

## SELECCIÓN DE MAÍCES NATIVOS COMO DONADORES DE CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS ÚTILES EN HÍBRIDOS COMERCIALES

### SELECTION OF MAIZE LANDRACES AS DONORS OF USEFUL AGRONOMIC CHARACTERISTICS IN COMMERCIAL HYBRIDS

José L. Ramírez-Díaz<sup>1\*</sup>, Alejandro Ledesma-Miramontes<sup>1</sup>, Víctor A. Vidal-Martínez<sup>2</sup>,  
Noel O. Gómez-Montiel<sup>3</sup>, José A. Ruiz-Corral<sup>1</sup>, Gustavo A. Velázquez-Cardelas<sup>4</sup>, José Ron-Parra<sup>5</sup>,  
Yolanda Salinas-Moreno<sup>1</sup> y Luis A. Nájera-Calvo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km. 8 Carr. Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. <sup>2</sup>Campo Experimental Santiago Ixcuintla, INIFAP. Km. 6 Carr. Internacional México-Nogales. 63600, Santiago Ixcuintla, Nayarit. <sup>3</sup>Campo Experimental Iguala, INIFAP. Km. 2.5 Carr. Iguala-Tuxpan. 40000, Iguala, Guerrero. <sup>4</sup>Campo Experimental Valle de México, INIFAP. Km. 13.5 Carr. Los Reyes-Texcoco, Coatlincán. 56250, Texcoco, Edo. de México. <sup>5</sup>Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), Universidad de Guadalajara. Camino Ramón Padilla Sánchez #2100. Nextipac, Zapopan, Jalisco.

\*Autor para correspondencia: (ramirez.joseluis@inifap.gob.mx)

#### RESUMEN

México es centro de origen del maíz (*Zea mays* L.) y como tal, la especie posee una amplia diversidad genética. Sin embargo tal diversidad ha sido poco aprovechada por los programas públicos de mejoramiento genético de México en el desarrollo de híbridos comerciales, pues en parte, se usan metodologías que no involucran el uso directo de pares heteróticos mejorados. Los objetivos de esta investigación son: (i) presentar una propuesta metodológica para incorporar germoplasma de maíz nativo sobresaliente en pares heteróticos mejorados para generar híbridos simples comerciales de maíz, y (ii) mostrar resultados de la aplicación de esta metodología en el rendimiento y tamaño de grano de los híbridos y sus progenitores. La metodología consta de tres etapas: 1) selección del par heterótico mejorado, 2) selección e incorporación del germoplasma nativo al material mejorado, y 3) la aplicación del método de selección recíproca recurrente (SRR) con una modificación por selección familiar. Para evaluar la metodología se seleccionó una cruz simple subtropical a cuyos progenitores se incorporó 25 % de germoplasma de las razas Ancho y Tabloncillo, respectivamente. Se derivaron líneas S<sub>1</sub>, y se obtuvieron mestizos, los cuales se evaluaron en cuatro localidades. La metodología propuesta fue efectiva para incorporar germoplasma nativo al mejorado, pues en los dos grupos de razas, se identificaron mestizos con rendimiento de grano similar a la cruz simple original. También, fue efectiva para aumentar los tamaños de grano plano extra grande, grande y medio, respectivamente. Esta metodología permitirá incorporar germoplasma de maíz nativo o mejorado a los pares heteróticos actuales o a cruces simples sobresalientes.

**Palabras clave:** *Zea mays*, razas de maíz, retrocruza limitada, selección recurrente, heterosis.

#### SUMMARY

México is center of origin of maize (*Zea mays* L.), and as a species it has broad genetic diversity. However, this diversity has been scarcely used by Mexican maize breeding public programs that develop commercial hybrids. It is partly so because current methodologies do not use improved heterotic patterns. This research presents a breeding protocol proposal for incorporation of outstanding native maize germplasm into improved maize heterotic patterns for commercial maize hybrid development, and shows effects of application of this protocol

on grain yield and grain size of test-crosses. The proposed protocol has three stages: 1) selection of candidate, improved heterotic patterns, 2) selection and incorporation of native germplasm into improved material, and 3) application of reciprocal recurrent selection method (RRS) with familiar selection modification. Evaluation of this methodology employed a subtropical single-cross from progenitors that incorporated 25 % of germplasm of races of Ancho and Tabloncillo maize. S<sub>1</sub> lines and testcrosses were evaluated in four locations. The proposed protocol effectively incorporated native germplasm into improved germplasm: testcrosses with similar grain yield to the original single cross were identified from both race groups. This protocol was also effective for increasing grain size. This protocol allows incorporation of native maize or improved germplasm to current heterotic patterns or outstanding single crosses.

**Index words:** *Zea mays*, races of maize, limited backcross, recurrent selection, heterosis.

#### INTRODUCCIÓN

En México, Wellhausen *et al.* (1951) describieron 25 razas de maíz (*Zea mays* L.), y actualmente se reconocen 59 (Ruiz *et al.*, 2013b). Existe consenso de que la diversidad genética y la heterosis que existe entre las razas de maíz es muy amplia (Bucio, 1959<sup>1</sup>; Paterniani y Lonquist, 1963; Crossa *et al.*, 1990). Sin embargo, el aprovechamiento de tal diversidad y heterosis ha sido complejo, pues cada raza está formada por un grupo de poblaciones (acciones) con características morfológicas similares; pero cuyas diferencias en manejo, grado de aislamiento, ambientes y criterios de selección originaron que cada población adquiriera características genéticas propias, a su vez causaron diferencias en sus parámetros genéticos (media, varianza, aptitud combinatoria), calidad del grano y forraje; así como en su respuesta a factores bióticos y abióticos.

<sup>1</sup>Bucio A. L. (1959) Algunas observaciones del comportamiento de las F1 de las cruces entre las razas de maíz descritas en México. Tesis Profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, Edo. de México. 32 p.

En ocasiones los maíces nativos presentan características agronómicas indeseables tales como: porte alto de planta y mazorca, susceptibilidad al acame, susceptibilidad a plagas y enfermedades de planta y mazorca o ciclo largo de madurez cuando se siembran fuera de su área de adaptación.

Con respecto a la utilización de maíces nativos en programas genotécnicos, los casos más exitosos se obtuvieron en EE.UU., en los proyectos Latin American Maize Project (LAMP) y Germplasm Enhancement of Maize (GEM) Project, donde se logró, además de introgresar nuevos alelos a las líneas elite que diversificó el germoplasma, se incrementó el rendimiento de grano y se mejoraron algunos atributos de calidad del grano y forraje (Pollak, 2003; Salhuana y Pollak, 2006).

En México, existe abundante información relacionada con la clasificación racial (Sánchez y Goodman, 1992; Sánchez *et al.*, 2000), historia, prehistoria y diversidad genética (Muñoz, 2005), evaluación de colectas (Salhuana y Pollak, 2006), recolección de maíces nativos en diversas entidades federativas y regiones geográficas (Aragón *et al.*, 2006; Ron *et al.*, 2006; Hortelano *et al.*, 2008; ; Aragón *et al.*, 2012). Recientemente se llevó a cabo una colecta nacional de maíces nativos y sus parientes silvestres financiada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2011). Asimismo, está documentada la calidad del grano de los maíces nativos como recurso genético para elaborar tortillas de buena calidad, con mayor contenido de proteína, aceite y de pigmentos con calidad nutraceutica; lo que genera valor agregado para la industria (Pollak, 2003; Vidal *et al.*, 2008; Vázquez *et al.*, 2011; Aragón *et al.*, 2012; Salinas *et al.*, 2012).

En cuanto al mejoramiento genético de variedades, Márquez (1990) propuso el método de retrocruza limitada; el cual aplicó para mejorar 50 razas de maíz (Márquez *et al.*, 1999). Barrera *et al.* (2005), al estudiar las cruza dialélicas de 10 razas mejoradas por retrocruza limitada, encontraron que la aptitud combinatoria se redujo y que los nuevos tipos de mazorca tuvieron más similitud con el donador que con el tipo racial debido que se hizo selección previa para porte bajo.

Romero *et al.* (2002) y Esquivel *et al.* (2011) demostraron que existe diversidad y heterosis en accesiones de la raza Chalqueño; y Navas y Cervantes (1992) y Carrera y Cervantes (2006) identificaron cruza interracial tropicales adaptadas a los Valles Altos con rendimiento similar al de los híbridos comerciales. Las referencias anteriores indican que existe suficiente información de los maíces nativos en México, pero se requiere una metodología de mejoramiento que permita incorporar germoplasma de maíces nativos

sobresalientes en los híbridos comerciales.

