



ECOTIPOS DE MAÍZ DEL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO Y SU RELACIÓN CON UN ÍNDICE DE ARIDEZ

ECOTYPES OF MAIZE FROM THE STATE OF PUEBLA, MEXICO AND THEIR RELATION TO AN INDEX OF ARIDITY

Coyolcaltzin Chávez-Cuache¹, M. Humberto Reyes-Valdés¹, Mario Ernesto Vázquez-Badillo¹, José Luis Herrera-Ayala¹, Juan Manuel Pichardo-González², Martín Quintana-Camargo² y Adriana Antonio-Bautista^{1*}

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia (adis_anba@hotmail.com)

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) prospera tanto en condiciones tropicales como subtropicales, incluso en entornos con escasez de agua. En México, la producción de maíz se realiza principalmente bajo condiciones de temporal, especialmente en zonas áridas. El objetivo de esta investigación fue identificar ecotipos con mejor adaptación a condiciones de calor y estrés hídrico, mediante el análisis de la correlación entre características morfológicas y de razas con el índice global de aridez (IGA). Se analizaron 161 muestras de 28 grupos de maíz. Los ecotipos fueron recolectados entre 2008 y 2011 en 137 comunidades de 38 municipios del estado de Puebla, México dentro de las actividades del "Proyecto Maestro de Maíces Mexicanos". Los datos fueron depurados verificando la consistencia de las variables morfológicas y climáticas, eliminando registros incompletos, duplicados o con errores de georreferenciación. Con la información validada se crearon mapas temáticos que muestran la distribución geográfica de los ecotipos y de los valores del IGA, generados con el lenguaje de programación R. El IGA se obtuvo de la plataforma del CGIAR y permitió identificar los sitios áridos de cada estado. La mayor parte de los sitios de colecta exhibieron valores de 0.2 a 0.7 y se clasificaron como zonas áridas a húmedas, según la escala del IGA. El 3 % de los ecotipos se ubicó en zonas áridas, mientras que el 12 % se ubicó en zonas húmedas. Se encontró una asociación positiva ($r = 0.23-0.61$; $P \leq 0.05$) de los caracteres fenológicos, vegetativos y de mazorca con el IGA indicando una asociación moderada entre la variación morfológica y las condiciones de aridez. Los ecotipos pertenecientes a las razas Chalqueño, Olotillo, Ancho y Pepitilla mostraron una mejor adaptación a climas áridos y condiciones de estrés hídrico. Estas colectas podrían utilizarse como base de germoplasma en programas de mejoramiento genético para el desarrollo de materiales de maíz con tolerancia al calor y estrés hídrico.

Palabras clave: Adaptación, aridez, maíz, Puebla.

SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) thrives in both tropical and subtropical conditions, even in environments with limited water availability. In Mexico, maize production is primarily carried out under rainfed conditions, particularly in arid regions. The objective of this research was to identify ecotypes with better adaptation to heat and water stress by analyzing the correlation between morphological and racial characteristics with the global aridity index (GAI). One hundred sixty one samples from 28 maize racial groups were analyzed. The ecotypes were collected between 2008 and 2011 in 137 communities of 38 municipalities of the state of Puebla, Mexico as part of the "Master Project of Mexican Maize".

Data were filtered by verifying the consistency of morphological and climatic variables, removing incomplete records, duplicates, or with georeferencing errors. With the validated information, thematic maps were generated to display geographic distribution of the ecotypes and GAI values, developed with the R programming language. The GAI was obtained from the CGIAR platform and allowed the identification of arid sites in each state. Most of the collection sites exhibited values between 0.2 and 0.7 and were classified as arid to humid areas according to the GAI scale. Three percent of the ecotypes were located in arid areas, while 12 % were located in humid areas. A positive association ($r = 0.23-0.61$; $P \leq 0.05$) between phenological, vegetative, and ear traits with the GAI was found, indicating a moderate association between morphological variation and aridity conditions. Ecotypes belonging to the races Chalqueño, Olotillo, Ancho and Pepitilla showed better adaptation to arid climates and water stress conditions. These accessions could be used as base germplasm for breeding programs aimed at developing heat- and drought-tolerant maize.

Index words: Adaptation, aridity, maize, Puebla.

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los principales cultivos a nivel global, tanto por su volumen de producción como por su relevancia en la alimentación humana, ya sea de forma directa o indirecta (Ranum *et al.*, 2014). Presenta una amplia diversidad genética derivada de su tipo de polinización, las prácticas de manejo y selección realizadas por los agricultores, el uso de variedades externas incorporadas a los cultivos y las diversas condiciones ambientales en las que crecen (CONABIO, 2022).

La agricultura de temporal depende principalmente de la precipitación, lo que limita el crecimiento y desarrollo de las plantas. La variabilidad temporal y espacial de la lluvia dificulta estimar la disponibilidad de humedad en el suelo, factor clave para el desarrollo del cultivo en una región determinada (Jans *et al.*, 2021). Esta inestabilidad climática y los cambios asociados representan una seria amenaza para la seguridad alimentaria mundial, comprometiendo tanto la productividad como la sostenibilidad de los cultivos (Estrada *et al.*, 2022).

El cambio climático, entendido como la modificación a largo plazo de los patrones climáticos típicos o promedio de una región (Santos y Bakhshoodeh, 2021), se ha intensificado debido a las actividades antropogénicas como la industrialización, la deforestación, el uso de combustibles fósiles y la agricultura intensiva. Estas actividades han provocado un aumento progresivo en la temperatura media global y variaciones en el régimen de lluvia, generando impactos directos en los sistemas agrícolas (Abbass *et al.*, 2022).

En México, el maíz se cultiva desde el nivel del mar hasta altitudes de 3000 msnm, mostrando una notable capacidad de adaptación a temperaturas extremas y precipitaciones irregulares (Orozco-Ramírez *et al.*, 2017). Recientemente, se ha identificado una irregularidad en la temperatura media anual del país, con un aumento de 1.31 °C desde 1910 hasta 2021 (PINCC, 2023). Una estrategia clave para enfrentar estos desafíos consiste en aprovechar la diversidad genética presente en variedades nativas y accesiones silvestres de maíz, las cuales pueden contener rasgos asociados con tolerancia al calor y la sequía (Nelimor *et al.*, 2019).

Las razas de maíz nativo suelen adaptarse a condiciones locales, incluso en entornos desfavorables como la sequía, y aportan una diversidad genética valiosa relacionada con adaptaciones a estrés ambiental (Ruiz *et al.*, 2013). Los maíces nativos constituyen un recurso genético de alto valor debido a su aporte a la diversidad genética global, sirviendo como fuente de genes clave para el desarrollo de variedades con mayor tolerancia a condiciones extremas (González-Diéguez y Orozco-Castillo, 2020).

