Para que funcione este método es necesario estudiar miles de genotipos para tener suficiente probabilidad de encontrar una buena combinación para formar un híbrido elotero que supere al A-7573. Hay varias estrategias a seguir para definir las poblaciones a evaluar, así como su operatividad en campo. La base de esto es tener buenas poblaciones de partida, y eso se obtiene en el programa de selección, al ir generando buenas familias de hermanos completos cada año y eso alimentará a todos los programas que se quiera realizar en el futuro. Al inicio este método será costoso de implementar, pero con el tiempo el programa puede ser autosuficiente. Esto también representa una herramienta para el proceso de enseñanza del Colegio de Postgraduados para que los estudiantes conozcan y se involucren de manera práctica y formal lo que se aprende en las aulas, y egresar con la mejor preparación para que sean más competitivos en el mercado laboral.

Estas opciones de mejoramiento clásico son las que se proponen para continuar con el proyecto de mejoramiento de elote para Valles Altos, y que con suficiente recurso económico se puede complementar con el mejoramiento molecular como la selección genómica y no descartar a la edición genética.

CONCLUSIONES GENERALES

Las características eloterías de cada raza de maíz estudiado fueron diferentes y son propias de cada región de adaptación. En valles altos se encontraron elotes de granos grandes y blancos (Cacahuacintle), de textura de endospermo semicristalina (Chalqueño) y de color azul (Elotes Cónicos). Para muchas zonas de Bajío, la raza Elotes Occidentales es la que se encuentra en el mercado local, cuya característica principal es el color de grano rojizo/rosa y de gran longitud y de pocas hileras. En ambas regiones geográficas se encuentra el híbrido A7573, el cual se distinguió por su buena apariencia física (mazorca cilíndrica, hileras rectas y llenado de grano hasta la punta del elote) y su gran tamaño.

Calidad de elote es un atributo que caracterizó a las razas nativas estudiadas. Para que este valor agregado pueda ser importante, es necesario realizar mejoramiento a las poblaciones para homogenizar las características distintivas de cada población, así como conjuntarlas en una sola por la variabilidad genética encontrada y de esta manera comercializarlos a un buen precio.

La ventana óptima para cosecha de elotes considerando el contenido de sólidos solubles totales fue mayor para maíces dulces debido a la mutación que presentan en la conversión de azúcares a almidón. En los mutantes dulces se obtuvieron hasta 22 ° Brix y la ventana de cosecha fue a los 24 a los 32 días después de la polinización, mientras que para maíces no dulces el máximo valor fue de 13.5 ° Brix y la ventana de cosecha de 22 a 28 ddp.

Se logró la inserción del gen *shrunk2* en las tres razas de Valles Altos (Cacahuacintle, Chalqueño y Elotes Cónicos) y se mejoró el contenido de sólidos solubles totales hasta 15 ° Brix,

aunque también ocasionó la disminución del vigor de las plántulas en 50 %.

Los hallazgos de esta investigación representan una oportunidad para desarrollar variedades eloteras dulces y no dulces para mercados locales y naciones con fondo genético de razas nativas de México.

Literatura citada

- Coutiño E., B.; V. A. Vidal M., B. Cruz G. y C. Cruz V. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4): 57-61.
- Coutiño E., B., V. A. Vidal M., C. Cruz V. y M. Gómez G. 2015. Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (5): 1119-1127.
- De Pascual TS, Sánchez B MT. 2008. Anthocyanins: from plant to health. *Phytochem Rev* 7: 281-299.
- Fernández-González, I., J. L. Jaramillo-Villanueva, J. A. Hernández G. y P. Cadena-Iñiguez. 2014. Evaluación agronómica y sensorial de ocho genotipos de maíz (*Zea mays* L.) para la producción de elote. *Agroproductividad* 7 (6): 49-51.
- Ford R H. 2000. Inheritance of kernel color in corn: explanations and investigations. *Amer Biol Teacher* 62: 181-188.
- Lertrat, K. and T. Pulam. 2007. Breeding for increased sweetness in sweet corn. *International Journal of Plant Breeding* 1(1):27-30.
- Ortiz-Torres, E., P. A. López, A. Gil-Muñoz, J. D. Guerrero-Rodríguez, H. López-Sánchez, O. R. Taboada-Gaytán, J. A. Hernández-Guzmán, y M. Valadez-Ramírez. 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19: 225-238.
- Schultz JA, Juvik JA. 2004. Current model for starch synthesis and the sugary enhancer1 (se1) mutation in *Zea mays*. *Plant Physiology and Biochemistry* 42: 457-464.
- Valdivia-Bernal, R., F. J. Caro-Velarde, R. Medina-Torres, M. Ortiz-Catón, A. Espinoza-Calderón, V. A. Vidal-Martínez y A. Ortega-Corona. 2010. Contribución genética del criollo Jala en variedades eloteras de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Especial 4):63-67.