El cambio climático ha impuesto nuevos retos en el abasto de maíz en México, pues está documentado que las zonas productoras de maíz más importantes del país serán afectadas por sequía y altas temperaturas (Ruiz *et al.*, 2011a). Al respecto, se han identificado razas y variedades de maíz como posibles fuentes de germoplasma para generar maíces comerciales adaptadas a las nuevas condiciones climáticas (Ruiz *et al.*, 2011b, 2013a), lo que ratifica la necesidad de tener una metodología de mejoramiento que permita incorporar germoplasma de maíz nativo a progenitores mejorados.

Los objetivos del presente ensayo son: a) presentar una propuesta de metodología de mejoramiento genético que permita incorporar germoplasma de maíz nativo sobresaliente a pares heteróticos mejorados para formar híbridos comerciales de maíz, y b) mostrar resultados de la aplicación de la metodología propuesta en una cruza simple de maíz para obtener híbridos y aumentar el tamaño de grano de híbridos y progenitores.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La incorporación de genes de los maíces nativos en los programas públicos de mejoramiento genético de maíz en México cuyo objeto de producir híbridos comerciales tiene analogía con la introducción de germoplasma exótico, debido a que en ambos casos existen alelos de interés; pero también características agronómicas indeseables para los sistemas modernos de producción comercial de maíz, con excepción del germoplasma exótico previamente adaptado por selección (Pérez-Colmenares *et al.*, 2000).

En el caso de los maíces nativos, el porte alto de planta, la susceptibilidad al acame y las pudriciones de la mazorca, entre otras características indeseables; mientras que en el germoplasma exótico desadaptado lo son: el ciclo largo de madurez, la susceptibilidad a enfermedades foliares y las pudriciones de mazorca, principalmente (Oyervides-García *et al.*, 1985; Albrecht y Dudley, 1987). Estos problemas plantean que la incorporación de maíz nativo o exótico desadaptado en progenitores mejorados de híbridos deberá ser dosificado, o mejorar previamente los germoplasmas antes de ser incorporados.

La metodología aquí propuesta se basa en las tres etapas siguientes: 1) Selección del par heterótico al que se incorporará el germoplasma nativo; 2) Métodos de selección de poblaciones nativas para ser incorporadas a los pares heteróticos seleccionados; y 3) Aplicación del método de selección recurrente recíproca con una modificación de

selección familiar (Ramírez *et al.*, 2011<sup>2</sup>, 2013<sup>3</sup>). Cada etapa se describe a continuación:

### Etapa 1. Selección del par heterótico

Es primordial que el germoplasma empleado en un programa de mejoramiento genético de maíz esté organizado en pares heteróticos, pues permite sistematizar el trabajo, reducir costos de evaluación de progenies seleccionadas, generar nuevas combinaciones híbridas entre los diferentes pares heteróticos (Ramírez *et al.*, 2007), y seleccionar el germoplasma a introducir para diversificar la base genética. En los programas genotécnicos que se conducen en México existe poca experiencia en el manejo de pares heteróticos, pues, para producir híbridos comerciales, el método convencional es desarrollar líneas élite y probadores; y combinar las líneas dentro o entre regiones agroecológicas, aprovechándose más de la diversidad genética que de un par heterótico establecido (Gómez *et al.*, 2001; Ramírez *et al.*, 2013).

Este método convencional también se ha aplicado para combinar maíces nativos con mejorados (Carrera y Cervantes, 2006); y aunque se han detectado combinaciones interesantes, su implementación y comercialización han sido difíciles porque los progenitores nativos generalmente tienen porte alto de planta y presentan acame, características no favorables para los sistemas de producción modernos de maíz. Una situación similar se presenta cuando se identifican razas o variedades sobresalientes para una región determinada (Romero *et al.*, 2002; Hortelano *et al.*, 2008; Esquivel *et al.*, 2011), o con características especiales como tolerancia a deficiencias de humedad (Ruíz *et al.*, 2013a), donde la existencia de un par heterótico facilitaría la incorporación y dosificación del germoplasma nativo en progenitores derivados de cada componente del par heterótico.

Contrario a lo sucedido en México; en EE.UU., mediante el proyecto GEM, se incorporó con éxito germoplasma de

<sup>2</sup>Ramírez D. J. L., M. Chuela B., N. O. Gómez M., V. A. Vidal M., H. L. Vallejo D., A. Ledesma M. y J. Ron P. (2011) Formación de híbridos de maíz para la producción de elote incorporando germoplasma nativo. I. Descripción del método de mejoramiento. *In:* Preciado O. R. E. y F. Márquez S. IV Reunión Nacional de Mejoramiento, Conservación y Usos de Maíces Criollos. Memoria de Resúmenes. Sociedad Mexicana de Fitogenética CUCBA. Universidad de Guadalajara. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jal. México. p: 67.

<sup>3</sup>Ramírez D. J. L., A. Ledesma M., L. A. Nájera C., V. A. Vidal M., N. O. Gómez M., J. A. Ruiz C. y B. Coutiño E. (2013) Metodología para seleccionar accesiones de maíz como donadores para la formación de híbridos comerciales. *In:* Coutiño E. B., V. A. Vidal M., A. Santacruz V. y F. Guevara H. V Reunión Nacional de Mejoramiento, Conservación y Usos de Maíces Criollos. Memoria de Resúmenes. Septiembre 25-27. Sociedad Mexicana de Fitogenética. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. p: 75.

maíz nativo a pares heteróticos establecidos (Pollak, 2003; Salhuana y Pollak, 2006). Se concluye entonces que una alternativa para generar híbridos de maíz en los que se incorpore germoplasma nativo, requiere tener un par heterótico receptor, el cual puede estar formado por dos poblaciones en alguna etapa de mejoramiento, aunque a falta de éste puede seleccionarse una cruce simple sobresaliente.

La opción de usar un par heterótico con base en poblaciones tiene la ventaja de que se genera más variabilidad genética, pero la obtención de progenies prometedoras sería a mediano plazo. En cambio, en una cruce simple sobresaliente, se tiene menos variabilidad, pero ésta posee la ventaja de tener caracteres agronómicos sobresalientes, los cuales se fijan más rápidamente, y por ello se obtienen progenies con germoplasma nativo en menor tiempo. Al respecto, en el proyecto GEM se optó por usar cruces simples (Pollak, 2003; Salhuana y Pollak, 2006).

### Etapa 2. Métodos de selección de variedades e incorporación de germoplasma nativo a un par heterótico

La selección de variedades nativas para incorporarlas a un par heterótico es una decisión importante, pues una vez introducidas pasarán varios años para determinar si la elección fue correcta. La selección de las variedades nativas deberá hacerse en función del área objetivo del mejoramiento, los caracteres a incorporar, y la aptitud combinatoria de esas variedades con los componentes del par heterótico. Estas consideraciones permitirán acotar el número de variedades de maíz nativo a utilizar. La incorporación del germoplasma nativo a los componentes del par heterótico se propone efectuarla mediante el método de retrocruza limitada, que permite aprovechar la heterosis residual en el progenitor recurrente después de una retrocruza (Márquez, 1990).

Márquez *et al.* (1999) lo aplicaron para mejorar 50 razas mexicanas de maíz, donde la raza fue el progenitor recurrente y el germoplasma mejorado el donador, obteniéndose 75 % de la raza y 25 % del donador. Nótese que esos autores aplicaron su método al mejoramiento de variedades de polinización libre, y el método que aquí se propone es para generar híbridos; además, el donador es la variedad y dispone de un par heterótico de referencia. La dosis de germoplasma nativo a utilizar será de 25 % debido a que es la proporción adecuada cuando se incorpora germoplasma nativo o exótico sin mejoramiento en material mejorado (Albrecht y Dudley, 1987; Pollak, 2003; Salhuana y Pollak, 2006; Ramírez *et al.*, 2007). La selección de variedades nativas puede hacerse mediante el siguiente procedimiento de dos pasos:

## 1. Preselección de accesiones antes de su incorporación al par heterótico

A diferencia de los años en que se inició el estudio genético de razas de maíz (Bucio, 1959); a la fecha se disponen de trabajos de campo relacionados con la documentación y conservación *in situ* y *ex situ* de numerosas razas de maíz, las cuales pueden apoyar la selección de maíces nativos para su incorporación en los programas de hibridación. Tales son los casos de los resultados del proyecto LAMP del cual México fue colaborador (Salhuana y Pollak, 2006).

