

RAZAS MEXICANAS DE MAÍZ COMO FUENTE DE GERMOPLASMA PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO*

MEXICAN MAIZE RACES AS A GERMPLASM SOURCE FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

José Ariel Ruiz Corral^{1§}, José Luis Ramírez Díaz¹, Juan Manuel Hernández Casillas², Flavio Aragón Cuevas³, José de Jesús Sánchez González⁴, Alejandro Ortega Corona⁵, Guillermo Medina García⁶ y Gabriela Ramírez Ojeda¹

¹Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México. C. P. 47600. ²Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Carretera Los Reyes-Textcoco, km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. ³Campo Experimental Valles Centrales. INIFAP. Santo Domingo Barrio Bajo, Etla, Oaxaca, México. ⁴Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5. Zapopan, Jalisco, México. ⁵Campo Experimental Norman E. Borlaug. INIFAP. Calle Norman E. Borlaug, km 12. Cd. Obregón, Sonora, México. C. P. 85000. ⁶Campo Experimental Zacatecas. INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo, km 24.5. Calera, Zacatecas, México. C. P. 98600. [§]Autor para correspondencia. ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

RESUMEN

La producción de maíz en México frente al fenómeno del cambio climático, es un problema complejo que requiere abordarse en forma integral por los problemas sociales tan fuertes que puede generar. El objetivo de la presente investigación fue caracterizar e identificar la adaptabilidad ambiental, asociada a condiciones de alta temperatura y baja disponibilidad de humedad, entre 48 razas mexicanas de maíz. El estudio se realizó en 23 586 accesiones de 48 razas mexicanas de maíz; mediante las coordenadas geográficas se caracterizaron las principales condiciones agroclimáticas promedio, en las cuales se desarrollan actualmente razas de maíz. En esta caracterización se consideraron los parámetros siguientes: precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), índice de humedad (IH)= P/ETP, temperatura máxima media (Txm), temperatura mínima media (Tím), temperatura media (Tm), oscilación térmica (OT)= Txm-Tím, y número de días con temperatura >35 °C (NDT35). Con excepción de este último, todos estos parámetros se manejaron a escala anual, estacional (mayo-octubre) y mensual (agosto y septiembre), produciendo un total de 36 variables de caracterización agroclimática de los sitios de

ABSTRACT

The maize production in Mexico facing the climatic change phenomenon is a complex problem that needs to be comprehensively addressed due to the very difficult social problems that it may generate. The aim of this paper was to characterize and to identify the environmental adaptability associated with high temperature and low moisture availability conditions from 48 Mexican maize races. The study was conducted in 23 586 accessions of 48 Mexican maize races; using geographical coordinates, the average major agro-climatic conditions were characterized, in which are currently developing maize races. In this characterization the following parameters were considered: precipitation (P), potential evapotranspiration (PET), humidity index (HI)= P/PET, mean maximum temperature (Txm), mean minimum temperature (Tím), average temperature (Tm), thermal oscillation (OT)= Txm-Tím and, number of days with temperature >35 °C (NDT35). All but the latter one, of these parameters were managed at annual, seasonal (May-October) and monthly (August and September), producing a total of 36 variables of agroclimatic characterization of

* Recibido: diciembre de 2010
Aceptado: junio de 2011

accesión. Con los promedios ambientales por raza se hizo un análisis de taxonomía numérica; a través de cluster con la opción de correlación de momento producto entre razas. A partir de este análisis se identificaron cuatro grupos raciales, de los cuales uno de ellos aglutinó razas con adaptación a altas temperaturas y déficit de humedad durante el ciclo mayo-octubre; concluyéndose que en este grupo racial es donde existe mayor probabilidad de encontrarse genes, que contribuyan a desarrollar genotipos de maíz con resistencia a altas temperaturas y déficit hídrico.

Palabras clave: *Zea mays* L., diversidad genética, factores ambientales.

INTRODUCCIÓN

La presencia del cambio climático en las áreas agrícolas, impone la necesidad de generar medidas de adaptación a las nuevas condiciones agroclimáticas que trae consigo este fenómeno (IPCC, 2007), especialmente en cultivos como el maíz, que es el cereal más sembrado en el mundo y en países como México está muy ligado a la cultura y a los hábitos alimenticios. La formación de nuevas variedades de cultivo constituye una de las medidas de adaptación más adecuadas; ya que a través de la selección se solucionan varios problemas que el cambio climático impone, sobre el sistema de producción tales como: estrés hídrico y térmico, baja viabilidad del polen, aceleración de la fenología de la planta, baja productividad e incremento en la ocurrencia de plagas, enfermedades y malezas (FAO, 2007; Hatfield *et al.*, 2011).

La generación de nuevos cultivares que contribuyan a resolver los problemas de adaptación al cambio climático implica disponer de la mayor diversidad genética asociada a los cultivos de interés. En el caso del maíz, tanto las razas mexicanas como sus parientes silvestres teocintle (*Zea* spp.) y tripsacum (*Tripsacum* spp.), constituyen reservorios importantes de genes que podrían usarse en las nuevas variedades mejoradas de maíz, para lograr mayor adaptación y adaptabilidad a condiciones climáticas menos favorables; las cuales se prevé que ocurrirán paulatinamente durante el transcurso del siglo XXI, a través de temperaturas cada vez más elevadas, menor disponibilidad de precipitación y humedad para el desarrollo de los cultivos (Magaña y Caetano, 2007; Ruiz *et al.*, 2010).

the accession sites. With the environmental averaging by race, an analysis of numerical taxonomy was performed; through a cluster with the option of product-moment correlation between races. Using this analysis, four racial groups were identified, one of them brought together races with adaptation to high temperatures and moisture deficits during the cycle from May to October and, concluding that, it's in this racial group where exists the greatest probability of finding genes that may contribute to developed maize genotypes with resistance to high temperatures and, water deficit.

Key words: *Zea mays* L., genetic diversity, environmental factors.

INTRODUCTION

The presence of the climatic change on agricultural areas leads to the need to generating adaptation actions to the new agroclimatic conditions that come along with this phenomenon (IPCC, 2007), especially in crops like maize, which is the most widely planted cereal in the world and, in countries like Mexico it's closely linked to the culture and eating habits. The formation of new crop varieties is one of the most appropriated adaptation measurements; as through selection, several problems that climatic change imposes on the production system are solved, such as: water and heat stress, low viability of pollen, accelerated plant phenology, low productivity and, increased occurrence of pests, diseases and weeds (FAO, 2007; Hatfield *et al.*, 2011).

Generating new cultivars that will help to solve the problems of adaptation to the climatic change means having the greatest genetic diversity associated with the crops of interest. In the case of maize, the Mexican races and their wild relatives: teocinte (*Zea* spp.) and tripsacum (*Tripsacum* spp.) are important reservoirs of genes that could be used in the new maize improved varieties in order to achieve greater adaptation and, adaptability to less favorable climatic conditions; which are expected to occur gradually during the course of the XXI century, through increasingly higher temperatures, lower rainfall and moisture availability for crop's development (Magaña and Caetano, 2007; Ruiz *et al.*, 2010).