APÉNDICE

LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE

Cuadro 1A. Medias de variables para caracterización de elotes en 28 colectas de maíces nativos de Valles Altos. Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2015 y 2016.

Colecta	Calidad			Variables morfológicas			Rendimiento (t ha ⁻¹)	
	SST [‡] (°Brix)	SE (1-9)	PR (% N)	LE (cm)	DE (cm)	NH	RE	RGF
C-Pue-343	10.3 ^{a†}	6.4 ^a	10.1 ^a	17.9 ^b	4.9 ^a	13.9 ^b	9.7 ^b	5.2 ^b
C-Pue-482	10.3 ^a	6.4 ^a	9.7 ^b	19.6 ^b	5.0 ^a	13.2 ^e	11.4 ^a	6.1 ^a
C-Pue-476	11.0 ^a	6.3 ^a	10.2 ^a	17.1 ^b	4.4 ^a	10.7 ⁱ	8.6 ^b	4.8 ^b
C-Pue-491	10.6 ^a	6.6 ^a	10.9 ^a	18.2 ^b	4.6 ^a	12.2 ^g	9.4 ^b	5.1 ^b
C-Pue-472	10.9 ^a	7.0 ^a	10.7 ^a	18.6 ^b	4.5 ^a	10.6 ⁱ	9.4 ^b	5.3 ^b
C-Pue-487	10.9 ^a	6.5 ^a	9.5 ^c	18.1 ^b	4.9 ^a	13.1 ^f	10.1 ^b	5.3 ^b
Cacah-529	11.2 ^a	6.8 ^a	11.6 ^a	17.5 ^b	4.6 ^a	13.7 ^c	8.7 ^b	4.3 ^b
Zac-Q-12	10.1 ^a	6.3 ^a	11.2 ^a	19.8 ^b	5.1 ^a	13.3 ^e	12.0 ^a	6.2 ^a
C-Pue-473	10.0 ^a	6.1 ^a	9.9 ^a	18.4 ^b	5.0 ^a	13.4 ^d	10.9 ^b	6.3 ^a
C-Pue-185	9.6 ^b	6.3 ^a	9.8 ^a	18.6 ^b	4.7 ^a	11.9 ^h	9.9 ^b	5.6 ^b
Hgo-415	10.5 ^a	6.5 ^a	11.6 ^a	17.7 ^b	4.3 ^a	10.3 ⁱ	6.7 ^g	3.6 ^d
Hgo-454-1	11.2 ^a	6.2 ^a	12.3 ^a	18.1 ^b	4.3 ^a	12.2 ^g	8.5 ^b	4.8 ^b
Pue-618	11.6 ^a	5.5 ^b	11.1 ^a	15.7 ^e	4.5 ^a	16.5 ^a	7.6 ^d	5.0 ^b
Hgo-451-1	9.3 ^b	5.7 ^a	11.8 ^a	16.5 ^d	4.5 ^a	13.9 ^b	7.8 ^c	4.5 ^b
Hgo-453-1	10.0 ^a	6.2 ^a	11.4 ^a	16.8 ^b	3.8 ^c	14.3 ^a	8.8 ^b	5.4 ^b