Los resultados de colectas evaluadas, el trabajo de los custodios y los Bancos de Germoplasma Comunitarios formados en la Red de Maíz en las distintas regiones de México financiada por el Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos (SINAREFI, 2010); el Banco de Germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), y la información sobre “fenotipeado” y “genotipeado” de variedades nativas de maíz que está generándose en el proyecto Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MASAGRO), específicamente en el componente “Descubriendo la Diversidad Genética de las Semillas” (MASAGRO, 2014). También existe información de la colecta de maíces nativos recientemente realizada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2011), cuyas accesiones están georeferenciadas, digitalizadas y resguardadas en el Centro Nacional de Recursos Genéticos del INIFAP; además, el libro de razas de maíz, donde está descrita la ecología y distribución actual y potencial de las razas de maíz (Ruiz *et al.*, 2013b); los trabajos de investigación publicados en revistas de investigación (Romero *et al.*, 2002; Barrera *et al.*, 2005; Carrera y Cervantes, 2006; Hortelano *et al.*, 2008; Esquivel *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011b y Ruiz *et al.*, 2013a), entre otros.

Así pues, con base en esta información, la preselección de variedades puede acotarse en función de la altitud, humedad y requerimiento térmico de la variedad en el área objetivo. Por otro lado, las características agronómicas a incorporar deben incluir el tamaño y color de grano, cobertura de mazorca, altura de planta, resistencia a enfermedades, estabilidad, y heterosis para rendimiento de grano. En cuanto al par heterótico, interesaría que las variedades, de preferencia fueran afines al tipo de germoplasma de los componentes de ese par.

Una vez preseleccionadas, las variedades deben evaluarse en el área de interés junto con el par heterótico y testigos comerciales. Con base en la evaluación, se pueden seleccionar de 8 a 10 variedades por su estabilidad y características agronómicas de interés. Conviene considerar que en varios programas genotécnicos de maíz en México se han evaluado colectas por varios años, y se tienen identificadas va-

riedades estables que son competitivas en rendimiento de grano con los híbridos comerciales en uso, pero que no han sido liberadas comercialmente ni integradas al proceso de hibridación porque presentan algunos problemas agronómicos. Sin embargo, este grupo de colectas podrían usarse como donadores al par heterótico y se ahorraría tiempo y recursos económicos en la etapa de preselección.

## 2. Selección de variedades para incorporarlas al par heterótico

De las variedades preseleccionadas, sólo se incorporarán las mejores dos al par heterótico, una por cada componente, las cuales se seleccionan con base en su aptitud combinatoria general y específica dentro y entre componentes del par. Esto permitirá, además de generar variabilidad, mantener, e incluso, incrementar la heterosis entre los componentes del par heterótico original. A continuación se describen dos casos que pueden presentarse en la selección de variedades:

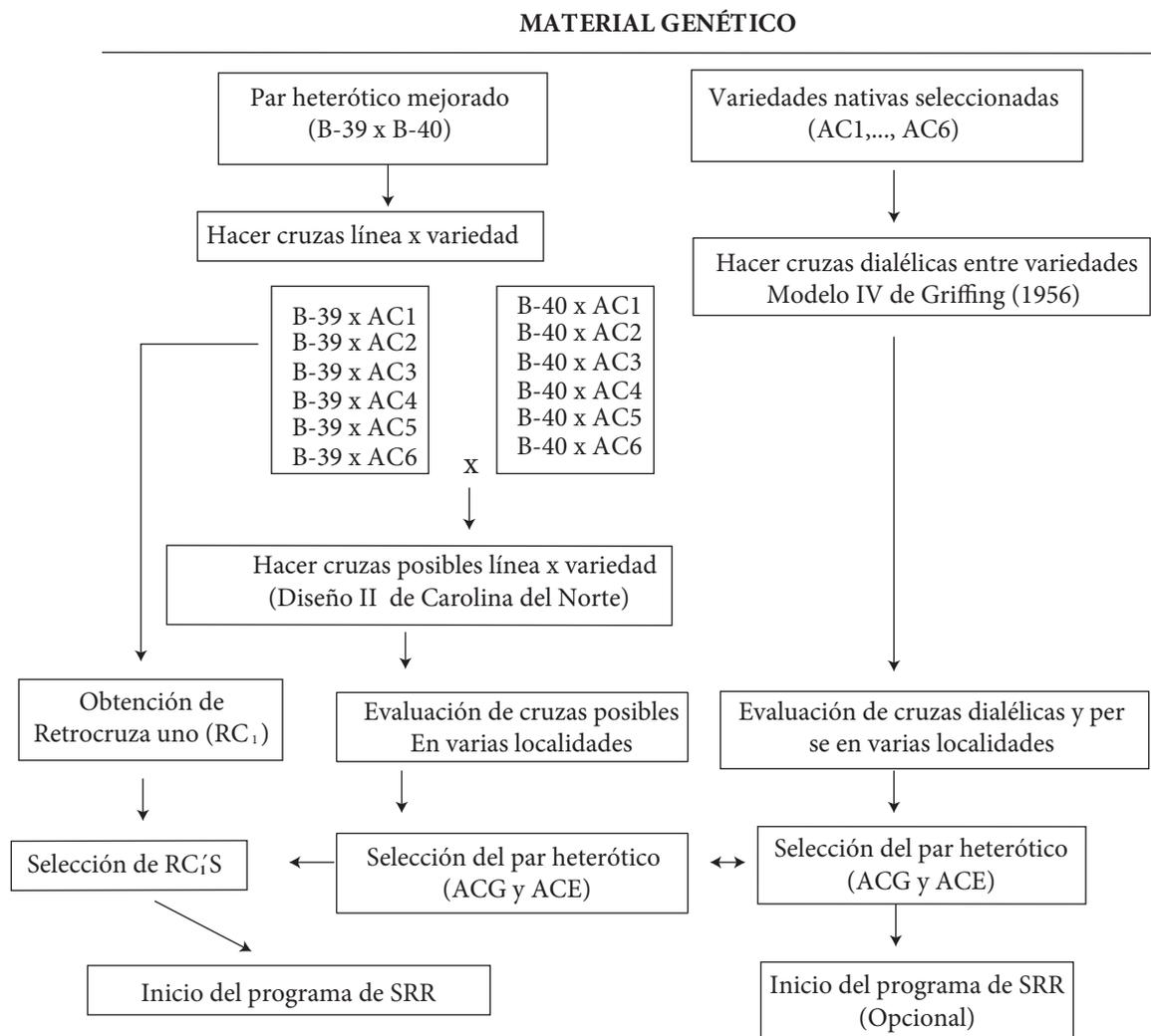
### Caso I. Incorporación de variedades nativas a un par heterótico mejorado sin considerar un par heterótico entre las razas

En este grupo se incluyen colectas sobresalientes que pertenecen a distintas razas que pueden o no tener relación con el tipo de germoplasma de un par heterótico. Para describir el método se supone un par heterótico constituido por la cruce simple B-39 x B40 y seis variedades sobresalientes AC1,..., AC6. La metodología se presenta en la Figura 1.

Con los resultados de la evaluación de las cruces posibles (B-39 x AC<sub>i</sub>) x (B-40 x AC<sub>i</sub>) se definen las variedades con mejor ACG en combinación con los progenitores B-39 y B-40, respectivamente, y se selecciona la mejor cruce (línea x variedad) con mejor ACE. Aquí podría iniciarse un programa de selección recíproca recurrente (SRR) con 50 % línea y 50 % de la variedad donadora, con la ventaja de tener más variabilidad y muestrear mayor número de alelos, pero con la desventaja de que se pueden acarrear características indeseables de la variedad; por lo que los futuros progenitores sobresalientes se obtendrían a más largo plazo.

Con los resultados de las cruces posibles de las variedades y la evaluación *per se*: a) se estima la ACG y ACE entre las variedades y la cruce Línea x Variedad seleccionada, lo que incrementa la probabilidad de éxito en el programa de SRR a iniciar; b) se conoce la progenie de las variedades seleccionadas y se complementa la selección del par heterótico con características *per se* de las variedades; y c) si se quiere, se puede iniciar un programa de SRR entre el par heterótico de variedades nativas sobresalientes.

Dado que la propuesta es iniciar el programa de SRR a



**Figura 1. Selección de variedades nativas sobresalientes para incorporarlas a un par heterótico mejorado sin considerar un par heterótico entre las razas. ACG = aptitud combinatoria general; ACE = aptitud combinatoria específica; SRR = selección recíproca recurrente.**

partir de la  $RC_1$  del par heterótico Línea x Variedad, la retrocruza podría hacerse durante la evaluación de las cruza, lo que permitirá ahorrar un ciclo agrícola, aun cuando el trabajo de polinización se incrementaría en poco más de 80 %. El tiempo estimado para la selección del par heterótico son seis ciclos agrícolas desde la preselección de las variedades hasta la obtención de la  $RC_1$ ; pero si las variedades nativas ya se tienen identificadas y se obtiene la  $RC_1$  simultáneamente a la evaluación de las cruza, el proceso se reduce a tres ciclos agrícolas.