México es centro de origen y de diversidad genética del maíz, se creó que la domesticación de esta especie ocurrió hace aproximadamente 10 000 años a partir del teocintle anual *Zea mays* ssp. *Parviglumis*, mediante un evento individual en la región de la Cuenca del Balsas (Matsuoka, *et al.*, 2002; Doebley, 2004); el cual podría ser considerado como punto de partida para la dispersión del maíz al resto de la república mexicana. Considerando que, desde el punto de vista climático, México es un país muy diverso (Medina *et al.*, 1998), esta condición ha contribuido a aumentar la diversidad del maíz (Brush y Perales, 2007); debido que la heterogeneidad ambiental promueve el incremento de la diversidad genética intraespecífica (Linhart y Grant, 1996).

No obstante, para aprovechar y definir el uso potencial de los recursos genéticos de maíz disponibles en México, se requiere caracterizarlos desde la perspectiva de la adaptabilidad ambiental; lo cual es posible debido que con la sistematización de información de los programas nacionales de recursos genéticos, ha sido posible integrar bases de datos georreferenciados de las razas de maíz (LAMP, 1991; Ruiz *et al.*, 2008). Con estas bases de datos, es posible realizar la caracterización ambiental de los sitios de acceso para determinar los descriptores ecológicos de taxas, razas o especies (Lobo *et al.*, 2003); con los cuales se podrán deducir los rangos de adaptación bajo diversos parámetros ambientales, haciendo posible inferir niveles de adaptabilidad y rusticidad para condiciones climáticas adversas (Ruiz *et al.*, 2008).

El uso de datos pasaporte, en el contexto de los sistemas de información geográfica, ha sido reportada con éxito en estudios de caracterización, distribución y conservación de recursos genéticos asociados a cultivos (Jarvis *et al.*, 2003; Ferguson *et al.*, 2005; Contreras *et al.*, 2010). De esta forma, Ruiz *et al.* (2008) caracterizaron los rangos de adaptación climática y los descriptores ecológicos de 42 razas mexicanas de maíz con 4 161 accesiones; identificando cuatro grupos raciales en función de sus ambientes de desarrollo: razas de ambiente templado a semicálido, razas de ambiente semicálido a cálido, razas de ambiente muy cálido y razas del grupo Jala con adaptación ambiental variable.

Sin embargo, ahora se requiere caracterizar en forma más específica, las razas de maíz en función de los factores del clima que se espera se modifiquen más como resultado del cambio climático. El objetivo de esta investigación fue caracterizar 48 razas mexicanas de maíz, para identificar aquellas cuya adaptación este asociada con condiciones de alta temperatura y baja disponibilidad de humedad.

Mexico is the center of origin and genetic diversity of maize, the domestication of this species may have occurred approximately 10 000 years from annual teosinte *Zea mays* ssp. *Parviglumis*, by a single event in the region of the Balsas Basin (Matsuoka *et al.*, 2002; Doebley, 2004) which could be considered as a starting point for the corn spread to the rest of the Mexican Republic. Whereas, from the climatic point of view, Mexico is a very diverse country (Medina *et al.*, 1998), this condition has contributed to increase the maize diversity (Brush and Perales, 2007); as environmental heterogeneity promotes the increase of intraspecific genetic diversity (Linhart and Grant, 1996).

However, in order to seize and define the potential use of maize genetic resources available in Mexico, it's required to characterize them from an environmental adaptability perspective; which is possible by the information systematization from the national genetic resources programs, which has provided the integration of geo-referenced database of the maize races (Lamp, 1991; Ruiz *et al.*, 2008). With these databases, environmental characterization of the accession sites has been carried out in order to determine the ecological descriptors of *taxa*, races or species (Lobo *et al.*, 2003), by using them, it will be possible to deduct the adaptation range under various environmental parameters, making it possible to infer adaptability and hardiness levels to adverse weather conditions (Ruiz *et al.*, 2008).

The passport data usage in the context of geographic information systems has been reported as successful in characterization studies, distribution and conservation of genetic resources associated with crops (Jarvis *et al.*, 2003; Ferguson *et al.*, 2005; Contreras *et al.*, 2010). Thus, Ruiz *et al.* (2008) characterized the range of climate adaptation and, ecological descriptors of 42 Mexican maize races with 4 161 accessions; identifying four racial groups based on their development environments: temperate to semi-warm environment races, semi-hot to warm environment races, very warm environment races and Jala group with variable environmental adaptation.

However, now it is required to characterize more specifically maize races based on climatic factors that are expected to change even more as a result of climate change. The aim of this paper was to characterize 48 Mexican maize races in order to identify those whose adaptation is associated with conditions of high temperature and low moisture availability.

MATERIALES Y MÉTODOS

Bases de datos

Se consideraron los datos de pasaporte de 23 586 accesiones correspondientes a 48 razas mexicanas de maíz (Cuadro 1). Las bases de datos se obtuvieron de tres fuentes: a) el volumen I y II del proyecto latinoamericano (LAMP, 1991); b) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); y c) del proyecto CONABIO FZ002-FZ016 (INIFAP, 2011). De todas estas accesiones se obtuvo la información de coordenadas geográficas y altitud del sitio.

Cuadro 1. Número de accesiones consideradas por raza.

Table 1. Number of accessions considered by race.

Raza	Accesiones	Raza	Accesiones	Raza	Accesiones
Ancho	396	Cristalino de Chihuahua	382	Palomero de Chihuahua	9
Apachito	79	Cubano Amarillo	72	Palomero Toluqueño	65
Arrocillo	118	Dulce	62	Pepitilla	391
Azul	105	Dulcillo del Noroeste	66	Ratón	473
Blando de Sonora	65	Dzit Bacal	180	Reventador	128
Bofo	69	Elotero de Sinaloa	81	Tablilla de Ocho	47
Bolita	883	Elotes Cónicos	721	Tabloncillo	757
Cacahuacintle	97	Elotes Occidentales	451	Tabloncillo Perla	288
Celaya	1269	Gordo	81	Tehua	60
Chalqueño	1010	Jala	65	Tepecintle	611
Chapalote	49	Mushito	530	Tuxpeño	4140
Comiteco	1347	Nal Tel	224	Tuxpeño Norteño	381
Conejo	123	Nal Tel de Altura	24	Vandeno	371
Cónico	2965	Olotillo	1309	Zamorano Amarillo	96
Cónico Norteño	1621	Olotón	708	Zapalote Chico	271
Coscomatepec	119	Onaveño	116	Zapalote Grande	111

Caracterización ambiental de sitios de accesión

Con las coordenadas geográficas de los sitios de accesión, se integró una matriz de datos en Microsoft Excel; la cual se importó en el sistema Idrisi Andes (Eastman, 2006) y se convirtió en archivo vector para extraer la caracterización agroclimática de los puntos de accesión, mediante las imágenes correspondientes de los parámetros siguientes: precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), índice de humedad (IH)=P/ETP, temperatura máxima media (Txm), temperatura mínima media (Tm), temperatura media (Tm), oscilación

MATERIALS AND METHODS

Databases

The passport data from 23 586 accessions were considered, corresponding to 48 Mexican maize races (Table 1). The databases were obtained from three sources: a) Volume I and II of the Latin American project (LAMP, 1991); b) from the National Research Institute of Forestry, Agricultural and Livestock (INIFAP); and c) CONABIO FZ002-FZ016 project (INIFAP, 2011). Out of these accessions, the information of geographical coordinates and site altitude were obtained.