La aridez se define generalmente como una función que integra precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia (ET_0) (Zomer *et al.*, 2022). La sequía, por su parte, corresponde a un período prolongado de escasas precipitaciones que provoca que los recursos hídricos disponibles en embalses, ríos, acuíferos y fuentes externas no sean suficientes para satisfacer las necesidades de los usuarios en una cuenca. Sus efectos trascienden al sector agropecuario, impactando también al abastecimiento urbano, la salud pública, la energía, los servicios ecosistémicos y la estabilidad sociopolítica. Los estudios de sequía ya no suelen enfocarse sólo en aspectos meteorológicos o hidrológicos, sino que integran dimensiones sociales (De Angeli *et al.*, 2025). El uso de índices de aridez permite comparaciones espaciales y temporales; además, proporciona una línea de base importante para medir y anticipar los impactos del cambio climático permitiendo con ello clasificar o caracterizar plantas que se producen bajo estas condiciones. Para evaluar dichas condiciones climáticas se utilizan

índices como el índice global de aridez (IGA), el cual calcula la relación entre la precipitación media anual y la evapotranspiración. La base de datos del IGA ha sido desarrollada mediante la implementación geoespacial de la ecuación FAO-56 de Penman-Monteith utilizando datos climáticos de alta resolución espacial (Zomer *et al.*, 2022).

El objetivo del presente estudio fue identificar ecotipos de maíz con adaptación a condiciones de calor y estrés hídrico, mediante el análisis de la correlación entre características morfológicas y de razas con el índice global de aridez (IGA).

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético utilizado

El material genético estudiado consistió en 161 ecotipos pertenecientes a 28 grupos de maíz, recolectados entre los años 2008 y 2011 en 137 comunidades de 38 municipios del estado de Puebla, México como parte del Proyecto Maestro de Maíces Mexicanos (PMMM) (Figura 1).

La clasificación de los ecotipos en los grupos se realizó siguiendo los criterios propuestos por el PMMM, con base en descriptores morfológicos estandarizados principalmente de mazorca, grano y caracteres vegetativos, en concordancia con el sistema de clasificación (CONABIO, 2022; Sánchez *et al.*, 2000)

Este PMMM, implementado en 2008, tuvo como objetivo la conservación de la diversidad de maíces nativos mediante la colecta de germoplasma. El material se resguardó en un banco de germoplasma establecido en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y se reconoció a los productores como custodios de sus variedades (González y Massieu, 2009). De cada ecotipo se incluyó información sobre la localización geográfica del sitio de colecta, así como de 17 caracteres cualitativos y 54 cuantitativos. Los datos de los ecotipos se midieron *in situ* e incluyeron caracteres vegetativos, fenológicos y de mazorca (Cuadro 1). Estos registros fueron tomados del acervo documental del PMMM y sistematizados en una base de datos.

Para cada ecotipo se creó una hoja de pasaporte, en la cual se registraron datos básicos de identificación y origen, como el código de colecta, año de muestreo, localidad, municipio, altitud y coordenadas geográficas, además de los caracteres cualitativos y cuantitativos. Se consideraron como variables cuantitativas la altitud (msnm), coordenadas geográficas (latitud y longitud en grados decimales), precipitación media anual (mm), temperatura media anual (°C) y valor del IGA.

Cuadro 1. Lista de caracteres y sus abreviaturas.

Carácter	Abreviatura	Carácter	Abreviatura
Acame (%) raíz	AcR	Índice de inserción de la mazorca (%)	IndIM
Acame (%) tallo	AcT	Índice de prolificidad (%)	IP
Ahijamiento (%)	Ahij	Índice de venación	IndV
Altura de la mazorca principal (cm)	AMP	Lígula foliar	LF
Altura de planta a la hoja bandera (cm)	APHB	Longitud de la espiga (cm)	LE
Ancho del grano (mm)	Agr	Longitud de la mazorca (cm)	LM
Ancho máximo de hoja (cm)	AMH	Longitud del grano (mm)	LGr
Área foliar de la hoja bandera (cm ²)	AFHB	Longitud del pedúnculo (cm)	LP
Área foliar hoja de mazorca principal (cm ²)	AFHMP	Longitud del pedúnculo de la mazorca (cm)	LPM
Área foliar por planta (cm ²)	AFP	Longitud máxima de hoja (cm)	LMH
Brácteas de la cubierta (totomoxtle)	BC	Mala cobertura maíz (%)	MalaCobMaz
Calificación (1-5) mazorca	CalifMaz	Mazorcas podridas (%)	MazPod
Calificación (1-5) planta	CalifPta	Mazorcas estudiadas	ME
Color de anteras	CoLA	Mazorcas incipientes sobre el pedúnculo	MI
Color de estigmas	CoE	Notas	Nota
Color de la planta	CoLP	Número de granos por hilera	NumGrHil
Color del endospermo	ClrEndos	Número de hileras	NumHil
Color del grano	ClrGr	Orientación de las hojas	OrH
Color del olote	CO	Peso de 100 granos (g)	PCienGr
Dens. de Pob. (plantas ha ⁻¹)	DensPobPtsha	Peso de grano al 10 % de humedad (g)	PGH
Desgrane (%)	Desg	Peso de mazorca al 10 % de humedad (g)	PMH
Diámetro del centro de la mazorca (cm)	DCM	Plantas estudiadas	PltEst
Diámetro del olote (cm)	DO	Pubescencia de la vaina foliar	PVF
Diámetro del tallo (cm)	DT	Ramificaciones primarias	RP
Días a floración femenina	DFF	Ramificaciones secundarias	RS
Días a floración masculina	DFM	Ramificaciones terciarias	RT
Disposición de hileras de granos	DHG	Relación peso/volumen grano (g cm ⁻³)	RelPV
Espigas estudiadas	EE	Rend. (t ha ⁻¹) 15 % Hum. Grano	RendTonHumGr
Estrés biológico	EstrBiol	Rend. (t ha ⁻¹) 15 % Hum. Mazorca	RendTonHumMzca
Estrés físico	EstrFis		
Forma de la superficie del grano	FSupGr	Rend. (t ha ⁻¹) 15 % Hum. Olote	RendTonHumOlote
Forma de la mazorca	FMA	Asincronía floral (días)	AF
<i>Fusarium</i> spp. (%) mazorca	FusariumMaz		
<i>Fusarium</i> spp. (%) planta	FusariumPta		
Grosor de grano (mm)	GGr	Tipo de grano	TpoGr
Hojas durante el llenado de grano	HLG	Volumen de 100 granos (cm ³)	VCienGr
Hojas sobre la mazorca principal	HMP	Volumen radicular (cm ³)	VR

Distribución de los ecotipos

Los mapas de distribución geográfica de los ecotipos de maíz, tanto en el estado de Puebla como a nivel nacional, fueron generados con el lenguaje R (R Core Team, 2020) con base en las coordenadas geográficas de cada colecta. También, en los mapas se clasificaron las áreas según su IGA para visualizar las zonas con diferentes niveles de aridez. Estos mapas se emplearon para ilustrar la localización espacial de los ecotipos y su relación con las características climáticas y de aridez, proporcionando una visión clara de los patrones geográficos en función del IGA.