#### **Caso II. Incorporación de variedades nativas a un par heterótico mejorado considerando que hay un par heterótico entre las razas.**

Esta metodología se propone para casos en que ya se

tienen identificadas variedades nativas sobresalientes de dos o más razas de maíz, las cuales presentan buena aptitud combinatoria y heterosis. Como ejemplo, Esquivel *et al.* (2011), en maíz Chalqueño, identificaron a las cruza: FHCH-129Fn x Oax-814, VS-22 x Pob-85-C4 y VS-22 x Tlax-151 con buena heterosis, y como poblaciones nativas sobresalientes a Col-03-64, Col-6784 y FHCH-129Fn; Gto-142, Zac-66, Tlax-151 y VS-22.

Por su parte, Carrera y Cervantes (2002) evaluaron cruza entre poblaciones tropicales y subtropicales adaptadas a los Valles Altos y encontraron que las cruza Jal-Bof x Van-Cel, Tux-Cel x Teh-Olo, y Van-Cel x Olo-Com tuvieron alta heterosis. A su vez, Barrera *et al.* (2005), en razas de maíz mejoradas por retrocruza limitada, encontraron que las cruza VA x TU, HO x JA, OL x HO y TP x OL sobresalieron por

su rendimiento y que la población de Tuxpeño tuvo la ACG más alta en rendimiento de mazorca. Como puede observarse estas cruzas y variedades que ya existen en los programas de mejoramiento, podrían ser incorporadas a un par heterótico mejorado.

La metodología propuesta es muy similar a la descrita para el Caso I y sólo presenta pequeñas variantes. En esta modalidad, ayuda mucho conocer el tipo de germoplasma de los componentes del par heterótico mejorado, para orientar mejor la obtención de cruzas línea x variedad. Por ejemplo: en la craza B-39 x B-40, la línea B-39 tiene germoplasma de Tuxpeño y B-40 tiene germoplasma subtropical y posiblemente templado (Ramírez *et al.*, 1995); por lo tanto, en este ejercicio las variedades nativas de Tuxpeño (TU<sub>i</sub>) se cruzarían con B-39 y las de Celaya (CE<sub>i</sub>) con B-40. Se suponen seis variedades por cada componente del par heterótico.

La metodología se presenta en la Figura 2. El número de ciclos agrícolas requeridos para la incorporación es similar al del Caso 1. Sin embargo, éste podría reducirse si se seleccionan pares heteróticos de maíces nativos ya identificados o poblaciones nativas que tengan divergencia genética y la característica que se desea incorporar.

**Etapa 3. Aplicación de selección recíproca recurrente modificada con selección familiar (SRRF)**

Una vez incorporado el germoplasma nativo al par heterótico mejorado, la selección de progenies e híbridos se hará mediante el método de selección recíproca recurrente debido a que con éste se aprovechan los efectos aditivos y no aditivos (Hallauer y Miranda, 1988). Las unidades de selección se obtienen a partir de la generación F<sub>1</sub> de la retrocruza 1 (RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub>). Una opción de selección sería tomar

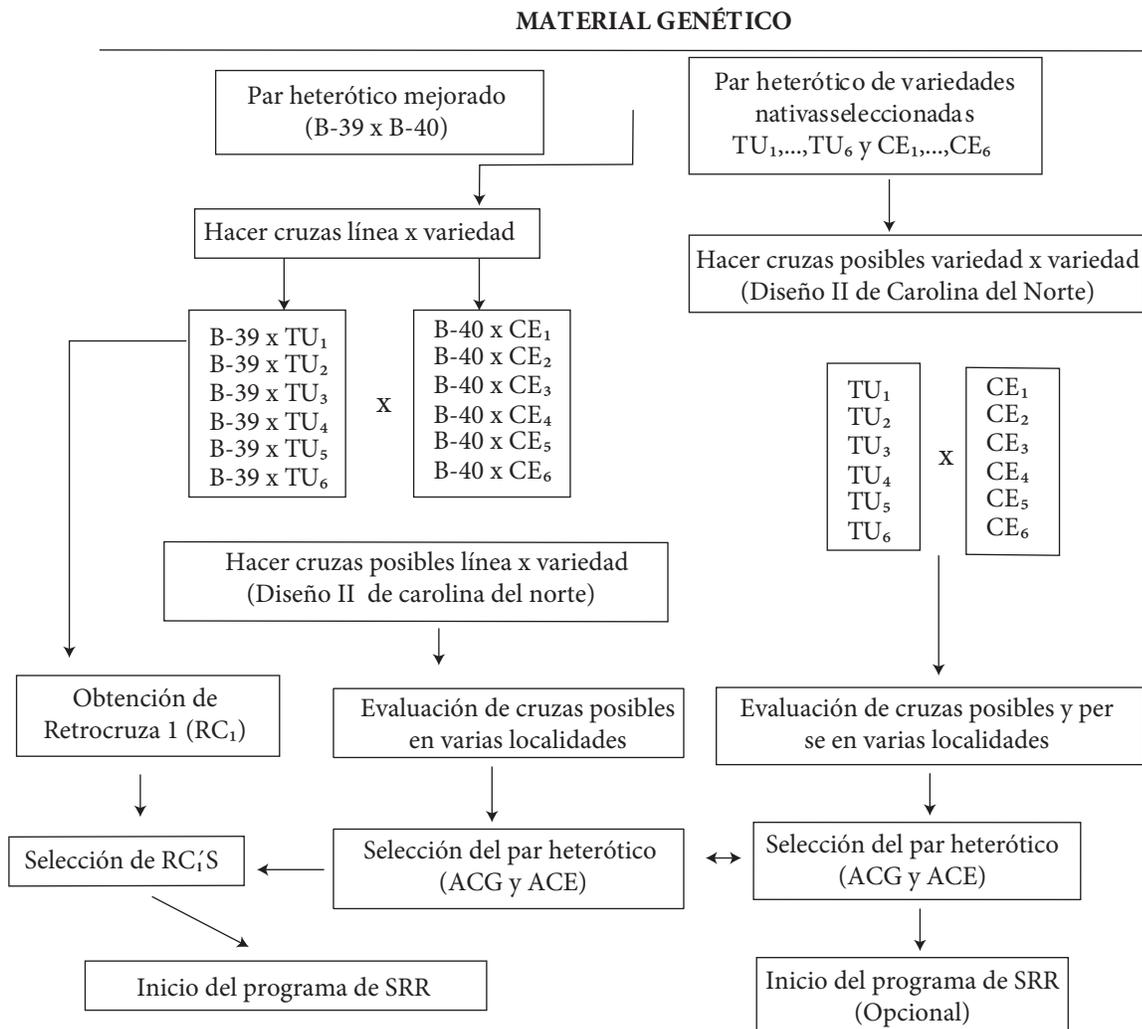


Figura 2. Selección de variedades nativas sobresalientes para incorporar a un par heterótico mejorado considerando un par heterótico entre las razas. ACG = aptitud combinatoria general; ACE = aptitud combinatoria específica; SRR = selección recíproca recurrente.

una muestra de plantas (20 a 30) de la  $RC_1 F_1$ , obtener la generación  $F_2$  de la retrocruza 1 ( $RC_1 F_2$ ), y a partir de ésta iniciar el proceso de selección (Márquez *et al.*, 1999).

Esta opción tiene la ventaja de que se reduce el trabajo de campo; pero el riesgo de tomar muestras muy pequeñas es perder la o las características de interés que se incorporaron del material nativo al mejorado. Para reducir el riesgo, en la obtención de la  $RC_1 F_1$ , se propone cruzar de 100 a 150 plantas; seleccionar mazorcas individuales como familias de medios hermanos; sembrar un surco por familia con 20 plantas cada uno e iniciar la derivación de líneas  $S_1$ ; con las siguientes ventajas: a) Se incrementa el tamaño de muestra; b) Al emplear la familia como unidad de selección se tiene mejor control del carácter que se incorporó del maíz nativo al mejorado, y c) La selección de líneas  $S_1$  es más efectiva porque se hace selección entre y dentro de familias de la  $RC_1 F_1$ .

De acuerdo con Arbelbide y Bernardo (2004), la derivación de líneas  $S_1$  en  $RC_1 F_1$  se apoya en que la media de las cruza de prueba obtenidas en líneas derivadas de la  $RC_1 F_1$  y  $RC_1 F_2$  no fue significativa; sólo se incrementó la varianza en  $RC_1 F_2$ . Por su parte, Lamkey *et al.* (1995) señalan como desventaja del apareamiento aleatorio en una retrocruza, antes de seleccionar y autofecundar, que la recombinación puede romper bloques de genes favorables ligados y decrecerá la probabilidad de retenerlos cuando se derive la progenie. Por otra parte, como en la  $RC_1 F_2$  se incrementa la varianza, en cada componente del par heterótico se obtendrá la  $RC_1 F_2$  antes de formar los mestizos para aumentar su eficiencia como probador. La metodología de la SRR modificada con selección familiar se presenta en la Figura 3.