Environmental characterization of the accession sites

Using the geographical coordinates of the accession sites, a data matrix was integrated in Microsoft Excel; which was imported into Idrisi Andes system (Eastman, 2006) and, became a file vector to extract the agroclimatic characterization of accession points by the corresponding images of the following parameters: precipitation (P), potential evapotranspiration (PET), moisture index (HI)=P/PET, mean maximum temperature (Txm), mean minimum temperature (Tm), average temperature (Tm), thermal

térmica (OT)= $T_{xm} - T_{im}$, y número de días con temperatura $>35^{\circ}\text{C}$ (NDT35); a excepción de este último parámetro, todos se manejaron a escala anual, estacional (mayo-octubre) y mensual (agosto y septiembre); generando un total de 36 variables de caracterización agroclimática de los sitios de accesión.

Para extraer toda esta información se utilizó el sistema de información ambiental (SIA) del INIFAP; el cual contiene información de todas estas variables en formato raster. La información que integra el SIA proviene de datos climáticos diarios de la serie 1961-2003, correspondiente a la red de estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Análisis estadístico

Tomando en cuenta las dimensiones y complejidad de la base de datos, se tomó como unidad de análisis a las razas. Antes de obtener promedios por raza se llevaron a cabo análisis de varianza para estimar la importancia de la variación entre razas y la variación dentro de razas para las variables ambientales; si la variación entre razas es considerablemente mayor que la variación dentro de razas, entonces es posible llevar análisis de taxonomía numérica tomando como unidad los promedios de razas, para eso se utilizó el software Statistica 7.0 (StatSoft Inc., 2004). Para determinar las relaciones entre razas a partir de las 36 variables derivadas de la caracterización ambiental de los sitios de colecta, se calculó el coeficiente de correlación con datos estandarizados a media cero y varianza uno, y el agrupamiento se llevó a cabo con el método promedio de grupo.

A fin de estimar el número óptimo de grupos, se usó el método de validación de Wishart (2006) contenido en el programa Clustan Graphics V8. El método compara el agrupamiento obtenido con los datos originales, con los agrupamientos generados por permutación aleatoria de dichos datos; la distribución e intervalos de confianza obtenidos por permutación se comparan con el dendrograma generado con los datos de interés bajo la hipótesis de que dichos datos se distribuyen aleatoriamente, en otras palabras, no tienen estructura.

Caracterización de grupos raciales

Con base en las condiciones de temperatura máxima e índice de humedad promedio del periodo mayo-octubre, se realizó la caracterización agroclimática de los grupos raciales derivados del análisis cluster. Se designaron como ambientes de alta temperatura, aquellos donde la temperatura máxima media iguala o rebasa la temperatura

oscillation (OT)= $T_{xm} - T_{im}$ and number of days with temperature $>35^{\circ}\text{C}$ (NDT35); except for this last parameter, the rest were managed at annual, seasonal (May-October) and monthly (August and September) scale, generating a total of 36 agroclimatic characterization variable of the accession sites.

In order to extract this information, the environmental information system (EIS) of INIFAP was used; which contains information of all these variables in raster format. The SIA information comes from the daily weather data from the 1961-2003 series, corresponding to the weather station network of the National Water Commission (CONAGUA).

Statistical analysis

Considering the size and complexity of the database, the races were taken as an analysis unit. Before obtaining race averages, an analysis of variance was performed to estimating the importance of variation between races and the variation within races for environmental variables; if the variation between races is considerably higher than the variation within races, then the numerical taxonomy analysis is possible using as a unit the races' averages, for this, the software Statistica 7.0 was used (StatSoft Inc., 2004). In order to determine the relationships between races from the 36 variables derived from the environmental characterization of the collecting sites, the correlation coefficient was calculated with data standardized to zero mean and, variance one and clustering was performed with the group of average method.

In order to estimate the optimal number of groups, the validation method Wishart (2006) was used, which is contained in the Clustan Graphics V8 program. This method compares the clustering obtained with the original data, with the clusters generated by random permutation of the data; the distribution and, confidence intervals obtained by permutation are compared with the dendrogram generated with the data of interest under the hypothesis that, the data are randomly distributed, in other words, they do not have structure.

Characterization of racial groups

Based on the maximum temperature conditions and, average humidity index for the period from May to October, the agroclimatic characterization of the racial

umbral máxima (Tumax) de desarrollo del maíz; la cual se ubicó en 31 °C promedio, calculado del rango de 27 a 35 °C reportado por diversos autores donde: 27 °C corresponde a genotipos de valles altos (Hernández y Carballo, 1984), 30 °C a genotipos subtropicales (Smith *et al.*, 1982; Russelle *et al.*, 1984) y 32-35 °C a materiales tropicales (Singh *et al.*, 1976; Baradas, 1994).

En este mismo contexto se designaron como ambientes de temperatura moderada, a aquellos en los que la temperatura máxima media del ciclo mayo-octubre es menor que 31 °C. Para la clasificación de la condición de humedad, se designaron como ambientes conhumedad deficiente, los que promediaron un IH mayo-octubre ≤ 0.8 o en agosto-septiembre un $IH \leq 1$; y de manera opuesta, los ambientes cuyo IH de mayo-octubre fue ≥ 0.8 o en agosto-septiembre $IH \geq 1$, se clasificaron como ambientes con humedad adecuada para el desarrollo del maíz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se describen los resultados obtenidos del análisis de variación entre razas. Como puede verse el valor de la prueba de F es altamente significativo para oscilación térmica, precipitación e índice de humedad, y significativo para temperatura máxima media; lo que señala que si existen diferencias reales entre los ambientes agroclimáticos donde desarrollan las razas de maíz. Los datos del Cuadro 2 evidencian que las razas difieren tanto en condiciones de temperatura como de humedad, y por tanto, de acuerdo con Linhart y Grant (1996), es muy posible que difieran también en cuanto a los genes relacionados con adaptación ambiental.

Cuadro 2. Variación entre razas en función de cinco variables agroclimáticas en el periodo de mayo-octubre.

Table 2. Variation among races in terms of five agroclimatic variables in the period from May to October.

Variable	$\bar{X}$	CV	Valor F
Oscilación térmica (°C)	13.75	11.75	27.9**
Precipitación (mm)	850.1	32.22	435**
Temperatura media (°C)	21.9	16.15	1.53
Temperatura máxima media (°C)	28.8	11.74	4.28*
Índice de humedad	0.96	35.73	135.6**

*, **= valor significativo y altamente significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

groups derived from cluster analysis was performed. As high-temperature environments were designated, those where the average maximum temperature equals or exceeds the maximum threshold temperature (Tumax) of maize development; which was set at 31 °C average, calculated from the range of 27 to 35 °C reported by several authors, where: 27 °C corresponds to high valleys genotypes (Hernández and Carballo, 1984), 30 °C to subtropical genotypes (Russelle *et al.*, 1984; Smith *et al.*, 1982) and 32-35 °C to tropical materials (Singh *et al.*, 1976; Baradas, 1994).