Hgo-416	10.6 ^a	6.7 ^a	12.0 ^a	18.2 ^b	3.9 ^c	9.8 ^k	6.7 ^g	3.9 ^c
Vino	10.8 ^a	5.8 ^a	11.4 ^a	15.7 ^e	4.8 ^a	15.7 ^a	8.4 ^b	4.8 ^b
Hgo-513	10.8 ^a	5.6 ^a	11.2 ^a	17.4 ^b	4.0 ^b	13.8 ^c	7.1 ^e	4.3 ^b
Hgo-451-2	10.7 ^a	5.7 ^a	11.2 ^a	17.5 ^b	4.6 ^a	15.5 ^a	9.4 ^b	5.8 ^b
Hgo-454-2	10.0 ^a	6.1 ^a	12.3 ^a	18.8 ^b	4.5 ^a	13.9 ^b	9.6 ^b	5.9 ^b
Hgo-453-2	10.0 ^a	6.2 ^a	11.7 ^a	18.3 ^b	4.3 ^a	13.4 ^d	8.7 ^b	5.2 ^b
Hgo-437	11.9 ^a	5.6 ^a	11.3 ^a	16.6 ^d	3.9 ^c	13.8 ^c	6.8 ^f	4.2 ^b
Hgo-515	11.5 ^a	6.1 ^a	11.9 ^a	17.3 ^b	4.4 ^a	15.5 ^a	8.6 ^b	5.4 ^b
Hgo-503	10.1 ^a	6.0 ^a	10.3 ^a	16.7 ^c	4.1 ^a	14.5 ^a	7.8 ^c	4.6 ^b
Hgo-524	11.1 ^a	5.5 ^b	11.3 ^a	15.5 ^f	4.5 ^a	16.2 ^a	8.7 ^b	5.0 ^b
Hgo-428	10.4 ^a	6.4 ^a	12.4 ^a	18.8 ^b	4.2 ^a	11.6 ^h	7.8 ^c	4.3 ^b
Mex-491	11.2 ^a	6.0 ^a	11.9 ^a	18.5 ^b	4.3 ^a	15.9 ^a	9.0 ^b	4.7 ^b
Mich-195	13.6 ^a	6.1 ^a	12.4 ^a	16.6 ^d	4.6 ^a	16.5 ^a	9.0 ^b	4.5 ^b
A-7573	9.3 ^b	6.1 ^a	11.4 ^a	23.2 ^a	5.0 ^a	15.0 ^a	16.1 ^a	8.3 ^a
Media	10.7	6.2	11.2	17.8	4.5	13.6	9.1	5.1
DSH (0.05)	3.4	1.4	2.5	2.7	26.6	2.0	3.2	2.5

†Medias con la misma letra dentro de cada columna, no son diferentes uno del otro con $P \leq 0.05$; *SST, sólidos solubles totales; PR, proteínas; SE, sabor; LE, longitud; DE, diámetro; LL, llenado de grano; NH, número de hileras; RE, rendimiento de elote entero; RGF, rendimiento de grano fresco; DSH, diferencia significativa honesta.

Cuadro 2A. Orden aleatorio de degustación del análisis sensorial de elote cocido de las razas adaptadas a Valles Altos, Montecillo 2015 y 2016.

GRUPO 1

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 1. Orden de prueba: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 2

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 2. Orden de prueba: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 1			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 3

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 3. Orden de prueba: 3, 4, 5, 6, 7, 8, 1, 2			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 4

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 4. Orden de prueba: 4, 5, 6, 7, 8, 1, 2, 3			

Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 5

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 5. Orden de prueba: 5, 6, 7, 8, 1, 2, 3, 4			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 6

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 6. Orden de prueba: 6, 7, 8, 1, 2, 3, 4, 5			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 7

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 7. Orden de prueba: 7, 8, 1, 2, 3, 4, 5, 6			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

GRUPO 8

Participante:		Género: H M	Edad: <30, 30-50, >50
Grupo 8. Orden de prueba: 8, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7			
Cuando usted consume un elote ¿Cuál es su tipo favorito?			
Longitud (cm):	Grosor (cm):	Color:	Tamaño grano: G, M, Ch

Cuadro 3A. Escala hedónica internacional aplicado al panel de degustación del análisis sensorial de elotes cocidos en Montecillo, 2015 y 2016.