Es importante señalar que la metodología descrita es general y puede aplicarse para incorporar germoplasma exótico o adaptado mejorado a pares heteróticos definidos para aumentar la diversidad genética o para corregir deficiencias agronómicas en los componentes del par heterótico.

Para evaluar la metodología propuesta, en el ciclo agrícola OI 2005-2006, se incorporó germoplasma nativo de las razas Ancho y Tabloncillo a la cruza simple sobresaliente LPC-2R x B-40, con el objeto de obtener híbridos con calidad elotera e incrementar el tamaño de grano de los progenitores, respecto a la cruza original. El progenitor LPC-2R es una línea  $S_4$  derivada de la población tropical Pool-19 (CIMMYT, 1998) y mejorada para pudriciones de mazorca con el progenitor B-47. El progenitor B-40 es una línea  $S_4$  derivada del híbrido B-840 y es progenitor del híbrido H-358 (Ramírez *et al.*, 1995). Las variedades nativas utilizadas como donadores fueron: el Criollo Ancho de Guerrero, representativo de la raza de maíz Ancho, colectada en Teloloapan, Gro. (1680 m de altitud) y el Criollo Ancho

de Ameca representativo de la raza de maíz Tabloncillo colectada en Ameca, Jal. (1220 m de altitud).

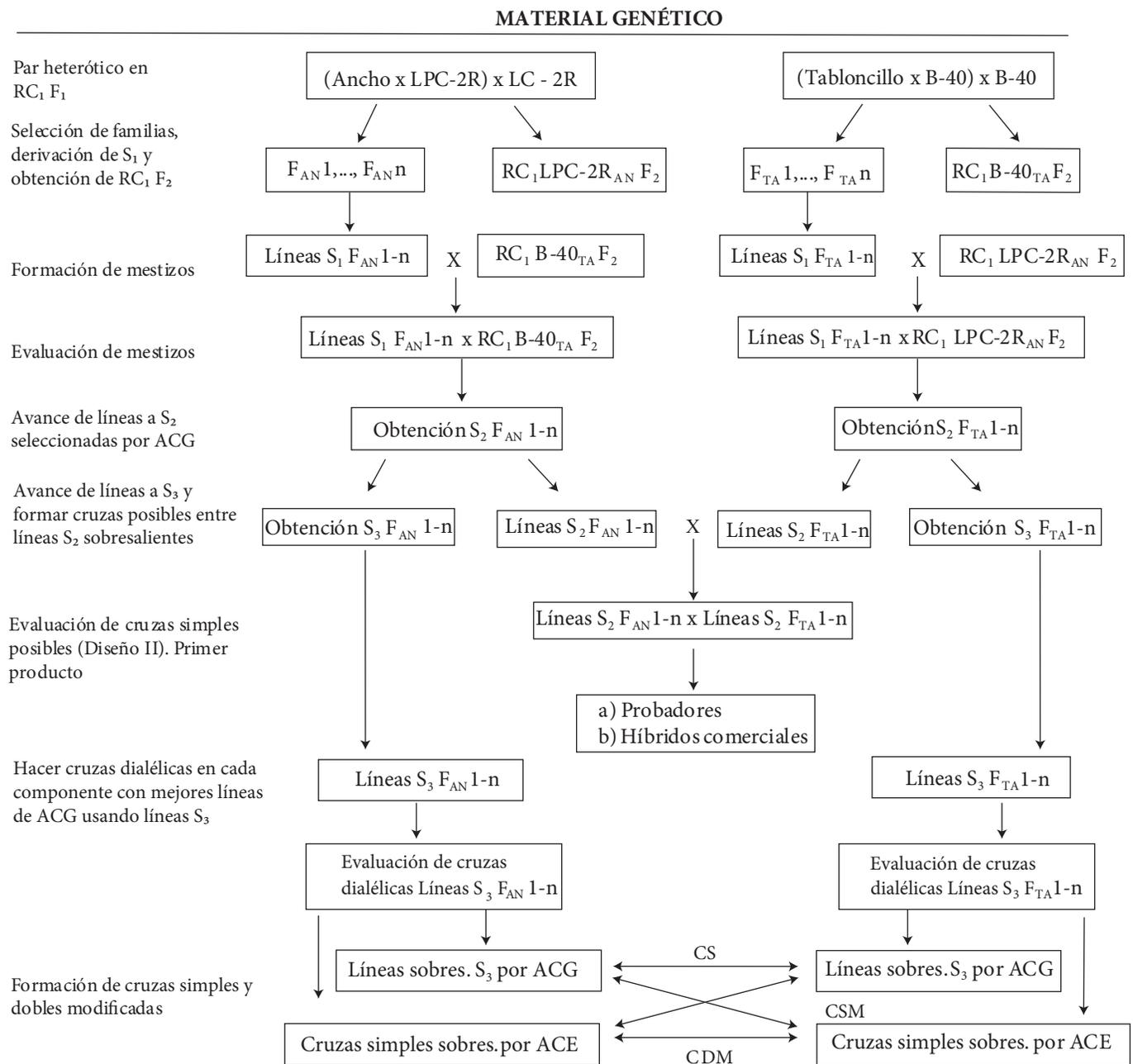
Se supone que entre las variedades nativas seleccionadas existe divergencia genética, debido a la diferencia racial, distancia entre los sitios de colecta, diferencias en tipo de suelo y de manejo del cultivo en el Estado de Guerrero y en la región Centro de Jalisco. El criollo Ancho de Guerrero fue el donador en la línea LPC-2R y el Ancho de Ameca de B-40. Los maíces nativos se incorporaron a la cruza LPC-2R x B-40 mediante el método de retrocruza limitada (Márquez, 1990) y en la selección de líneas recobradas se aplicó el método de selección recíproca recurrente con la modificación familiar (Figura 3).

En el ciclo agrícola OI 2006-2007, en el Campo Experimental de Santiago Ixcuintla, Nayarit, se hicieron las cruza LPC-2R x Criollo Ancho de Guerrero y B-40 x Criollo Ancho de Ameca. En el ciclo agrícola PV 2007, en Tlajomulco, Jal., se obtuvo la retrocruza uno ( $RC_1$ ); en la cruza B-2R x Criollo Ancho de Guerrero se utilizó la línea LPC-2R como progenitor recurrente, y en la cruza B-40 x Criollo Ancho de Ameca a la línea B-40, lo que dio origen a las poblaciones LPC-2R  $RC_1 F_1$  y B-40  $RC_1 F_1$ , respectivamente.

A la cosecha, se eliminaron plantas acamadas y mazorcas podridas o dañadas en cada retrocruza. El número total de mazorcas cosechadas en LPC-2R  $RC_1 F_1$  y B-40  $RC_1 F_1$  fueron 44 y 46, respectivamente; las cuales se desgranaron individualmente para obtener familias de medios hermanos, pues cada mazorca tiene el mismo padre en común. Además, en cada retrocruza, se formó un compuesto balanceado con el mismo número de granos de cada mazorca.

En el ciclo agrícola PV 2009, en Tlajomulco, Jal., se sembraron las familias de las poblaciones LPC-2R  $RC_1 F_1$  y B-40  $RC_1 F_1$ ; se sembró un surco con 20 plantas por familia y se derivaron líneas  $S_1$  dentro de cada familia. A la cosecha, se eliminaron familias enfermas o acamadas y se seleccionaron mazorcas individuales dentro de cada familia seleccionada. El arreglo en familias permitió: muestrear todos los individuos que participaron en la retrocruza, eliminar familias con características agronómicas indeseables, tener mejor control de las características tamaño de grano y longitud de mazorca, incrementar la eficiencia en la selección debido a que se hace entre y dentro de familias y ampliar el tamaño de muestra.

En este caso, por ejemplo, de 600 plantas que se siembran comúnmente de un compuesto balanceado para derivar líneas  $S_1$ , a 900 plantas, promedio, usadas aquí por población. A la cosecha se seleccionaron 86 líneas  $S_1$  en cada población. Con la semilla del compuesto balanceado de cada población, LPC-2R  $RC_1 F_1$  y B-40  $RC_1 F_1$ , se sembraron 20 surcos



**Figura 3. Desarrollo de híbridos mediante selección recíproca recurrente con familias como unidad de selección. CS = cruza simple; CSM = cruza simple modificada; CDM = cruza doble modificada; F<sub>AN</sub> y F<sub>TA</sub> = Familias con 25 % de germoplasma de las razas Ancho y Tabloncillo, respectivamente.**

con 20 plantas cada uno; en la etapa de floración se hicieron cruza fraternal y se obtuvo la generación F<sub>2</sub>.