In the same context were designated as moderate-temperature environments, those in which the average maximum temperature from May to October cycle is lower than 31 °C. For the classification of the moisture condition were designated as low humidity environments, those which averaged a HI of May to October ≤ 0.8 or in August-September a $HI \leq 1$; and the opposite way, environments whose HI of May to October was ≥ 0.8 or August to September $HI \geq 1$, were classified as adequate moisture environments for the maize development.

RESULTS AND DISCUSSION

The Table 2 describes the results obtained from the analysis of variation between races. As shown, the value of the F test is highly significant for temperature oscillation, precipitation and humidity index and, significant for mean maximum temperature; which indicates that, real differences do exist between the agro-climatic environments where the maize races are developed. The data in Table 2 shows that, the races differ in terms of temperature and humidity, and therefore, according to Linhart and Grant (1996), it's likely that, they differ also in terms of genes related to the environmental adaptation.

The cluster analysis performed to 48 Mexican maize races, generated the dendrogram where four major groups can be identified (Figure 1); according to the average climatic values from May to October, the races of each group (Table 3) could be identified with the following characteristics:

En el análisis cluster realizado a las 48 razas mexicanas de maíz, se generó el dendrograma donde pueden identificarse cuatro grandes grupos (Figura 1); los cuales, de acuerdo con los valores climáticos promedio mayo-octubre, las razas de cada grupo (Cuadro 3) podrían identificarse con las características siguientes:

Grupo 1: ambiente de alta temperatura y humedad adecuada

En este ambiente las razas se desarrollan con temperaturas máximas promedio de 31.8 °C; las cuales igualan o sobrepasan la temperatura umbral máxima de desarrollo informada en variedades mejoradas de maíz (Russelle *et al.*, 1984); y en condiciones de humedad se obtuvo un IH promedio de 1.05, por lo que se consideran adecuadas para siembras de temporal y alta demanda hídrica (Baradas, 1994). La precipitación y temperatura promedio mayo-octubre se ubican entre los 760 y 1 350 mm, y entre los 24 y 27.1 °C (Cuadro 3). El número de días promedio con temperatura superior a los 35 °C es de 35, aunque se distinguen las razas Dzit Bacal, Zapalote Chico y Tabloncillo Perla con más de 40 días bajo esta condición térmica (Cuadro 3).

En este grupo se aprecian dos subgrupos, en el primero se ubican las razas Vandeño, Zapalote Grande, Olotillo, Cubano Amarillo, Dzit Bacal, Tuxpeño, Zapalote Chico, Nal Tel y Conejo, que corresponden al grupo racial de ambiente muy

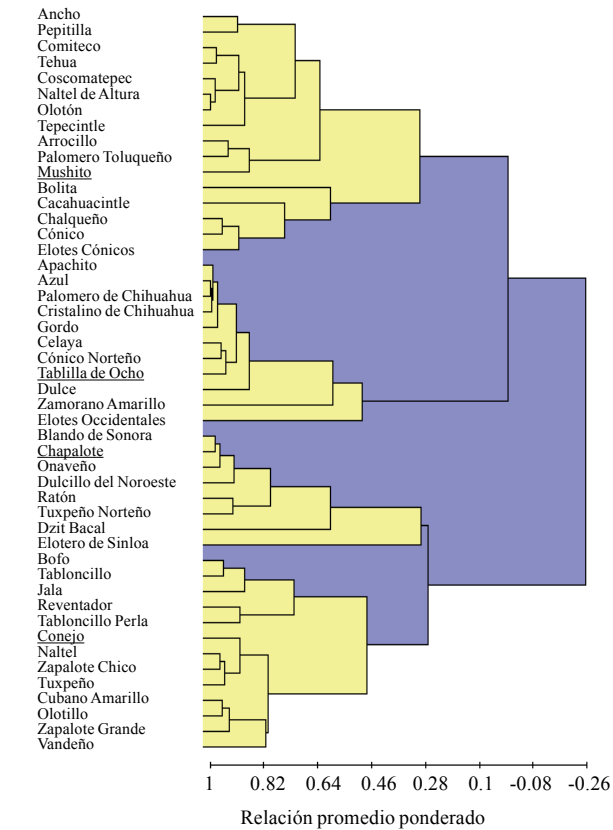


Figura 1. Dendrograma de 48 razas mexicanas de maíz, basado en cinco variables agroclimáticas.
Figure 1. Dendrogram of 48 Mexican maize races based on five agroclimatic variables.

Cuadro 3. Valores promedio por raza y grupo racial, de parámetros agroclimáticos del periodo mayo-octubre y agosto-septiembre.
Table 3. Mean values by race and racial group, of agroclimatic parameters for the period from May to October and from August to September.

Grupo racial	Raza	Mayo-octubre				Agosto-septiembre	
		Temperatura media (°C)	Temperatura máxima media (°C)	Número de días >35 °C	Precipitación (mm)	IH	IH
1	Vandeño	24.8	31.2	34	1048	1.13	1.77
	Zapalote Grande	24.9	31	29	1 120	1.21	1.79
	Olotillo	24.5	30.4	24	1 159	1.29	1.9
	Cubano Amarillo	24.7	30.8	24	1 307	1.42	2.04
	Tuxpeño	25.6	31.8	34	1 039	1.13	1.7
	Zapalote Chico	27.1	33	44	995	1.04	1.54
	Nal Tel	25.4	31.6	36	1 027	1.09	1.57
	Conejo	24.7	31	33	956	1.04	1.62
	Tabloncillo Perla	26.6	33.2	41	895	0.92	1.81
	Reventador	26.3	33	39	767	0.8	1.52
	Jala	24	31.1	33	899	0.93	1.58
	Tabloncillo	24.3	31.3	32	821	0.86	1.56
	Bofo	24.7	31.9	39	819	0.83	1.49
	Promedio	25.2	31.6	34.0	988.6	1.1	1.7

1= razas de ciclo cálido húmedo; 2= razas de ciclo semicálido húmedo; 3= razas de ciclo cálido subhúmedo-seco; 4= razas de ciclo semicálido subhúmedo-húmedo.