Clasificación de los grupos raciales de maíz

Cada grupo representa un conjunto de colectas con afinidades fenológicas y origen geográfico común, lo que permitió analizar las diferencias en su distribución y su relación con el IGA. Para la formación de los grupos raciales se revisó la base de datos del PMMM, en la cual cada colecta fue previamente clasificada mediante la comparación morfológica con materiales de referencia descritos para las razas mexicanas de maíz. Esta clasificación consideró la similitud fenotípica observada en los caracteres vegetativos (altura de planta, forma y disposición de las hojas), florales (días a floración masculina y femenina) y de mazorca (longitud, diámetro, forma y tipo de grano). Los ecotipos que compartieron este conjunto de características se agruparon bajo una misma raza, de modo que cada grupo representa un linaje morfológicamente coherente y geográficamente definido.

Análisis de datos

Los datos obtenidos (17 caracteres cualitativos y 54 cuantitativos) fueron analizados con el uso de técnicas exploratorias, descriptivas y de inferencia estadística para identificar patrones de variación asociados con el IGA. Se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar, amplitud) para describir el comportamiento de las variables morfológicas y fenológicas.

Se realizó un análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad de los datos y determinar las combinaciones lineales de variables que explican la mayor proporción de las variables entre los ecotipos. Para este análisis se incluyeron únicamente las variables cuantitativas estandarizadas correspondientes a caracteres morfológicos y fenológicos de la planta y mazorca, tales como APHB, AMP, DFM, DFF, LM, DCM, NumGrsHil, NumHil, AFP. Este análisis permitió identificar

los caracteres con mayor contribución a la diferenciación de las colectas en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2), lo cual asoció la variación de las colectas con el IGA.

Para evaluar las relaciones entre las variables morfológicas y el IGA se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Los valores de p obtenidos se ajustaron mediante el método de tasa de falsos descubrimientos (FDR, False Discovery Rate) (Glickman *et al.*, 2014), para controlar el error por comparaciones múltiples.

Se construyeron diagramas de dispersión para observar la asociación entre los diferentes caracteres morfológicos, fisiológicos y rendimiento con el IGA en las distintas zonas de colecta. Para estimar el valor medio de aridez asociado a cada grupo racial se emplearon modelos lineales mixtos, considerando el IGA como variable dependiente y la raza de maíz como efecto aleatorio. Las estimaciones se obtuvieron mediante la metodología BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) descrita por Bernardo (1996), que permite realizar predicciones insesgadas ajustando la variabilidad del número de ecotipos por grupo. Con base en estos resultados, se identificaron las razas con mayor asociación a condiciones áridas o húmedas, definiendo como tolerantes a sequía aquellos grupos que presentaron valores promedio de aridez más elevados con intervalos de confianza del 95 %.

Los análisis estadísticos se realizaron en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2020). Se emplearon diversos paquetes estadísticos, como ggplot2 para los diagramas de dispersión, Stats para el análisis de correlaciones, y lme4 para los modelos lineales mixtos. La integración de estos paquetes permitió un análisis amplio de los caracteres de los ecotipos y su relación con el IGA y una visualización detallada de los patrones en los datos, facilitando la interpretación de los resultados. Finalmente, con base en la predicción del modelo mixto del IGA se hizo una selección de los ecotipos con mayor asociación a condiciones de aridez.

Para evaluar la significancia de los efectos aleatorios incluidos en los modelos lineales mixtos se planteó la hipótesis nula de que la varianza atribuida al efecto de raza de maíz es igual a cero ($H_0: \sigma^2 = 0$), frente a la hipótesis alterna de que existe variabilidad significativa entre razas ($H_1: \sigma^2 > 0$). La comparación se efectuó utilizando la función anova del paquete lme4 (Bates *et al.*, 2015). Un valor de $P \leq 0.05$ se consideró evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que existe variabilidad significativa entre razas en los valores del IGA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice de aridez de los sitios de procedencia

En la Figura 2 se muestran los mapas de México y del estado de Puebla, coloreados y clasificados de acuerdo con el IGA. En el mapa de Puebla se marcan los lugares de colecta. Los diferentes colores del mapa representan distintos niveles de aridez, con una escala de 0 (zonas más áridas) a 3.0 (zonas más húmedas) (Figura 2). El valor promedio de aridez en las zonas de colecta fue de 0.48, lo cual corresponde a condiciones semiáridas (Zomer *et al.*, 2022). El rango de aridez en los sitios varió de 0.18 a 1.21; es decir, de zonas áridas a húmedas. La mayor parte de los sitios resultó con valores entre 0.2 y 0.7, con mayor concentración en zonas semiáridas y secas subhúmedas. El 3 % de los ecotipos se ubicó en sitios con un IGA menor de 0.2, clasificados como áridos. Por otro lado, el 12 % de los ecotipos se ubicó en zonas clasificadas como húmedas (IGA > 0.65). Los ecotipos con mayor representación se encontraron en regiones de aridez intermedia, donde las precipitaciones son escasas. Los mapas de distribución permitieron visualizar la relación de las colectas con el IGA, mostrando una amplia variación de condiciones, desde zonas áridas hasta húmedas; sin embargo, la distribución del maíz no depende únicamente de la aridez; según lo señalado por Ruiz *et al.* (2008) y Gao *et al.* (2021), también influyen otras variables ambientales como la temperatura, la precipitación, la textura del suelo, el pH y la altitud.