En el ciclo agrícola OI 2009-2010, en el Campo Experimental Iguala, Gro., se sembraron las líneas S<sub>1</sub> seleccionadas de cada población en un lote aislado para formar mestizos (línea x probador). Se sembraron 20 plantas por línea en proporción de dos surcos de líneas por uno del probador. El probador utilizado en las líneas derivadas en la población

LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> fue B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>, y en las de B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> fue LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> (Figura 3). En la etapa de floración, se desespigaron las plantas de los surcos hembra antes que las espigas liberaran el polen. A la cosecha, en cada cruz, se eliminaron mazorcas podridas o dañadas y las seleccionadas se desgranaron en masa.

En el ciclo agrícola PV 2010, se evaluaron los dos grupos de mestizos; cada grupo en un experimento. El primer

experimento incluyó 84 mestizos de la población LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> y B-40, la cruza simple original (LPC-2R x B-40), los donadores (Criollo Ancho de Guerrero y Criollo Ancho de Ameca), las poblaciones originales (LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> y B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>), cruza de las poblaciones LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> x B-40, B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> x LPC-2R, B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> x LPC-2 (original) y testigos comerciales (100 genotipos en total). El segundo experimento incluyó 83 mestizos de la población B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> y el resto de genotipos fue común al primer grupo.

Ambos experimentos se establecieron en las localidades de Tlajomulco, Jal., Santa María del Oro, Nay., Tepatlán, Jal. y Tarímbaro, Mich.; ubicadas a 1560, 1160, 1900 y 1880 m de altitud, respectivamente. Las tres primeras localidades se sembraron en condiciones de secano (temporal) y la última en punta de riego. Se utilizó el diseño experimental látice simple 10 x 10 y tamaño de parcela de un surco de 4.0 m espaciado a 0.80 m con 24 plantas cada uno, equivalente a 75,000 plantas ha<sup>-1</sup>.

Se registraron datos de rendimiento de grano/ha en materia seca (0 % de humedad); número de días a floración femenina, estimada como el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela presentaran inflorescencias femeninas con estigmas expuestos; altura de planta, medida desde el ras del suelo hasta la punta de la espiga; altura de mazorca, medida desde el ras del suelo hasta el nudo donde se inserta la mazorca principal; acame de raíz (AR), número de plantas con cuello de ganso o desviadas de la vertical en un ángulo mayor que 30° y acame de tallo (AT), número de plantas dobladas o quebradas abajo del nudo de inserción de la mazorca principal. El porcentaje de AR y AT se calculó con las ecuaciones:  $\% AR = (AR/PC) \times 100$  y  $\% AT = (AT/PC) \times 100$ , donde PC = número de plantas cosechadas.

El tamaño del grano se evaluó sólo en Tlajomulco, Jal., y para ello, de cada unidad experimental, se tomó una muestra de grano de 250 g, la cual se clasificó en el laboratorio con cribas metálicas en los tamaños: a) Plano extra grande, b) Plano grande, c) Plano medio, y d) Resto (plano chico y bolas). La semilla clasificada por tamaño se pesó en báscula digital con aproximación de centésimas de gramo.

Se hicieron análisis de varianza conjunto de todas las variables; para la comparación de medias entre las variedades se aplicó la prueba de la diferencia mínima significativa al 0.05 de probabilidad. Los análisis estadísticos se hicieron con el paquete SAS® (SAS Institute Inc, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los análisis estadísticos combinados de los mestizos formados con líneas S<sub>1</sub> derivadas de la población LPC-2R

RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> (25 % Ancho) y el probador B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> (25 % Tabloncillo), hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en todas las variables y factores de variación, excepto en altura de planta y mazorca en la interacción variedad x ambiente.

Los mestizos presentaron mucha variabilidad en rendimiento de grano, pues éste osciló de 2501 a 7194 kg ha<sup>-1</sup>. Los siete mestizos más sobresalientes rindieron 6 y 10 % más que la cruza simple original (6542 kg ha<sup>-1</sup>), pero las diferencias no fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ). Asimismo, estos mestizos rindieron entre 9.5 y 12.8 % más que la cruza donde participó la línea original (B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>) x LPC-2R (6376 kg ha<sup>-1</sup>); aunque estas diferencias no fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el análisis conjunto (Cuadro 1), en los análisis individuales de las localidades de Santa María del Oro y Tarímbaro hubo mestizos cuyas diferencias en rendimiento fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ) con respecto a la cruza (B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>) x LPC-2R. Tres de los mestizos sobresalientes tuvieron acame de raíz y tallo similar a la cruza original y fueron de 2 a 3 d más precoces (Cuadro 1).

En los análisis estadísticos combinados de los mestizos formados con líneas S<sub>1</sub> derivadas de la población B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> (25 % Tabloncillo) y el probador LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> (25 % Ancho), hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en todas las variables y factores de variación, excepto en altura de mazorca y el porcentaje de acame de raíz en la interacción variedad x ambiente.

El rendimiento de grano de los mestizos osciló de 4625 a 7296 kg ha<sup>-1</sup> y los siete mestizos más sobresalientes rindieron entre -1 y 5 % más que la cruza original LPC-2R x B-40 (6944 kg ha<sup>-1</sup>), diferencias que no fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ). Asimismo, estos mestizos, rindieron de 2.3 a 7.4 % más que la cruza donde participó la línea original B-40. A pesar de que las diferencias anteriores no fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el análisis conjunto (Cuadro 2), en los análisis individuales de las localidades, sólo en Tarímbaro y Tlajomulco, hubo mestizos cuyas diferencias en rendimiento fueron significativas ( $P \leq 0.05$ ) respecto a la cruza (LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub>) x B-40. Los mestizos sobresalientes tuvieron precocidad similar a la cruza original, pero con mayores porcentajes de acame de raíz y tallo (Cuadro 2).

El rendimiento de grano de los siete mestizos sobresalientes, en ambos grupos, fue estadísticamente igual que el del híbrido comercial H-318 (Cuadros 1 y 2), el cual es uno de los híbridos del INIFAP más vendidos para la zona subtropical de México, lo que demuestra que los mestizos tienen rendimiento de grano competitivo. Estos resultados coinciden con los de Carrera y Cervantes (2002 y 2006) quienes señalaron las ventajas logradas en rendimiento de grano, para los Valles Altos, con cruza entre poblaciones tropicales-subtropicales con una línea

**Cuadro 1. Análisis combinado de mestizos formados con líneas  $S_1$  derivadas de la población LPC-2R  $RC_1 F_1$  con la población B-40  $RC_1 F_2$  como probador. Promedio de cuatro localidades en el año 2010.**

Genealogía	Rendimiento	Testigo	Flor. Fem.	Altura (cm)		Acame (%)	
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(%)	(d)	Planta	Mazorca	Raíz	Tallo
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F1-1	7194	110	69	268	130	1	14
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F25-1	7040	108	70	279	135	0	3
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F18-3	7019	107	69	260	128	0	11
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F33-1	6950	106	69	264	127	3	9
LPC-2R $RC_1 F_1$ ()-F44-4	6947	106	69	247	105	0	1
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F1-2	6921	106	69	256	117	1	3
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F31-3	6917	106	69	272	134	1	14
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F27-27	4372	67	72	250	119	1	20
(LPC-2R $RC_1 F_1$ )-F12-2	2501	38	70	237	121	5	20
Media general de mestizos	6271	96	70	265	132	2	10
[LPC-2R x B-40 (Cruza original)]	6542	100	71	275	134	1	2
(B-40 $RC_1 F_2$ ) x LPC-2R	6376	97	70	264	131	7	5
(LPC-2R $RC_1 F_2$ ) x B-40	6181	94	71	277	133	3	5
Criollo Ancho de Ameca	5346	82	70	280	144	8	10
LPC-2R $RC_1 F_2$	4970	76	70	237	117	4	16
Criollo Ancho de Guerrero	4246	65	68	272	143	4	13
B-40 $RC_1 F_2$	2864	44	72	249	122	3	10
H-318	7092		71	248	117	1	6
CV (%)	15		2	6	9	230	79
DMS (0.05)	898		2	16	11	5	7

CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa.

local. También concuerdan con los de Pollak (2003) y Salhuana y Pollak (2006), quienes obtuvieron resultados sobresalientes en rendimiento de grano y características de calidad de grano al combinar poblaciones nativas de maíz con líneas élite probadoras.