Cuadro 3. Valores promedio por raza y grupo racial, de parámetros agroclimáticos del periodo mayo-octubre y agosto-septiembre (Continuación).**Table 3. Mean values by race and racial group, of agroclimatic parameters for the period from May to October and from August to September (Continuation).**

Grupo racial	Raza	Mayo-octubre		Agosto-septiembre			
		Temperatura media (°C)	Temperatura máxima media (°C)	Número de días >35 °C	Precipitación (mm)	IH	IH
2	Ancho	21.2	27.8	13	912	1.04	1.57
	Pepitilla	21.7	28.3	18	923	1.05	1.59
	Tepecintle	24.4	30.2	24	1 414	1.59	2.33
	Olotón	19.7	25.5	3	1 324	1.67	2.39
	Nal Tel de Altura	20.2	26	6	1 280	1.61	2.32
	Coscomatepec	19.8	25.6	8	1 361	1.73	2.48
	Tehua	22.2	28	9	1 363	1.62	2.27
	Comiteco	20.8	26.8	7	1 234	1.49	2.07
	Palomero Toluqueño	15.2	22.3	0	859	1.15	1.68
	Cacahuacintle	15.7	22.5	4	786	1.03	1.49
	Arrocillo	16.4	22.4	1	927	1.26	1.83
	Mushito	19.1	25.8	4	1 039	1.26	1.92
	Elotes Cónicos	17.1	24	2	754	0.95	1.37
	Cónico	16.5	23.4	1	729	0.93	1.32
	Chalqueño	17	24.4	2	683	0.84	1.23
	Bolita	20	26.7	8	792	0.94	1.37
	Promedio	19.2	25.6	6.9	1 023.8	1.3	1.8
3	Chapalote	26.6	34.3	48	485	0.46	1
	Tuxpeño Norteño	23.1	30.6	20	416	0.44	0.72
	Ratón	24.5	31.5	27	576	0.62	0.98
	Dulcillo del Noroeste	24.6	32.4	34	576	0.58	1.21
	Onaveño	26.5	33.7	43	635	0.64	1.24
	Blando de Sonora	26.6	34.2	47	582	0.57	1.18
	Dzit Bacal	26.9	33.4	47	927	0.94	1.32
	Elotero de Sinaloa	25.7	32	35	848	0.89	1.62
	Promedio	25.6	32.8	37.6	630.6	0.6	1.2
4	Zamorano Amarillo	20.3	27.5	9	797	0.89	1.45
	Elotes Occidentales	21.9	28.8	18	805	0.89	1.38
	Dulce	20.6	27.9	15	685	0.76	1.28
	Gordo	18.6	27	3	467	0.52	1.03
	Apachito	17.5	25.9	1	532	0.62	1.17
	Cristalino de Chihuahua	18	26.5	2	494	0.56	1.11
	Palomero de Chihuahua	17.3	25.8	1	492	0.58	1.17
	Azul	17.7	26.2	1	516	0.59	1.15
	Tablilla de Ocho	21.1	28.8	16	630	0.67	1.2
	Cónico Norteño	19.4	27.3	5	447	0.5	0.85
	Celaya	20.5	27.8	11	663	0.75	1.19
	Promedio	19.4	27.2	7.5	593.5	0.7	1.2

1= razas de ciclo cálido húmedo; 2= razas de ciclo semicálido húmedo; 3= razas de ciclo cálido subhúmedo-seco; 4= razas de ciclo semicálido subhúmedo-húmedo.

cálido (Ruiz *et al.*, 2008) y con características distintivas principalmente en precipitación (> 900 mm) e índice de humedad promedio (0.94), respectivamente (Cuadro 3). En el segundo subgrupo se ubican las razas Tabloncillo Perla, Reventador, Jala, Tabloncillo y Bofo, con precipitación < 900 mm y un $IH < 0.94$, respectivamente; con excepción de Jala, pertenecen a los grupos raciales de ambiente muy cálido (Ruiz *et al.*, 2008), y de ocho hileras (Sánchez y Goodman, 1992).

Grupo 2: ambiente de temperatura moderada y humedad adecuada

Estas razas de maíz están adaptadas a ambientes que aparentemente no implican condiciones agroclimáticas de tensión hídrica y temperatura; ya que los promedios de temperatura máxima media y el IH se ubican en los 25.6°C y 1.26, respectivamente. Ninguna de las razas presenta temperatura máxima del ciclo $> 31^{\circ}\text{C}$, ni $IH < 0.8$ (Cuadro 3); con base en estos valores, resulta difícil esperar que entre las razas de este grupo, se encontraran reservorios de genes para adaptación a altas temperaturas y deficiencias de humedad; excepto en la raza Chalqueño, que tiene valores de precipitación de ciclo inferior a 700 mm y un IH promedio de 0.84, que son condiciones no tan ideales para su desarrollo.

En este grupo se aprecian dos subgrupos (Figura 1): el primero está integrado por las razas Ancho, Pepitilla, Tepecintle, Olotón, Nal Tel de Altura, Coscomatepec, Tehua y Comiteco; cuyos valores de precipitación mayo-octubre oscilan entre los 900 y 1 450 mm, y temperatura media mayo-octubre entre 18 y 22°C . El segundo subgrupo se formó con las razas Palomero Toluqueño, Cacahuacintle, Arrocillo, Mushito, Elotes Cónicos, Cónico, Chalqueño y Bolita; las razas de este subgrupo difieren del anterior en que el valor de la temperatura media es $< 18^{\circ}\text{C}$, la precipitación mayo-octubre varía entre 650 y 1 050 mm, e IH oscila entre 0.84 y 1.26 (Cuadro 3). Este subgrupo coincide con el grupo racial de ambiente templado-semicálido descrito por Ruiz *et al.* (2008), y también, con el grupo racial cónico (Sánchez y Goodman, 1992).

Grupo 3: ambiente de alta temperatura y humedad deficiente

Las razas de maíz de este grupo se caracterizan por desarrollar en ambientes con temperatura máxima media que aparentemente impone estrés térmico al maíz; ya que la temperatura media en el período mayo-octubre (32.7°C)

Group 1: high temperature environment and adequate moisture

In this environment races are developed with average maximum temperatures of 31.8°C , which equal or exceed the maximum threshold temperature for development reported in improved maize varieties (Russelle *et al.*, 1984); and in wet conditions, an average HI of 1.05 was obtained, so they are considered as suitable for rainfed crops and, high water demand (Baradas, 1994). The precipitation and average temperature from May to October are between 760 and 1350 mm and, between 24 and 27.1°C (Table 3). The average number of days with temperatures above 35°C is 35, although, the races Dzit Bacal, Zapalote Chico and Tabloncillo Perla showed more than 40 days under this thermal condition (Table 3).

This group has two subgroups, within the first one, there are located Vandeño, Zapalote Grande, Olotillo, Cubano Amarillo, Dzit Bacal, Tuxpeño, Zapalote Chico, Nal Tel and Conejo races, which correspond to the racial group of very warm environment (Ruiz *et al.*, 2008) and, distinctive features mainly in precipitation (> 900 mm) and average moisture content (0.94), respectively (Table 3). In the second one are located Tabloncillo Perla, Reventador, Jala, Tabloncillo and Bofo races, with precipitation < 900 mm and a $HI < 0.94$, respectively, with the exception of Jala, they belong to racial groups of very warm environments (Ruiz *et al.*, 2008), and eight rows (Sánchez and Goodman, 1992).

Group 2: moderate temperature ambient and appropriate humidity

These maize races are adapted to environments without agroclimatic conditions of water stress and temperature; as the maximum temperature averages and HI are located in the 25.6°C and 1.26, respectively. None of the races presented maximum temperature of the cycle $> 31^{\circ}\text{C}$ or $HI < 0.8$ (Table 3), based on these values, it is difficult to expect that, among the races of this group, there will be genes reservoirs for high temperatures and, moisture deficiencies adaptation; except in Chalqueño race, which has cycle precipitation values lower than 700 mm and, an average HI of 0.84, which are lower than the ideal conditions for its development.