No. de Parcela	Escala hedónica (1-9)	Escala de calificación gráfica Me disgusta en extremo Me gusta en extremo	De existir, mencione alguna característica notable (Buena o mala)
1		+-----+	
2		+-----+	
3		+-----+	
4		+-----+	
5		+-----+	
6		+-----+	
7		+-----+	
8		+-----+	
9		+-----+	
10		+-----+	
11		+-----+	
12		+-----+	
13		+-----+	

14		+	+
15		+	+
16		+	+
17		+	+
18		+	+
19		+	+
20		+	+
21		+	+
22		+	+
23		+	+
24		+	+
25		+	+
26		+	+
27		+	+
28		+	+
29		+	+
30		+	+
31		+	+
32		+	+
33		+	+

34		+	+
35		+	+
36		+	+
37		+	+
38		+	+
39		+	+
40		+	+
41		+	+
42		+	+
43		+	+
44		+	+
45		+	+
46		+	+
47		+	+
48		+	+
49		+	+
50		+	+
51		+	+
52		+	+
53		+	+

54		+	+
55		+	+
56		+	+
57		+	+
58		+	+
59		+	+
60		+	+
61		+	+
62		+	+
63		+	+
64		+	+
65		+	+
66		+	+
67		+	+
68		+	+
69		+	+
70		+	+
71		+	+
72		+	+
73		+	+

74		+	—————	+	
75		+	—————	+	
76		+	—————	+	
77		+	—————	+	
78		+	—————	+	
79		+	—————	+	
80		+	—————	+	
81		+	—————	+	
82		+	—————	+	
83		+	—————	+	
84		+	—————	+	
85		+	—————	+	
86		+	—————	+	
87		+	—————	+	
88		+	—————	+	
89		+	—————	+	
90		+	—————	+	
91		+	—————	+	
92		+	—————	+	
93		+	—————	+	

Cuadro 4A. Medias de genotipos con endospermo de grano normal (N), dulce (D, *su1*) y superdulce (D, *sh2*) en el contenido de sólidos solubles totales en diez fechas de muestreo en Montecillo, Estado de México.

Genotipo	Maíz	Días después de la polinización									
		16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
CPue185	N	8.8a	9.4ab	9.8b-d	10.1c-e	9.6c-f	9.6f	9.3c	9.1c	8.5c	9.0c
CPue472	N	8.9a	10.2ab	10.6a-d	10.5c-e	10.3b-f	10.5ef	10.2c	10.2c	10.4c	11.1b
Cacah529	N	8.9a	9.5ab	9.7b-d	10.0de	9.2d-f	9.9ef	9.4c	9.0c	9.8c	10.4b
Hgo428	N	8.8a	10.2ab	9.5b-d	9.7e	8.8ef	9.5f	9.4c	9.2c	9.5c	9.9b
Hgo416	N	8.5a	9.0ab	9.3cd	9.9de	10.4b-f	10.5ef	8.7c	9.7c	9.2c	10.3c
Roque	N	7.8a	8.5ab	8.8d	8.1e	9.4d-f	8.0f	8.5c	8.5c	8.5c	7.7c
Gto100	D, <i>su1</i>	9.3a	10.1ab	12.9a-c	13.2a-c	15.5a-c	14.7cd	17.5a	16.9ab	16.8ab	19.8a
Jal204	D, <i>su1</i>	8.8a	9.2 ab	11.7a-d	13.0a-d	14.8a-d	17.6a-c	16.7ab	16.7ab	18.9a	19.7a
Jal300	D, <i>su1</i>	9.0a	10.5ab	13.1ab	13.7ab	17.0a	17.3a-c	19.2a	19.9a	19.4a	20.5a
Jali300	D, <i>su1</i>	10.3a	11.9a	14.1a	16.1a	17.7a	18.3ab	20.8a	19.6a	20.4a	22.3a
Zac79	D, <i>su1</i>	7.9a	8.1ab	11.2a-d	14.3ab	17.0a	19.4a	19.6a	19.8a	20.4a	20.5a
Zac182	D, <i>su1</i>	8.9a	9.3ab	11.8a-d	13.3a-c	14.5a-e	17.7a-c	17.7a	17.9a	18.9a	19.5a
Sin34	D, <i>su1</i>	9.2a	9.3ab	13.0a-c	15.8a	15.7ab	15.8b-d	19.9a	18.7a	20.7a	20.7a
A7573	N	7.1a	7.4b	8.0d	8.6e	7.9f	9.1f	8.8c	8.2c	8.2c	8.0c
Gss1453	D, <i>sh2</i>	8.1a	8.8ab	9.7b-d	11.2b-e	11.8a-f	13.1de	12.6bc	12.1bc	12.7bc	11.8b
DSM		3.7	3.8	3.8	3.2	6.0	3.3	4.9	5.7	5.8	6.9

Cuadro 5A. Acumulación de sólidos solubles totales en razas nativas con endospermo normal y dulce a los 26 y 28 días después de la polinización. A7573 control de endospermo normal y GSS1453 control de endospermo dulce.