La ausencia de significancia entre la media del rendimiento de grano de la craza original y la de los mestizos sobresalientes, en ambos grupos, indica que en la incorporación de germoplasma nativo se mantuvo el rendimiento de grano y se espera que en las cruza simples formadas entre líneas recobradas más endogámicas (Figura 3) se exprese más la heterosis y superen a la craza original.

La selección de los donadores Criollo Ancho de Guerrero y Criollo Ancho de Ameca por divergencia genética se considera apropiada, pues la heterosis para rendimiento de grano del mestizo donde participa la línea (LPC-2R  $RC_1 F_1$ )-F1-1 respecto al probador B-40  $RC_1 F_2$  fue 151 %; mientras que la de la línea (B-40  $RC_1 F_1$ )-F13-2 respecto al probador LPC-2R  $RC_1 F_2$  fue de 60 % (Cuadros 1 y 2). A pesar de este resultado positivo, se consideró importante diseñar

los esquemas de selección de poblaciones nativas de maíz (Figuras 1 y 2) para garantizar la heterosis entre las variedades nativas y mejoradas, seleccionar maíces nativos con mejores características agronómicas (especialmente tolerancia al acame de raíz y tallo) y obtener poblaciones en  $RC_1$  con el mayor rendimiento posible para producir líneas con alto rendimiento; en este estudio, la población B-40  $RC_1 F_1$  tuvo el rendimiento más bajo.

Las líneas y poblaciones con 25 % de las variedades Criollo Ancho de Guerrero y Criollo Ancho de Ameca evaluadas en mestizos, incrementaron el tamaño de grano respecto a la craza simple original, LPC-2R x B-40 (CO). Hubo mestizos que superaron el tamaño de grano de la CO en los tipos de grano plano extra grande (PEXGDE), plano grande (PGDE) y plano medio (PMED); lo que se corroboró en la gráfica de RESTO, que incluye los tamaños bola grande, bola chica y plano chico, donde la CO se ubicó en las clases de 150 a 160 g y 180 a 190 g, respectivamente; mientras que en ambos grupos de mestizos, la frecuencia más alta se obtuvo en la clase de 91 a 100 g (Figura 4).

**Cuadro 2. Análisis combinado de mestizos formados con líneas S<sub>1</sub> derivadas de la población B-40 RC<sub>1</sub> F<sub>1</sub> con la población LPC-2R RC<sub>1</sub> F<sub>2</sub> como probador. Promedio de cuatro localidades en el año 2010.**

Genealogía	Rendimiento	Testigo	Flor. Fem.	Altura (cm)		Acame (%)	
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(%)	(d)	Planta	Mazorca	Raíz	Tallo
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F13-2	7296	105	69	278	143	2	12
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F6-3	7008	101	70	269	129	2	8
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F38-1	6968	100	69	265	129	1	10
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F9-1	6966	100	71	264	128	14	5
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F17-2	6960	100	69	277	141	1	20
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F9-3	6900	99	72	273	134	2	9
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F15-4	6900	99	69	270	133	7	12
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F44-3	4678	67	71	261	125	4	10
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>1</sub> )-F45-2	4625	67	70	224	101	2	7
Media general de mestizos	6250		70	265	129	3	9
(B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>2</sub> ) x LPC-2R	7206	104	71	253	125	2	7
[LPC-2 R] x B-40 (Cruza original)	6944	100	71	265	127	1	4
(LPC-2R RC <sub>1</sub> F <sub>2</sub> ) x B-40	6744	97	70	256	126	2	8
Criollo Ancho de Guerrero	5499	79	67	259	125	14	11
Criollo Ancho de Ameca	5304	76	71	271	134	7	10
LPC-2R RC <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	4573	66	72	228	109	3	10
B-40 RC <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	3418	49	73	251	121	3	7
H-318	6966		71	251	111	3	4
CV (%)	16		2	5	10	201	78
DMS (0.05)	1006		2	13	12	7	7

CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa.

Aumentar el número de granos planos en los híbridos es conveniente, ya que son los tipos que tienen mejor mercado en la industria semillera. Asimismo, los consumidores de elote tienen preferencia por los elotes largos y de grano ancho. Los mestizos formados con las líneas B-40 (25 % de la raza Tabloncillo) tuvieron frecuencias más altas para generar los tipos de grano PEXGDE y PGDE que los formados con las líneas LPC-2R (25 % de la raza Ancho); pero, estos últimos tuvieron mayor frecuencia en el tipo de grano PMED y menor frecuencia en el RESTO (Figura 4).

### CONCLUSIONES

La metodología propuesta fue efectiva para incorporar germoplasma nativo al mejorado; debido a que, en los dos grupos, se identificaron mestizos con rendimiento de grano similar a la craza simple original. También fue efectiva para aumentar los tamaños de grano plano extra grande, grande

y medio, respectivamente. La aplicación de esta metodología permitirá incorporar germoplasma de maíz nativo o mejorado a los pares heteróticos actuales o cruza simple sobresalientes, y de esta manera aprovechar la diversidad genética de maíz que existe en México.

### BIBLIOGRAFÍA

- Albrecht B. and J. W. Dudley (1987)** Evaluation of four maize populations containing different proportions of exotic germplasm. *Crop Science* 27:480-486.
- Arbelbide M. and R. Bernardo (2004)** Random mating before selfing in maize BC1 populations. *Crop Science* 44:401-404.
- Aragón C. E., S. Taba, J. M. Hernández C., J. Figueroa C., V. Serrano A. y F. H. Castro G. (2006)** Catálogo de Maíces Criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico Núm. 6. Oaxaca, Oaxaca, México. 344 p.
- Aragón C. E., J. Figueroa C., M. Flores Z., M. Gaytán M. y J. J. Véles M. (2012)** Calidad Industrial de Maíces Nativos de la Sierra Sur de Oaxaca. Libro Técnico No. 15. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Santo Domingo

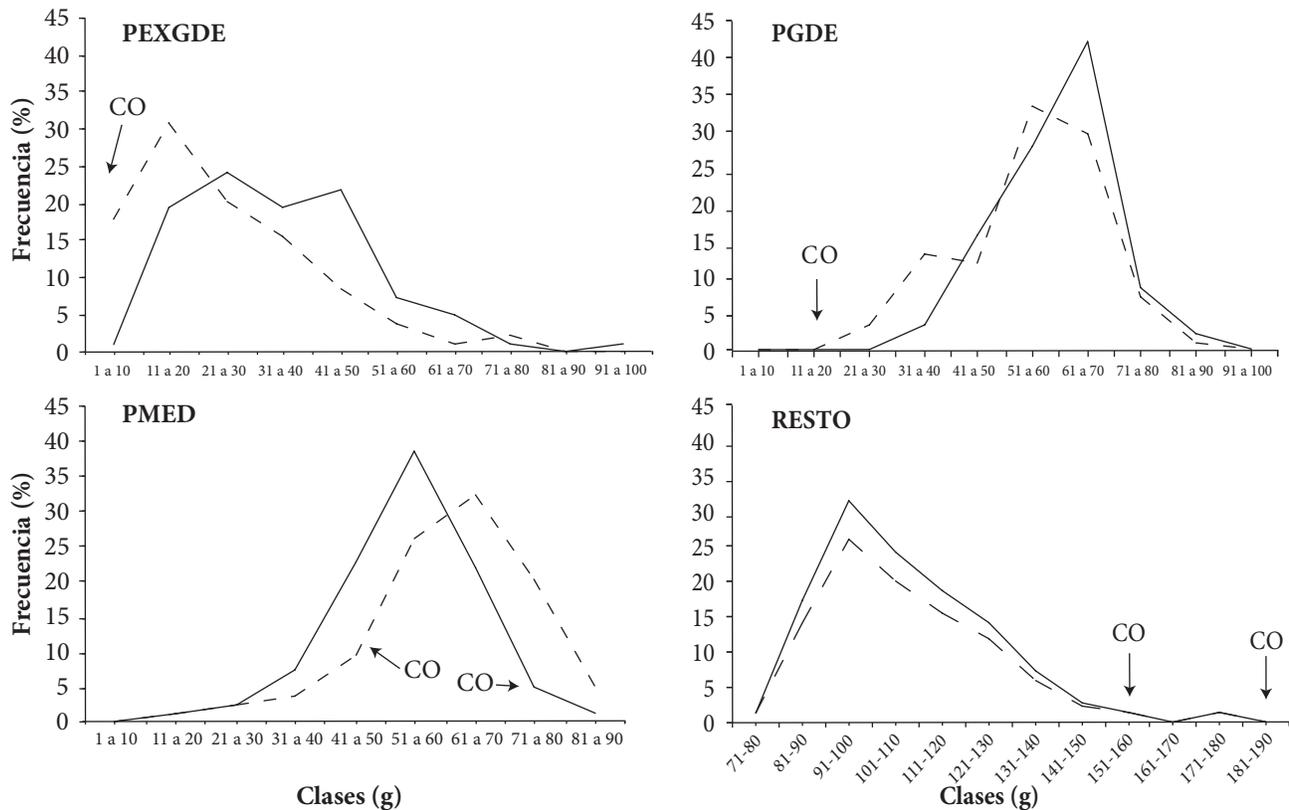


Figura 4. Tipos de grano plano extragrande (PEXGDE), grande (PGDE), medio (PMED), y bola grande, chica y plano chico (RESTO), en dos grupos de mestizos formados con poblaciones con 25 % de la raza Ancho (línea punteada) y 25 % de la raza Tabloncillo (línea sólida), CO = cruza original.