This group shows two subgroups (Figure 1): the first is composed by Ancho, Pepitilla, Tepecintle, Olotón, Nal Tel de Altura, Coscomatepec, Tehua and Comiteco races; whose precipitation values of May to October range between

rebasa los 31 °C; incluso en algunas razas como Chapalote y Blando de Sonora, la temperatura máxima media del ciclo rebasa los 34 °C (Cuadro 3).

Este grupo también se caracteriza porque su índice de humedad promedio entre razas (0.6), varía entre 0.5 y 0.65; estos valores clasifican a las razas de este grupo como más rústicas, debido que se desarrollan en las condiciones más adversas de temperatura y humedad. Aquí también se aprecian dos subgrupos: el primero integrado por Chapalote, Tuxpeño Norteño, Ratón, Dulcillo del Noroeste, Onaveño y Blando de Sonora que completan su ciclo de madurez con una precipitación acumulada promedio durante el temporal de 416 a 635 mm; que ocasiona que estas razas desarrollen un IH promedio de 0.44 a 0.64; es decir, varía desde una condición semiárida hasta un régimen subhúmedo-seco (Williams y Balling, 1996).

Además estas razas, durante su desarrollo, toleran temperaturas máximas promedio de 30.6 a 34.3 °C (Cuadro 3); en este subgrupo sobresalen las razas Chapalote y Blando de Sonora, que presentan una combinación de las condiciones más extremas de temperatura y humedad en las que se cultiva actualmente el maíz en México; siendo la precipitación del ciclo inferior a los 600 mm (Chapalote 485 mm, Blando de Sonora 582 mm) y temperatura media mayo-octubre > 26 °C; condición ambiental clasificada como muy cálida (García, 2004). Cuando la temperatura máxima promedio del ciclo de cultivo es > 34 °C y durante un periodo mayor de 45 días se tiene temperatura superior a los 35 °C, se reduce significativamente la fotosíntesis del maíz (Baradas, 1994).

En este subgrupo también sobresale la raza Tuxpeño Norteño; que aunque no presenta los valores más altos en los parámetros térmicos, se desarrolla en los niveles más bajos de humedad; ya que durante su ciclo de cultivo se desarrolla con 416 mm e IH de 0.44, incluso es la raza que se desarrolla con el IH más bajo (0.7) durante el periodo crítico agosto-septiembre (Cuadro 3), cuando el maíz se encuentra en la etapa reproductiva. Este subgrupo racial coincide con el grupo racial de ambiente semicálido-cálido (Ruiz *et al.*, 2008). El segundo subgrupo lo conforman las razas Elotero de Sinaloa y Dzit Bacal, las cuales difieren de las demás razas del grupo 3 sobre todo con relación a los parámetros de humedad, ya que se desarrollan bien en regiones con temporal relativamente abundante (848 y 927 mm en promedio, respectivamente); con estas características, estas razas parecen estar familiarizadas con razas del grupo 1.

900 and 1450 mm and average temperature from May to October between 18 and 22 °C. The second subgroup was formed by Palomero Toluqueño, Cacahuacintle, Arrocillo, Mushito, Elotes Cónicos, Cónico, Chalqueño and Bolita races; the races of this subgroup differs in the value of the average temperature which is <18 °C, the precipitation of May to October varies between 650 and 1050 mm and, HI between 0.84 and 1.26 (Table 3). This subgroup coincides with the racial group of semi-warm temperate environment described by Ruiz *et al.* (2008), and also with conical racial group (Sánchez and Goodman, 1992).

Group 3: high temperature environment and poor humidity

The maize races in this group are characterized by developing in environments with an average maximum temperature that, apparently imposes thermal stress to maize; as the average temperature in the May to October period (32.7 °C) exceeds 31 °C, even in some soft races as Chapalote and Blando de Sonora, the average maximum temperature of the cycle exceeds 34 °C (Table 3).

This group is also characterized by its average moisture content between races (0.6), which vary between 0.5 and 0.65, these values classify the races of this group as more rustic, as they are developed in the most adverse conditions of temperature and humidity. Here, there are also two subgroups: one composed of Chapalote, Tuxpeño Norteño, Ratón, Dulcillo del Noroeste, Onaveño y Blando de Sonora which complete their maturity cycle with an average accumulative rainfall during rainy season from 416 to 635 mm, which causes these races to develop an average HI from 0.44 to 0.64; i.e., a condition that varies from semi-arid to subhumid-dry regime (Williams and Balling, 1996).

Also, during their development, these races tolerate the maximum average temperatures of 30.6 to 34.3 °C (Table 3), in this subgroup, Chapalote and Blando de Sonora stand out as they have a combination of the most extreme conditions of temperature and humidity in which maize is now grown in Mexico; being the precipitation of the cycle lower than 600 mm (Chapalote 485 mm, Blando de Sonora 582 mm) and, an average temperature May-October > 26 °C; the ambient condition is classified as very warm (García, 2004). When the average maximum temperature of the crop cycle is > 34 °C and, for a period longer than 45 days, it exists temperatures above 35 °C, the maize photosynthesis is significantly reduced (Baradas, 1994).

Grupo 4: razas de temperatura moderada y humedad deficiente

Las razas de este grupo se caracterizan por desarrollarse en ambientes, donde la temperatura máxima no representa condiciones de estrés térmico para el maíz, debido que el promedio (27 °C) es menor que el promedio crítico de 31 °C (Cuadro 3). Sin embargo, las razas de este grupo, generalmente experimenta estrés hídrico en diversos grados; ya que con excepción de las razas Zamorano Amarillo y Elotes Occidentales, el resto completan su desarrollo con un IH promedio mayo-octubre inferior a 0.8 (Cuadro 3).

En este grupo se pueden distinguir dos subgrupos (Figura 1): el primero integrado por las razas Zamorano Amarillo y Elotes Occidentales, sin condiciones aparentes de estrés hídrico, con $IH > 0.8$ y precipitación del ciclo de alrededor de 800 mm. El segundo está integrado por las razas Dulce, Gordo, Apachito, Cristalino de Chihuahua, Palomero de Chihuahua, Azul, Tablilla de Ocho, Cónico Norteño y Celaya; las cuales se adaptan a condiciones menos favorables de humedad, como lo demuestran sus promedios de IH de 0.68 y precipitación mayo-octubre de 601 mm, respectivamente; sobresaliendo las razas Cónico Norteño, Gordo, Cristalino de Chihuahua y Palomero de Chihuahua con IH de 0.5, 0.52, 0.56 y 0.58, respectivamente, que corresponden a precipitaciones menores que 500 mm (Cuadro 3). Con excepción de Zamorano Amarillo que corresponde con el grupo Jala, el resto de las razas de este grupo coincide con el grupo de ambiente templado-semicálido descrito por Ruiz *et al.* (2008).