Colecta	Raza	Endospermo/Genotipo	Días después de la polinización	
			26	28
CPue185	Cacahuacintle	Normal (SH2/SH2)	8.5 f	7.1 d
CPue185	Cacahuacintle	Dulce (<i>sh₂/sh₂</i>)	15.3 a	14.7 a
Hgo428	Chalqueño	Normal (SH2/SH2)	10.0 e	9.7 c
Hgo428	Chalqueño	Dulce (<i>sh₂/sh₂</i>)	14.4 b	14.1 a
Hgo416	E. Cónicos	Normal (SH2/SH2)	8.5 f	8.8 c
Hgo416	E. Cónicos	Dulce (<i>sh₂/sh₂</i>)	12.0 d	14.7 a
A7573	Híbrido	Normal (SH2/SH2)	8.1 f	7.3 d
Gss1453	Híbrido	Dulce (<i>sh₂/sh₂</i>)	13.0 c	12.9 b
DSM			0.7	0.9

LISTA DE FIGURAS DEL APÉNDICE

Figura 1A. Atributos de calidad de elote de maíces dulces y no dulces en a) contenido de sólidos solubles totales y b) de proteínas.

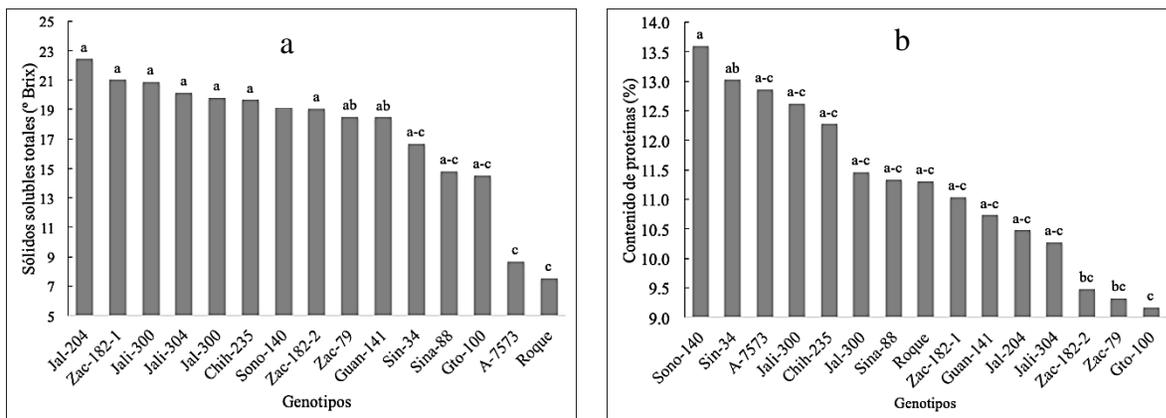


Figura 2A. Variables de apariencia física de elote: a) longitud; b) diámetro; y c) número de hileras en maíces dulces y no dulces.