- Barrio Bajo, Etla, Oaxaca, México. 249 p.
- Barrera G. E., A. Muñoz O., F. Márquez S. y A. Martínez G. (2005) Aptitud combinatoria en razas de maíz mejoradas por retrocruza limitada. I. Caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnica Mexicana* 28:231-242.
- Carrera V. J. A. y T. Cervantes S. (2002) Comportamiento *per se* y en cruza de poblaciones tropicales de maíz seleccionadas en valles altos. *Agrociencia* 36:693-701.
- Carrera V. J. A. y T. Cervantes S. (2006) Respuesta a densidad de población de cruza de maíz tropical y subtropical. *Revista Fitotecnica Mexicana* 29:331-338.
- CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (1998) A Complete Listing of Improved Maize Germplasm from CIMMYT. Maize Program Special Report. Mexico, D.F. pp: 12.
- Crossa J., S. Taba and E. J. Wellhausen (1990) Heterotic patterns among Mexican races of maize. *Crop Science* 30:1182-1190.
- Esquivel E. G., F. Castillo G., J. M. Hernández C., A. Santacruz V., G. García de los S., J. A. Acosta G. y A. Ramírez H. (2011) Heterosis en maíz del altiplano de México con diferente grado de divergencia genética. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:314-344.
- Gómez M. N. O., J. L. Ramírez D. y A. Turrent F. (2001) H-516, Maíz de Alto Rendimiento para Regiones Cálidas y Semicálidas de México. Folleto Técnico No. 8. Campo Experimental Iguala. CIRPAS-INIFAP-SAGARPA. 20 p.
- Griffing B. (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences* 9:463-493.
- Hallauer A. R and J. B. Miranda F. (1988) Quantitative Genetic in Maize Breeding. Iowa University Press. Ames Iowa. pp:236-237.
- Hortelano S. R. R., A. Gil M., A. Santacruz V., S. Miranda C. y L. Córdova T. (2008) Diversidad morfológica de maíces nativos del valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México* 34:89-200.
- Lamkey K. R., B. J. Schnicker and A. E. Melchinger (1995) Epistasis in an elite maize hybrid and choice of generation for inbred line development. *Crop Science* 35:1272-1281.
- Márquez S. F. (1990) Backcross theory for maize. I. Homozygosis and heterosis. *Maydica* 35:17-22.
- Márquez S. F., J. A. Carrera V., E. Barrera G. y L. Sahagún C. (1999) Influencia del ambiente de selección en el mejoramiento de razas de maíz por retrocruza limitada. *Revista Fitotecnica Mexicana* 22:1-15.
- Muñoz O. A. (2005). Centli-Maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Origen Genético y Geográfico, Glosario Centli-Maíz. Colegio de Postgraduados. 210 p.
- MASAGRO, Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (2014) Descubriendo la Diversidad Genética de las semillas. <http://masagro.mx/index.php/es/componentes/descubriendola-diversidad-genetica-de-la-semilla>. (Mayo 2014).
- Navas A. A. y T. Cervantes S. (1992) Selección en cruza interracial tropicales de maíz de México para adaptación a valles altos. *Agronomía Mesoamericana* 3:23-33.
- Oyervides-García M., A. R. Hallauer and H. Cortez M. (1985) Evaluation of improved maize populations in Mexico and the U.S. Corn Belt. *Crop Science* 25:115-120.
- Paterniani E. and H. Lonnquist (1963) Heterosis in interracial crosses of corn (*Zea mays* L.). *Crop Science* 3:504-507.
- Pérez-Colmenares A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2000) Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34:533-542.

- Pollak L. M. (2003) The history and success of the public-private project on Germplasm Enhancement of Maize (GEM). *Advances in Agronomy* 78:45-87.
- Ramírez D. J. L., J. Ron P., J. B. Maya L. y O. Cota A. (1995) 'H-357' y 'H-358': Híbridos de Maíz de Cruza Simple para la Zona Subtropical y Tropical de México. Folleto Técnico No. 4. Campo Experimental Centro de Jalisco, CIPAC, INIFAP. Tlajomulco, Jalisco, México. 20 p.
- Ramírez D. J. L., M. Chuela B., V. A. Vidal M., J. Ron P. y F. Caballero H. (2007) Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:453-461.
- Ramírez D. J. L., V. A. Vidal M., A. Ledesma M., M. Chuela B., A. Peña R., J. A. Ruiz C. y J. Ron P. (2013) Propuesta para integrar un patrón heterótico de maíz de grano amarillo para la zona de transición de México. I. Método y formación de poblaciones. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:189-199.
- Romero P. J., F. Castillo G. y R. Ortega P. (2002) Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño II. Grupos genéticos, divergencia genética y heterosis. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:107-115.
- Ron P. J., J. J. Sánchez G., A. A. Jiménez C., J. A. Carrera V., J. G. Martín L., M. M. Morales R., L. de la Cruz L., S. A. Hurtado de la P., S. Mena M. y J. G. Rodríguez F. (2006) Maíces Nativos del Occidente de México. *Scientia* 8:1-139.
- Ruiz C. J. A., G. Medina G., J. L. Ramírez D., H. E. Flores L., G. Ramírez O., J. D. Manríquez O., P. Zarazúa V., D. R. González E., G. Díaz P. y C. de la Mora O. (2011a) Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 2:309-323.
- Ruiz C. J. A., J. L. Ramírez D., J. M. Hernández C., F. Aragón C., J. J. Sánchez G., A. Ortega C., G. Medina G. y G. Ramírez O. (2011b) Razas mexicanas de maíz como fuente de germoplasma para la adaptación al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 2:351-363.
- Ruiz C. J. A., J. J. Sánchez G., J. M. Hernández C., M. C. Willcox, G. Ramírez O., J. L. Ramírez D. y D. R. González E. (2013a) Identificación de razas mexicanas de maíz adaptadas a condiciones deficientes de humedad mediante datos biogeográficos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4:829-842.
- Ruiz C. J. A., J. M. Hernández C., J. J. Sánchez G., A. Ortega C., G. Ramírez O., M. J. Guerrero H., F. Aragón C., V. A. Vidal M. y L. De la Cruz L. (2013b) Ecología, Adaptación y Distribución Actual y Potencial de las Razas Mexicanas de Maíz. Libro Técnico Núm. 5. INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. 159 p.
- Salhuana W. and Pollak L. (2006) Latin American Maize Project (LAMP) and Germplasm Enhancement of Maize (GEM) Project: Generating useful breeding germplasm. *Maydica* 51:339-355.
- Salinas M. Y., J. J. Pérez A., G. Vázquez C., F. Aragón C. y G. A. Velázquez C. (2012) Antocianinas y actividad antioxidante en maíces (*Zea mays* L.) de las razas Chalqueño, Elotes Cónicos y Bolita. *Agrociencia* 47:815-825.
- Sánchez G. J. J. and M. M. Goodman (1992) Relationships among the Mexican races of maize. *Economic Botany* 46:72-85.
- Sánchez G. J. J., M. M. Goodman and C W Stuber (2000) Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011) Proyecto Global. En línea. <http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/maicesInfGest.html> (Mayo 2014).
- SINAREFI, Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos (2010) Red de Maíz. [http://www.sinarefi.org.mx/redes/red\\_maiz.html](http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_maiz.html) (Mayo 2014).
- Vázquez C. M. G., S. García L., Y. Salinas M., D. J. Bergvison and N. Palacios R. (2011) Grain and tortilla quality in landraces and improved maize grown in the highlands of Mexico. *Plant Foods for Human Nutrition* 66:203-208.
- 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. Especial 3):15-21.
- Wellhausen E. J., L. M. Roberts y E. Hernández X. En colaboración con P C Mangelsdorf (1951) Razas de Maíz en México. Su Origen, Características y Distribución. SAG, OEE. Folleto Técnico 5 México. 237 p.
- SAS Institute Inc (2002) SAS/STAT® user's guide, version 9.2. SAS Institute Inc., Cary, NC.