Análisis de componentes principales con los datos de pasaporte

En la Figura 3 se muestra la distribución de los valores de los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) en relación con el IGA. El PC1 explicó el 21.1 % de la varianza total y se asoció principalmente con 10 variables (RS, NumGrsHil, BC, RP, HMP, LMH, AFP, HLG, RT). Estas variables son de características relacionadas con el rendimiento y estructura de la mazorca; además, se observó en la Figura 3 una tendencia de los ecotipos de zonas más áridas a ubicarse hacia los valores menores del PC1. Esto puede deberse a que los ecotipos asociados con ambientes más secos podrían ser el resultado de selección hacia características de mejor tolerancia al estrés hídrico. El PC2 explicó el 19.6 % de la varianza total y se asoció con seis variables (NumHil, LGr, LPM, LM, PCienGr, MI); este componente mostró una relación más clara con el IGA. En conjunto, los dos primeros componentes explicaron el 40.7 % de la variabilidad total; aunque este valor no representa una proporción elevada, el análisis de componentes principales tuvo un propósito exploratorio, orientado a visualizar patrones de agrupamiento y la relación entre los caracteres morfológicos y el IGA. Como resultado, se

seleccionaron 17 caracteres con las correlaciones más altas y estadísticamente significativas con el IGA. Para análisis gráfico y exploratorio se seleccionaron caracteres fisiológicos como DFM, DFF; caracteres vegetativos como APHB, AMP, HLG, HMP, LMH, AMH, AFHB, AFHMP, AFP, IndV y FT; así como caracteres de la mazorca como BC, LM, NumHil y DO.

Desde el punto de vista del mejoramiento genético, la asociación entre ciertos caracteres y la capacidad de los ecotipos de maíz para desarrollarse en condiciones de aridez sugiere su potencial uso en programas de selección de variedades adaptadas a ambientes con baja disponibilidad hídrica (Shojaei *et al.*, 2022).

Análisis gráfico de la asociación de caracteres con aridez

La Figura 4 muestra la matriz de diagramas de dispersión entre el IGA y diferentes caracteres agronómicos que presentaron correlaciones altas y significativas ($P \leq 0.05$); en particular, el IGA se asoció significativamente con los caracteres floración masculina, floración femenina, número de hileras por mazorca y rendimiento estimado de grano.

El IGA correlacionó con los caracteres agronómicos DFM ($r = 0.24$, $P = 0.005$, $FDR = 0.018$) y DFF ($r = 0.23$, $P = 0.006$, $FDR = 0.019$). Lo anterior indica que las colectas más precoces tendieron a localizarse en zonas más áridas, lo que muestra dos escenarios posibles: 1) que los materiales fueron seleccionados históricamente con una precocidad que les permite escapar de los periodos de sequía, o 2) por la falta de humedad que induce una floración más temprana. De acuerdo con Farré y Faci (2009), la floración es una de las etapas más sensible al déficit hídrico, y puede influir en la reducción de la biomasa, el rendimiento y el índice de cosecha. Se observó un comportamiento similar para el carácter vegetativo AFP, donde se identificó una correlación lineal positiva con el IGA ($r = 0.42$, $P = 2.10 \times 10^{-7}$, $FDR = 1.71 \times 10^{-6}$). Los valores más altos de área foliar se concentraron en zonas más húmedas, lo cual era de esperarse, ya que en condiciones húmedas las plantas tienden a desarrollar más sus partes vegetativas. Este mismo patrón también fue evidente en los caracteres vegetativos AFHMP ($r = 0.58$, $P = 4.0 \times 10^{-14}$, $FDR = 9.8 \times 10^{-13}$) y LMH ($r = 0.52$, $P = 7.1 \times 10^{-11}$, $FDR = 1.16 \times 10^{-9}$), donde se observó una correlación lineal alta, lo que indica que en ambientes más húmedos el desarrollo vegetativo de la planta, follaje y estructuras asociadas se ve favorecido.

Para el carácter AFHB se observó también una correlación positiva pero baja ($r = 0.29$, $P = 0.00064$, FDR

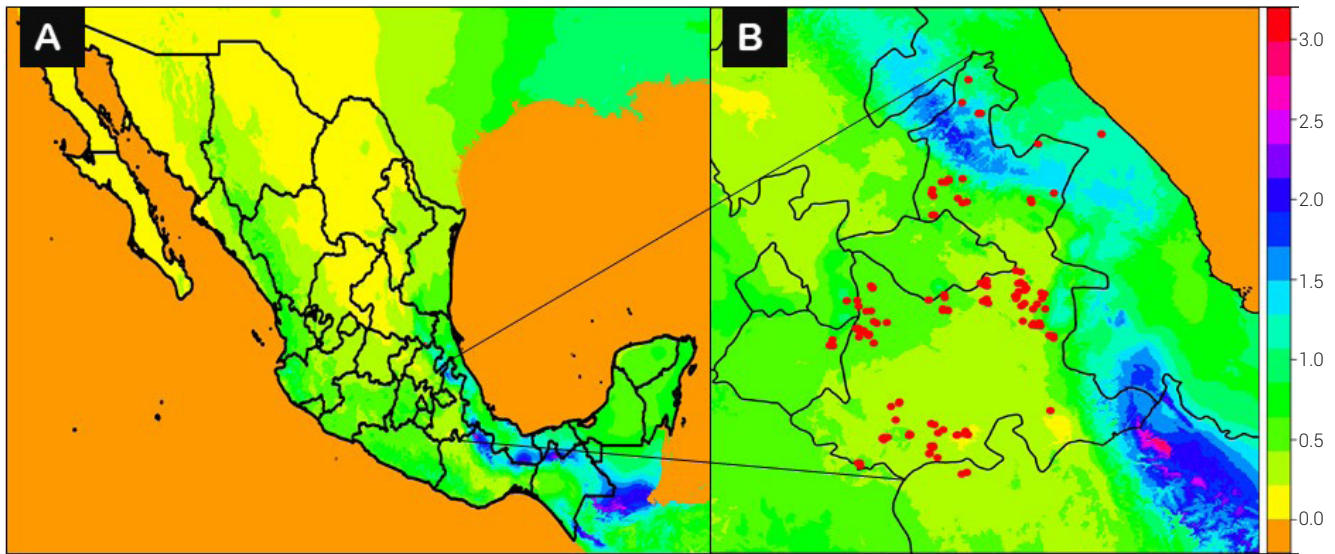


Figura 2. A) Distribución de la aridez (IGA) en la República Mexicana, B) distribución de la aridez y puntos de colecta de las 161 accesiones de maíz en el estado de Puebla, México.