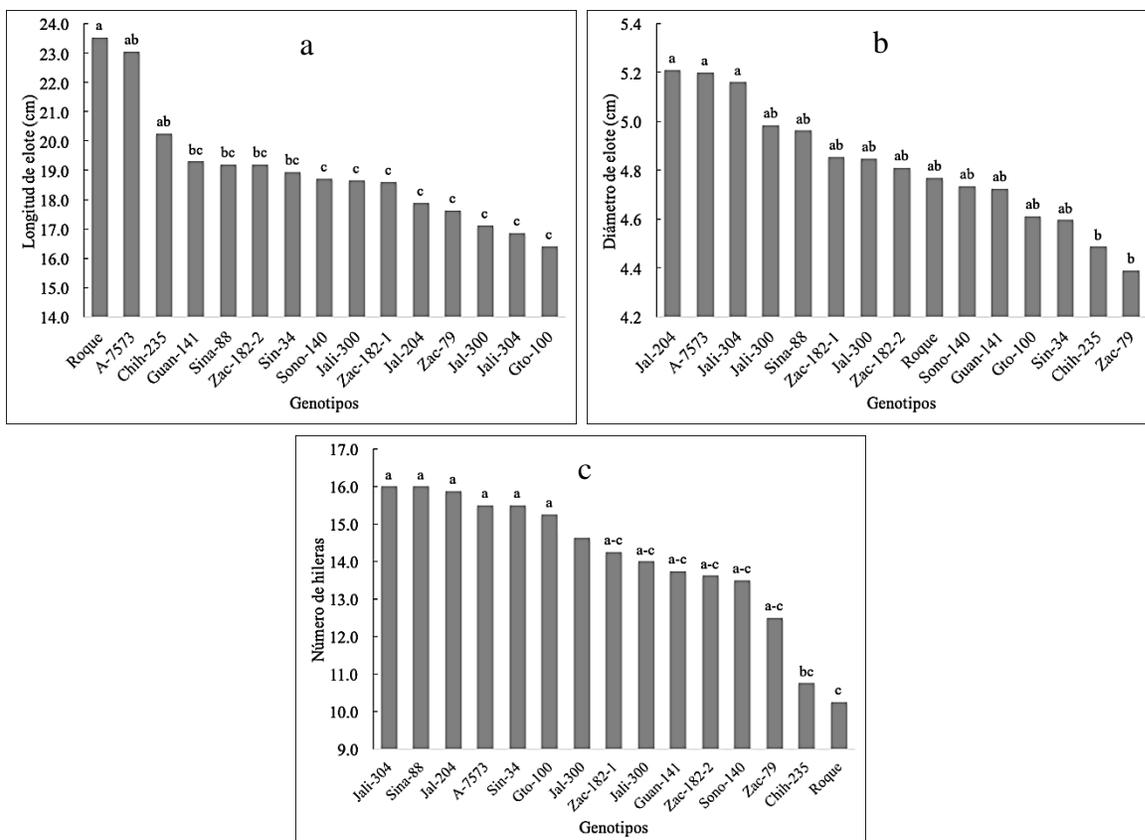


Figura 3A. Rendimiento de elote entero, de grano fresco y de grano seco de maíces dulces y no dulces. Se indican con la letra *a* los genotipos superiores estadísticamente dentro de cada tipo de barra.

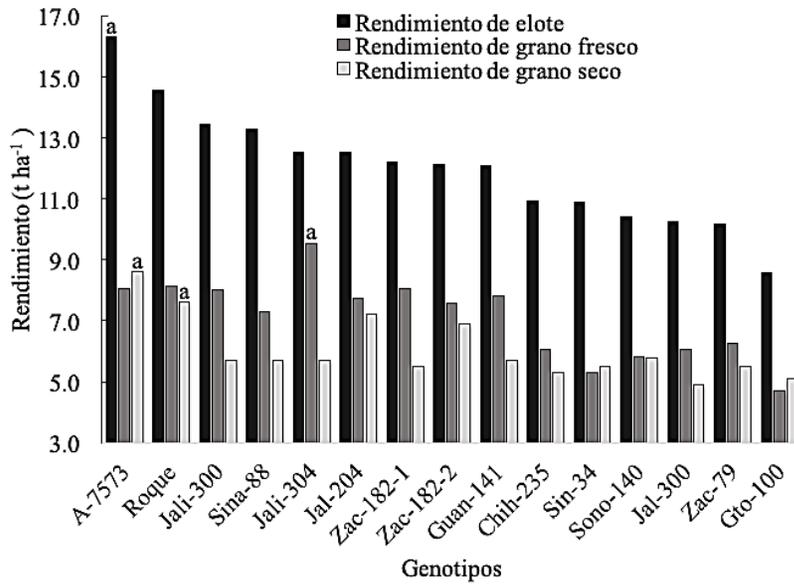


Figura 4A. Fenotipos mutantes de *sugary 2*, *brittle 1*, *shrunkened 2* y *sugary 1* provenientes del banco de germoplasma del CIMMYT.