En resumen, con base en las restricciones consideradas que impondrá el cambio climático (temperatura alta y precipitación escasa), en las zonas productoras de maíz de México y la respuesta a la temperatura y precipitación de los cuatro grupos raciales definidos; sólo las razas Chapalote, Tuxpeño Norteño y Blando de Sonora del grupo 3, están adaptadas para desarrollarse en condiciones de temperaturas altas y precipitación escasa; por lo que se concluye que en estas razas sería donde podrían detectarse, con mayor probabilidad, genes que contribuyan en la formación de nuevas variedades mejoradas de maíz con resistencia a altas temperaturas y déficit de humedad. Sin embargo, habrá ocasiones donde la restricción ambiental sea sólo humedad y entonces, podrían usarse las razas de los grupos 3 y 4, que se distinguen por adaptarse a condiciones

In this subgroup, Tuxpeño Norteño also stands out; although, it does not have the highest values in thermal parameters, is developed in the lowest levels of moisture; as during the crop cycle is developed with 416 mm and HI of 0.44, is even the race that is developed with the lowest HI (0.7) during the critical period from August to September (Table 3), when the corn is in its reproductive stage. This racial subgroup coincides with the racial group of semiwarm-warm environment (Ruiz *et al.*, 2008). The second one comprises the Elotero de Sinaloa and Dzit Bacal races, which differ from the other races of group 3 especially in relation to the moisture parameters as they grow quite well in regions with relatively large rainy seasons (848 and 927 mm on average, respectively); with these characteristics, these races seem to be familiar with group 1.

Group 4: Races of moderate temperature and poor humidity

The races of this group are characterized by developing in environments where the maximum temperature does not represent thermal stress conditions for maize, because the average (27 °C) is lower than the critical average of 31 °C (Table 3). However, the races of this group usually experience water stress in different degrees, since, with the exception of Zamorano Amarillo and Elotes Occidentales races, they all complete their development with an average HI lower than 0.8 in May-October (Table 3).

In this group, there are two subgroups (Figure 1): the first one consisting of the Zamorano Amarillo y Elotes Occidentales races, without apparent water stress conditions, with $IH > 0.8$ and cycle precipitation of 800 mm. The second one is composed by Dulce, Gordo, Apachito, Cristalino de Chihuahua, Palomero de Chihuahua, Azul, Tablilla de Ocho, Cónico Norteño and Celaya races; which are adapted to less favorable moisture conditions, as evidenced by its HI averages of 0.68 and, May-October rainfall of 601 mm, respectively; standing out: Cónico Norteño, Gordo, Cristalino de Chihuahua and Palomero de Chihuahua races, with HI of 0.5, 0.52, 0.56 and 0.58, respectively, corresponding to rainfalls lower than 500 mm (Table 3). Except of Zamorano Amarillo that corresponds with the Jala group, the remaining races of this group coincides with the environment group of temperate-semiwarm described by Ruiz *et al.* (2008).

de déficit hídrico; y si la restricción es temperatura alta, recurrir a las razas ubicadas en los grupos 1 y 3 (Figura 1 y Cuadro 3).

Es de interés señalar, que de acuerdo con Ruiz *et al.* (2008), la raza Tuxpeño es la de mayor adaptabilidad agroclimática, ya que es capaz de desarrollar en 19 de 28 ambientes climáticos del país. Sin embargo, en este estudio, Tuxpeño no resultó una de las razas con mayor tolerancia a altas temperaturas y déficits de humedad; lo cual puede deberse que la estimación de los parámetros agroclimáticos por raza se hizo con base en el valor promedio de accesiones y no con los valores mínimos y máximos.

Por lo tanto, podría suponerse que si el análisis se hiciera por accesiones individuales, Tuxpeño podría ser clasificada como una raza potencialmente útil en la generación de genotipos con adaptación a altas temperaturas y déficits de humedad. En esta investigación no se consideraron los valores mínimos y máximos de las accesiones, para evitar los sesgos que ocasionan el considerar accesiones colectadas en zonas de riego, en donde el maíz de temporal puede ser erróneamente reportado produciendo con precipitaciones extremadamente bajas (Ruiz *et al.*, 2008).

La producción de maíz en México frente al fenómeno del cambio climático, es un problema complejo que requiere abordarse en forma integral por los problemas sociales tan fuertes que puede generar; hasta aquí la contribución de este estudio fue identificar grupos de razas de maíz, como fuentes potenciales de alelos útiles en función de su respuesta agroclimática. Posteriormente, habrá que caracterizar las accesiones de las razas de interés en función de la respuesta a las tensiones ambientales, sus características morfológicas (fenotipeado) y su genoma (genotipeado); con el objeto de identificar, aislar y transferir los genes de interés a líneas élite que integran patrones heteróticos reconocidos por su calidad agronómica y alto potencial de rendimiento.

Además, la presente investigación, tendrían que complementarse con estudios fisiológicos de conductancia estomática, fotosíntesis, eficiencia en el uso del agua, temperatura óptima de fotosíntesis, temperaturas cardinales de crecimiento y desarrollo, respiración nocturna y fotorrespiración (Hatfield *et al.*, 2011), para conocer el efecto de los genes sobre la fisiología de las plantas tolerantes a factores limitantes del ambiente.

Based on the constraints that the climate change will impose (high temperature and low rainfall), in maize-producing areas of Mexico and, the response to temperature and precipitation of the four racial groups defined; only Chapalote, Tuxpeño Norteño and Blando de Sonora races, of the group 3, are adapted to thrive in conditions of high temperatures and low rainfall; so it is concluded that, in these races is where the genes that would contribute to the formation of new improved maize varieties with resistance to high temperatures and water deficit could be detected. However, there will be times when only moisture represents environmental restriction and, then races of groups 3 and 4 could be used, which are distinguished by adapting to conditions of water deficit; and if the restriction consists in high temperature, the races in group 1 and 3 could be used (Figure 1 and Table 3).

It is interesting to note that, according to Ruiz *et al.* (2008), the Tuxpeño race is the one with more agroclimatic adaptability since it is able to develop in 19 out of 28 climatic zones of the country. However, in this study, Tuxpeño was not one of the races with the greatest tolerance to high temperatures and moisture deficits; which may be due to the estimation of agroclimatic parameters by race that was based on the average value of the accessions and, not with the minimum and maximum values.

Therefore, it might be assumed that, if the analysis is done by individual accessions, the Tuxpeño could be classified as a race potentially useful in generating genotypes with adaptation to high temperatures and moisture deficits. In this research, we did not consider the minimum and maximum values of the accessions, to avoid biases that would lead to consider the accessions collected in irrigated areas, where the seasonal corn may be incorrectly reported resulting in extremely low rainfall (Ruiz *et al.*, 2008).

Therefore, it might be assumed that if the analysis were done by individual accessions, Tuxpeño may be classified as a potentially useful race in generating genotypes with adaptation to high temperatures and moisture deficits. In this paper, minimum and maximum values of the accessions were not considered, in order to avoid biases caused by considering accessions collected in irrigated areas, where rainfed maize may be incorrectly reported as producing with extremely low rainfall (Ruiz *et al.*, 2008).

The maize production in Mexico, facing the climate change phenomenon is a complex problem that requires to be comprehensively addressed because of the social problems

CONCLUSIONES

Existe variación inter-racial en los rangos térmicos y pluviales de adaptación estudiados en las razas mexicanas de maíz, que podrían aprovecharse como fuentes de alelos para la adaptación al cambio climático.