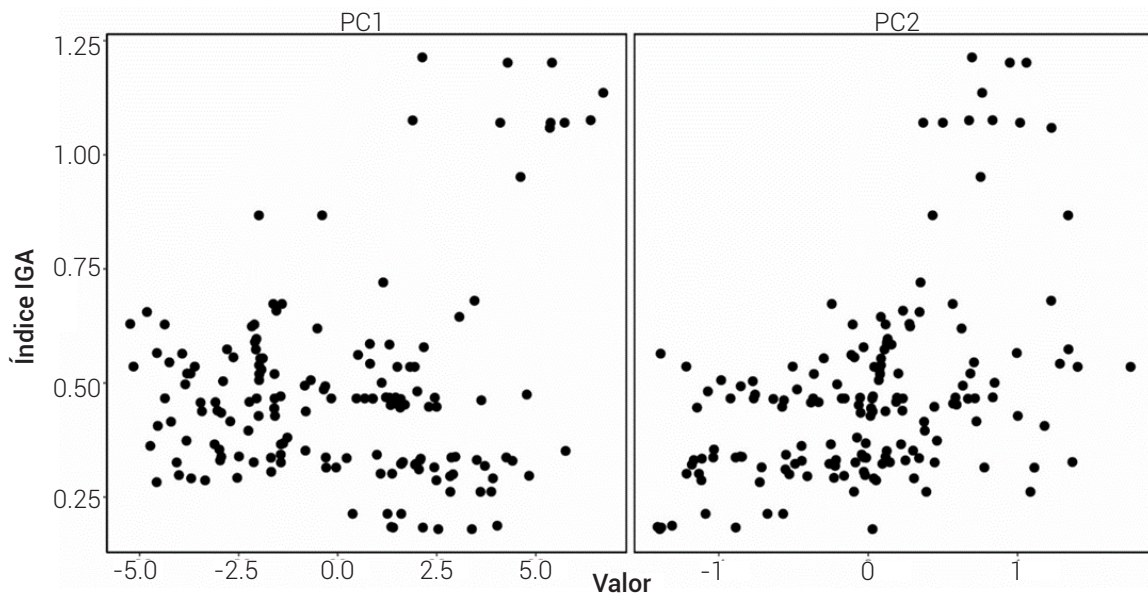


Figura 3. Distribución de los ecotipos en el espacio de los dos primeros componentes principales con respecto al índice global de aridez.

= 0.0031). Este comportamiento podría estar relacionado con la variabilidad genética de cada colecta y con factores ambientales, como la disponibilidad de nutrientes en el suelo; aunque la humedad generalmente favorece el desarrollo vegetativo, el área foliar puede estar sujeta a otros factores, lo que provoca la dispersión observada. Un comportamiento muy similar se presentó para AMH ($r = 0.48$, $P = 1.3 \times 10^{-9}$, $FDR = 1.62 \times 10^{-8}$), lo que sugiere que aunque la humedad es un factor importante, la variabilidad

genética y las condiciones del suelo juegan un papel muy notorio en el desarrollo de estos caracteres. Para AMP se observó una correlación positiva baja ($r = 0.25$, $P = 0.0054$, $FDR = 0.0177$). Los valores más altos de AMP se observaron en zonas más húmedas, ya que en ambientes con mayor disponibilidad de agua las plantas alcanzan un mayor crecimiento, debido a que la humedad favorece los procesos biológicos de la planta, como la fotosíntesis y la acumulación de biomasa, permitiendo que ahí las plantas

se desarrollen más con respecto a otras con menor disponibilidad de agua.

El carácter HMP podría estar relacionado con la diversidad genética entre grupos de maíz, ya que estas colectas agrupadas por raza corresponden a diferentes orígenes. Se ha propuesto que en zonas más áridas, las plantas pueden desarrollar un mayor número de hojas para proteger la mazorca y mejorar la captura de luz solar, lo cual es esencial para la fotosíntesis y la producción de biomasa (Castilla, 2005), además de que la selección natural o humana, junto con la presión ambiental, también pudo haber influido en el desarrollo de este carácter como un mecanismo de adaptación.

Por otro lado, en IndV se observó una correlación negativa ($r = -0.30$, $P = 0.00026$, $FDR = 0.0019$), donde las plantas en zonas más áridas mostraron un mayor valor de IndV. La mayor densidad de venas en las hojas podría estar relacionada con la necesidad de optimizar la distribución de agua y nutrientes en condiciones de estrés hídrico. En áreas más húmedas, las plantas tienden a tener un menor IndV, ya que no requieren una distribución tan eficiente de los recursos hídricos.

En el carácter DO se observó una relación negativa ($r = -0.27$, $P = 0.0011$, $FDR = 0.0049$) con las condiciones de aridez. La proporción del olote es mayor en zonas secas debido a un menor llenado de grano. Esto ocurre porque en condiciones de aridez, la falta de agua durante el llenado de grano limita el desarrollo de los granos, lo que aumenta el tamaño del olote (Pandey *et al.*, 2000).

En el carácter de RT se observó una correlación positiva alta ($r = 0.61$, $P = 1.15 \times 10^{-15}$, $FDR = 5.62 \times 10^{-14}$). La mayor parte de las colectas con alta RT se encuentran en zonas más húmedas, aunque también se registraron valores altos en áreas de humedad intermedia. Este comportamiento es señal de que, en ambientes con mayor disponibilidad de agua, las plantas desarrollan estructuras vegetativas más complejas para maximizar la captura de luz y la fotosíntesis (Neumann, 2008). Algunas plantas pueden presentar altos niveles de RT como una adaptación a fluctuaciones ambientales.

Para los caracteres de mazorca BC ($r = -0.20$, $P = 0.016$, $FDR = 0.047$), NumGrsHil ($r = 0.29$, $P = 0.00044$, $FDR = 0.0024$) y LM ($r = 0.30$, $P = 0.00040$, $FDR = 0.0024$), los datos presentaron correlaciones bajas, pero de igual manera, los valores mayores se asociaron con áreas más húmedas. Esto era de esperarse, ya que en zonas húmedas las precipitaciones son mayores durante las fases críticas como la floración, polinización y llenado de granos; el agua puede influir en la producción de grano lo que favorece el

tamaño y calidad de mazorca (Oktem, 2008). Por lo que respecta a NumGrsHil, la correlación moderada indica que la disponibilidad de agua favorece una mayor formación de hileras por mazorca.

Una mejor comprensión de los efectos de la sequía sobre las plantas es vital para mejorar las prácticas de gestión del agua y de las actividades de mejora en la agricultura (Chaves *et al.*, 2003). Las respuestas al estrés hídrico son complejas y pueden implicar cambios desfavorables en la producción (Chaves *et al.*, 2002). Por otro lado, las colectas asociadas a zonas áridas pueden ser una fuente de germoplasma para el desarrollo y mejora de nuevos materiales tolerantes al estrés hídrico.

Si bien la sequía impacta el rendimiento del grano de maíz en casi todas las fases de su desarrollo, el cultivo es particularmente vulnerable durante la floración. El maíz muestra una sensibilidad extrema a la sequía desde dos días antes y hasta 22 días después de la emisión de los estigmas, con la mayor susceptibilidad registrada alrededor de los siete días posteriores (Grant *et al.*, 1989).

Índice de aridez y grupos de maíz

En el cuadro 2 se presentan los resultados del análisis de aridez por grupo de maíz. También, se presenta el número de ecotipos por grupo, valores de precipitación media, temperatura media y el IGA. Se observa que los grupos de maíz Dulce, Cuarenteno, Criollo-Rojo, Criollo-Guinda, Cremoso, Cónico-Pepitilla, Azul-Criollo, Zapalote-Chico y Ancho-Cristalino se asocian con índices de aridez que fluctúan entre 0.18 y 0.68; sin embargo, no se pueden hacer inferencias sólidas sobre su vocación en términos de aridez porque están representadas por solamente una colecta.

Las razas o grupos Cónico y Elotes-Cónicos tuvieron el mayor número de colectas, 31 y 23, respectivamente, y valores asociados de IGA de 0.50 y 0.47, que se identifican como clase climática semiárida. Los valores de precipitación media mensual fueron de 65.28 y 62.92 mm respectivamente, se encuadran dentro de valores intermedios dentro del gradiente de aridez en el estado de Puebla. Los grupos Conejo, Criollo-Guinda y Tuxpeño se asociaron con las temperaturas más altas (23.9, 23.8 y 23.3 °C, respectivamente) y tuvieron un IGA alto, lo que implica que se localizan en regiones húmedas. El grupo Tehuacanero se asoció con una temperatura media alta y con un IGA relativamente bajo (0.32), lo que indica su presencia en condiciones más áridas. Los resultados contrastan con los de Linhart y Grant (1996), quienes indicaron que la raza Tuxpeño está más asociada a zonas áridas; la diferencia podría deberse a condiciones

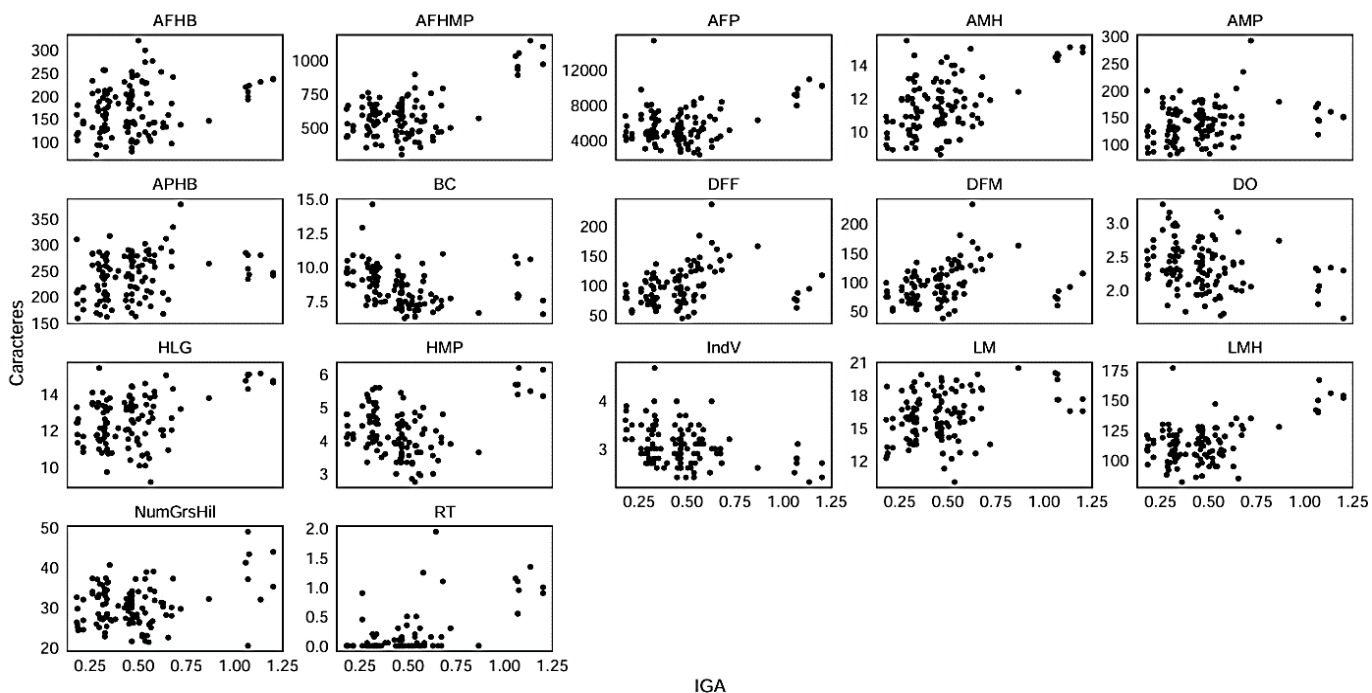


Figura 4. Diagrama de dispersión de la relación entre los caracteres de pasaporte e IGA (adimensional). IGA: índice global de aridez, AFHB: área foliar de la hoja bandera (cm²), AFHMP: área foliar hoja de mazorca principal (cm²), AFP: área foliar por planta (cm²), AMH: ancho máximo de hoja (cm), AMP: altura de la mazorca principal (cm), APHB: altura de planta a la hoja bandera (cm), BC: brácteas de la cubierta, DFF: días a floración femenina, DFM: días a floración masculina, DO: diámetro del olote (cm), HLG: hojas durante el llenado de grano, HMP: hojas sobre la mazorca principal, IndV: índice de venación, LM: longitud de la mazorca (cm), LMH: longitud máxima de hoja (cm), NumGrHil: número de granos por hilera, RT: ramificaciones terciarias.

altitudinales y ambientales; sin embargo, el número de colectas fue muy variable entre razas, por lo que los valores medios simples no resultan confiables.