Se identificó un grupo racial de maíz que se desarrolla en ambientes con altas temperaturas y humedad deficiente, integrado por las razas Chapalote, Blando de Sonora, Tuxpeño Norteño, Onaveño, Ratón, Dulcillo del Noroeste, Dzit Bacal y Elotero de Sinaloa, sobresaliendo las razas Chapalote y Blando de Sonora por soportar la combinación más extrema de estas condiciones ambientales adversas.

Se identificaron razas de maíz que sólo tienen buena respuesta al déficit hídrico (grupos 3 y 4), o a las altas temperaturas (grupos 1 y 3), que podrían usarse en el mejoramiento genético del maíz dependiendo del factor restrictivo que imponga el ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Ecología (INE) y Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); por el apoyo financiero y las facilidades brindadas en la realización de esta investigación, dentro del marco de los proyectos “PRECI 3057110AF: evaluación de la vulnerabilidad y propuesta de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático”, y “PRECI 1527703M: cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal en México”.

LITERATURA CITADA

Baradas, M. W. 1994. Crop requirements of tropical crops. *In: handbook of agricultural meteorology*. J. F. Griffiths Editor. Oxford Univ. Press. New York. 189-202 pp.

that it can generate; so far, the contribution of this paper was to identify the groups of maize races, as potential sources of useful alleles according to their agro-climatic response. Subsequently, the accessions of the races of interest must be characterized based on their response to the environmental stresses, their morphological characteristics (phenotype) and its genome (genotype); aiming to identify, isolating and transferring the genes of interest to elite lines comprising heterotic patterns known for their agronomic quality and high yield potential.

In addition, this paper would have to be complemented with physiological studies of stomatal conductance, photosynthesis, efficiency of water use, optimum temperature of photosynthesis, cardinal temperatures for growth and development, night respiration and photorespiration (Hatfield *et al.*, 2011), in order to know the effect of genes on the physiology of plants tolerant to environmental limiting factors.

CONCLUSIONS

There is inter-racial variation in the thermal ranges and rainwater of adaptation studied in the Mexican races of maize, which could be used as sources of alleles for adaptation to climate change.

A racial group of maize that develops in environments with high temperatures and low humidity was identified, composed of Chapalote, Blando de Sonora, Tuxpeño Norteño, Onaveño, Ratón, Dulcillo del Noroeste, Dzit Bacal and Elotero de Sinaloa, excelling Chapalote and Blando de Sonora races because they handle the most extreme combination of these adverse environmental conditions.

The maize races with only a good response to water deficit were identified (groups 3 and 4), or only to high temperatures (groups 1 and 3), which could be used in genetic improvement of maize depending on the limiting factor imposed by the environment.

End of the English version



- Contreras, M. R.; Luna, V. I. y Ríos, M. C. A. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*. 183: 421-433.
- Doebley, J. F. 2004. The genetics of maize evolution. *Annual Review of Genetics*. 38:37-59.
- Eastman, J. R. 2006. IDRISI version 15.1. IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing Vol. 1. Clark Labs-Clark University. Worcester, Mass. USA. 328 p.
- Ferguson, M. E.; Jarvis, A.; Stalker, H. T.; Williams, D. E.; Guarino, L.; Valls, J. F. M.; Pittman, R. N.; Simpson, C. E. and Bramel, P. 2005. Biogeography of wild *Arachis* (Leguminosae): distribution and environmental characterization. *Biodiversity and Conservation*. 14:1777-1798.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros. Núm. 6. México. 92 p.
- Hernández, L. A. y Carballo, A. 1984. Caracterización de genotipos de maíz de valles altos por sus requerimientos de unidades calor. *Revista Chapingo*. 44:42-48.
- Hatfield, J. L.; Boote, K. J.; Kimball, B. A.; Ziska, L. H.; Izaurrealde, R. C.; Ort, D.; Thomson, A. M. and Wolfe, D. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agron. J.* 103:351-370.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2011. Informe final de Proyecto CONABIO "Conocimiento de la diversidad y situación actual de los maíces nativos y sus parientes silvestres en México". D. F., México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B.; Davidson, O.; Bosch, P.; Dave, R. and Meyer, L. (eds). Cambridge University Press, UK. and USA. 851 p.
- Jarvis, A.; Ferguson, M. E.; Williams, D. E.; Guarino, L.; Jones, P. G.; Stalker, H. T.; Valls, J. F. M.; Pittman, R. N.; Simpson, C. E. and Bramel, P. 2003. Biogeography of wild *Arachis*: assessing conservation status and setting future priorities. *Crop Sci.* 43:1108-1110.
- Linhart, Y. B. and Grant, M. C. 1996. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 27:237-277.
- Lobo, B. M.; Torres, C. C. M.; Fonseca, J. R.; Martins, P. de M. R. A.; de Belem, N. A. R. and Abadie, T. 2003. Characterization of germplasm according to environmental conditions at the collecting site using GIS: Two case studies from Brazil. *Plant. Genet. Resour. Newsl.* 135:1-11.
- Magaña, V. y Caetano, E. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la república mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Informe final del proyecto de investigación. Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM-Instituto Nacional de Ecología (INE). Documento no publicado. D. F., México. 41 p.
- Matsuoka, Y.; Vigouroux, Y.; Goodman, M. M.; Sanchez, G. J. J.; Buckler, E. and Doebley, J. 2002. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99:6080-6084.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. and Martínez, P. R. A. 1998. Los climas de México: una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro técnico. Núm. 1. INIFAP-CIRPAC. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: perspective framework and priorities. FAO Interdepartmental Working Group on Climate Change. Rome, Italy. 24 p.
- Proyecto Latinoamericano de Evaluación de Maíz (LAMP). 1991. Catálogo del germoplasma de maíz. Tomo I y II. Proyecto Latinoamericano de Maíz. USDA-ARS.
- Ruiz, C. J. A.; Durán, P. N.; Sánchez, G. J. J.; Ron, P. J.; González, E. D. R.; Medina, G. G. and Holland, J. B. 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 maize races. *Crop Sci.* 48:1502-1512.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Manríquez, O. J. D. y Ramírez, D. J. L. 2010. Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. Informe final proyecto INIFAP-INE. Guadalajara, Jalisco, México. 108 p.

- Russelle, M. P.; Wilhelm, W. W.; Olson, R. A. and Power, J. F. 1984. Growth analysis based on degree days. *Crop Sci.* 24:28-32.
- Sánchez, G. J. J. and Goodman, M. M. 1992. Relationships among Mexican and some North American and South American races of maize. *Maydica.* 37:41-51.
- Singh, P. M.; Gilley, J. R. and Splinter, W. E. 1976. Temperature thresholds for corn growth in a controlled environment. *Transactions of the ASAE.* 19(6):1152-1155.
- Smith, P. J.; Bootsma, A. and Gates, A. D. 1982. Heat units in relation to corn maturity in the Atlantic region of Canada. *Agric. Meteorol.* 26:201-213.
- StatSoft, Inc. 2004. STATISTICA (data analysis software system), version 7. URL: <http://www.statsoft.com>.
- Williams, M. A. J. and Balling Jr., R. C. 1996. Interactions of desertification and climate. Arnold. London. 270 p.
- Wishart, D. 2006. Clustan graphics primer: a guide to cluster analysis. Clustan Limited, Edinburgh. 67 p.