Predicción de aridez promedio en los grupos de maíz

Los valores de predicción se presentan en la Figura 5 y se expresan como desviaciones con respecto a la media global. La amplitud de los diferentes intervalos de confianza depende en gran medida del número de ecotipos por grupo, por lo cual aquellos menos representados tienen intervalos muy amplios. La prueba de hipótesis global de efectos aleatorios indicó variación significativa ($P \leq 0.05$) en el índice de aridez promedio entre grupos. Los grupos Tuxpeño, Conejo, Cacahuacintle y Cónico, con intervalos de confianza cortos, se asociaron con efectos aleatorios positivos con valores de 0.0 a 0.4, lo que indica que estos grupos están más asociados con zonas húmedas. De acuerdo con López-Morales *et al.* (2019), la raza Tuxpeño predomina en altitudes de 0 a 500 m, donde prevalece un clima cálido y húmedo. Los grupos Olotón, Tehuacanero,

Chalqueño, Olotillo, Mezcla, Bolita, Ancho, Pepitilla, Arrocillo y Elotes-Cónicos, también con intervalos de confianza relativamente cortos, tuvieron predicciones negativas, con valores de -0.2 a 0.0, con mayor asociación con zonas áridas. Estos grupos podrían ser utilizados en programas de mejoramiento genético para resistencia a sequía. Por otro lado, se reporta que la raza Olotillo se adapta a trópico húmedo y seco, bajo condiciones edáficas limitantes, suelos poco profundos y pocos insumos (Bellon y Risopoulos, 2001). Otros grupos presentaron intervalos de confianza muy amplios; entre ellos Criollo-Guinda, Dulce, Criollo-Rojo, Azul-Criollo, Cónico-Pepitilla, Cristalino-Ocho, Ancho-Cristalino, Vandefío, Zapalote-Chico y Cremoso, los cuales estuvieron representados por muy pocas colectas. Los grupos Cónico y Elotes-Cónicos, que presentaron los intervalos de confianza más estrechos, se encuentran más cerca del valor 0.0, lo que indica una asociación con áreas de aridez intermedia. Se reporta que estas razas muestran resistencia a la sequía en etapas intermedias de crecimiento y tolerancia al frío (CONABIO, 2022).

Cuadro 2. Grupos de maíz registrados en el estado de Puebla, México, número de colectas que conformaron cada grupo y valores de índice de aridez, precipitación y temperatura del sitio de procedencia.

Grupo	Colectas	Pmed (mm)	Tmed (°C)	IGA
Cónico	31	65.28	15.13	0.50
Elote-Cónico	23	62.92	15.75	0.47
Mezcla*	14	60.54	20.38	0.41
Arrocillo	10	56.14	13.92	0.44
Pepitilla	11	66.85	19.50	0.43
Ancho	9	66.07	20.73	0.43
Chalqueño	9	49.23	13.20	0.39
Cacahuacintle	7	63.01	11.78	0.51
Tuxpeño	5	114.18	23.31	0.89
Blanco-Precoz	5	74.40	14.61	0.56
Olotillo	4	57.29	22.48	0.38
Olotón	4	38.50	23.21	0.23
Bolita	4	57.68	17.43	0.40
Tehuacanero	4	51.27	22.51	0.32
Conejo	3	117.38	23.94	0.89
Cristalino-Ocho	3	63.05	16.58	0.46
Amarillo	2	74.25	12.29	0.57
Criollo-Blanco	2	72.58	15.04	0.51
Vandefío	2	63.91	24.26	0.39
Ancho-Cristalino	1	54.08	20.64	0.34
Zapalote-Chico	1	56.08	24.65	0.33
Azul-Criollo	1	75.08	14.54	0.53
Cónico-Pepitilla	1	65.33	12.03	0.53
Cre moso	1	29.83	23.14	0.18
Criollo-Guinda	1	136.41	23.76	1.07
Criollo-Rojo	1	75.08	14.11	0.61
Cuarentano	1	72.25	23.66	0.44
Dulce	1	84.41	16.14	0.68

Pmed: precipitación media, Tmed: temperatura media, IGA: índice global de aridez. *Mezcla de varias razas.

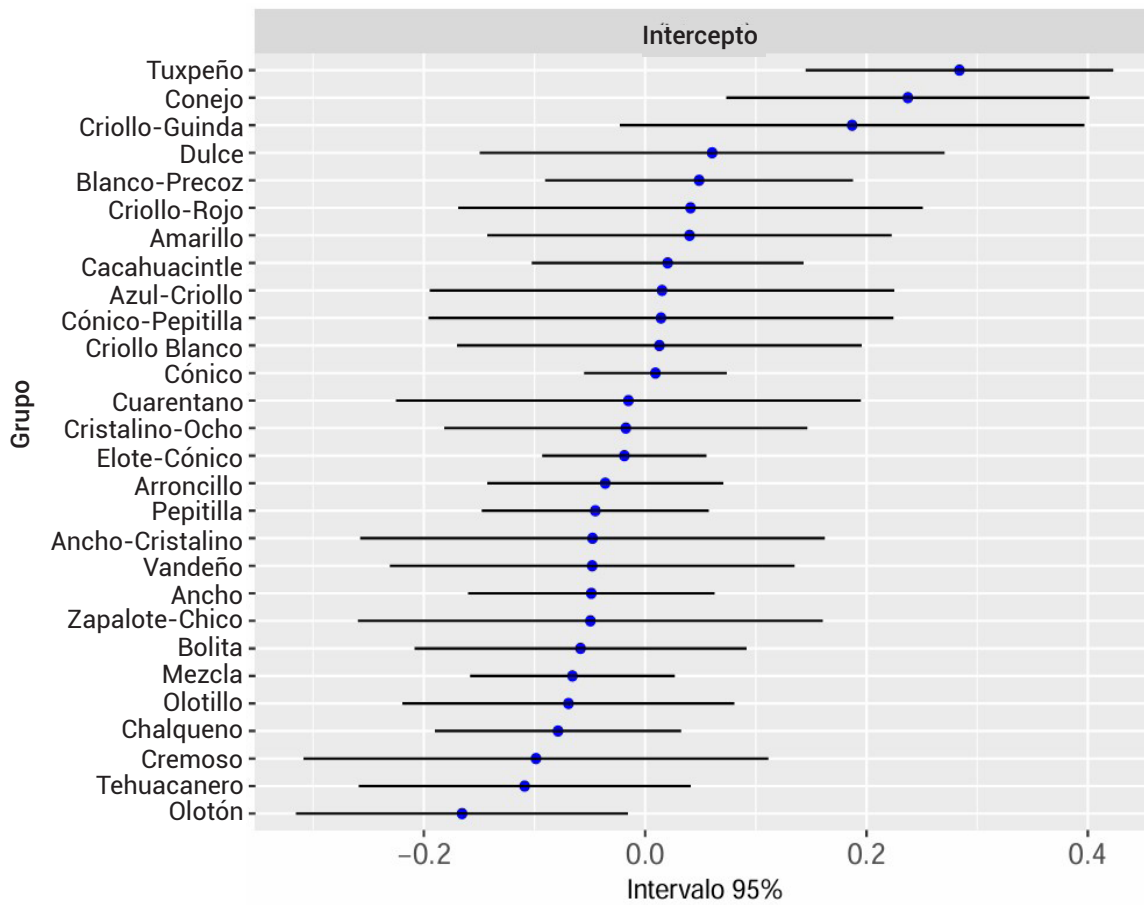


Figura 5. Intervalos de confianza para la predicción del IGA relativo entre grupos de maíz. Valores negativos indican condiciones de aridez.

Cuadro 3. Ecotipos seleccionadas de los sitios con mayor índice de aridez.

Colecta	Grupo	Municipio	Localidad	IGA
128	Olotón	Totaltepec de Guerrero	Fabrica	0.1797
171	Cónico	Totaltepec de Guerrero	Las Palmas	0.1797
127	Cónico	Totaltepec de Guerrero	El Llano	0.1833
172	Cremoso	Totaltepec de Guerrero	El Llano	0.1833
129	Olotón	Totaltepec de Guerrero	El Yundiaba	0.1846
130	Ancho	Totaltepec de Guerrero	Sachoo	0.1873
126	Mezcla [†]	San Jerónimo Xayacatlán	El Zapote	0.2133
131	Elote-Cónico	San Jerónimo Xayacatlán	La Providencia	0.2133
132	Mezcla	San Jerónimo Xayacatlán	La Providencia	0.2133
15	Tehuacanero	San Francisco Altepexi	El Tecuate	0.2615

[†]Mezcla de varios grupos.

Lugares de colecta con mayor índice de aridez en el estado de Puebla

El Cuadro 3 muestra la lista de las 10 colectas seleccionadas por su ubicación en los sitios de mayor IGA. Estos ecotipos pertenecen a ocho grupos de maíz y provienen de tres municipios. El municipio de Totoltepec de Guerrero tuvo más ecotipos seleccionados con seis. Este municipio se ubica en la parte sur del estado de Puebla, a una altitud promedio de 1360 msnm. Las colectas con menor índice de aridez se concentraron en localidades de la Sierra Norte de Puebla, y fueron principalmente Olotón, Cónico, Cremoso y Ancho, lo que coincide con zonas de mayor humedad. En contraste, los ecotipos asociados con valores más altos de IGA se localizaron en la Mixteca Poblana y en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, con la presencia de los grupos de Mezcla, Elotes-Cónicos y Tehuacanero, que muestran adaptación a condiciones semiáridas. Este patrón espacial confirma que la distribución de los grupos refleja gradientes ambientales bien definidos, desde ambientes húmedos en el norte del estado hasta regiones áridas y semiáridas en el sur.

El presente estudio permitió identificar ecotipos de maíz nativo del estado de Puebla con potencial adaptación a condiciones áridas y semiáridas, a partir de la asociación entre el IGA y los caracteres morfológicos y fenológicos evaluados.

Asimismo, los patrones observados en floración y caracteres de mazorca sugieren que tanto la variación ambiental como la selección local han contribuido a generar materiales con diferentes niveles de adaptación. Estos hallazgos aportan bases para la preservación y utilización de ecotipos resistentes a la sequía, contribuyendo a la conservación de la diversidad de maíces nativos del estado de Puebla y su aprovechamiento en escenarios de cambio climático.

CONCLUSIONES

Se identificaron ecotipos de maíz con mejor adaptación a condiciones de calor y estrés hídrico mediante la correlación entre características morfológicas, fisiológicas y de raza con el IGA. Se identificaron ecotipos pertenecientes a los grupos Chalqueño, Olotillo, Ancho y Pepitilla como los más asociados con ambientes áridos, lo que los convierte en una fuente relevante de germoplasma para programas de mejoramiento orientados a la tolerancia a la sequía. Destacaron 16 variables relacionadas con la aridez del sitio de colecta, lo que confirma la existencia de variaciones asociadas con la disponibilidad hídrica y evidencia de adaptación local de las razas nativas de Puebla a gradientes de aridez. Estos resultados pueden contribuir

a la identificación y conservación de germoplasma nativo adaptado a condiciones de sequía.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindar las instalaciones necesarias para llevar a cabo este trabajo de investigación, a los asesores que brindaron su apoyo y orientación. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, actualmente SECIHTI) por la beca proporcionada. De igual forma, a los autores del Proyecto Maestro de Maíces Mexicanos por su contribución de información que enriqueció esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbass K., M. Z. Qasim, H. Song, M. Murshed, H. Mahmood and I. Younis (2022) A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research* 29:42539-42559, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Bates D., B. Mächler, B. Bolker and S. Walker (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67:1-48, <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bellon M. R. and J. Risopoulos (2001) Small-scale farmers expand the benefits of improved maize germplasm: a case study from Chiapas, Mexico. *World Development* 29:799-811, [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(01\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(01)00013-4)
- Bernardo R. (1996) Best linear unbiased prediction of maize single-cross performance. *Crop Science* 36:50-96, <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010009x>
- Castilla P. N. (2005) Invernaderos de Plástico: Tecnología y Manejo. Mundi-Prensa. Madrid, España. 462 p.
- Chaves M. M., J. S. Pereira, J. Maroco, M. L. Rodrigues, C. P. P. Ricardo, M. L. Osório, ... and C. Pinheiro (2002) How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89:907-916, <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>
- Chaves M. M., J. P. Maroco and J. S. Pereira (2003) Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 30:239-264, <https://doi.org/10.1071/FP02076>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2022) Razas de maíz de México. CONABIO, Ciudad de México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz> (Noviembre 2025).
- De Angeli S., L. Villani, G. Castelli, M. Rusca, G. Boni, E. Bresci and L. Piemontese (2025) Invited perspectives: Advancing knowledge co-creation in drought impact studies. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 25:2571-2589, <https://doi.org/10.5194/nhess-25-2571-2025>
- Estrada F., A. Mendoza-Ponce, O. Calderón-Bustamante and W. Botzen (2022) Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change* 22:126, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- Farré I. and J. M. Faci (2009) Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 96:383-394, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.07.002>
- Gao Y., P. Su, A. Zhang, R. Wang and J. Wang (2021) Dynamic assessment of global maize exposure to extremely high temperatures. *International Journal of Disaster Risk Science* 12:713-730, <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00360-8>
- Glickman M. E., S. R. Rao and M. R. Schultz (2014) False discovery rate control is a recommended alternative to Bonferroni-type adjustments in health studies. *Journal of Clinical Epidemiology* 67:850-857, <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.03.012>

- González-Diéquez D. O. y C. A. Orozco-Castillo (2020) Identificación de marcadores moleculares (SNP) y genes candidatos asociados a la tolerancia genética al complejo mancha de asfalto en variedades nativas de maíz (*Zea mays* L.). *Ciencia, Tecnología y Salud* 7:218-235, <https://doi.org/10.36829/63CTS.v7i2.826>
- González M. A. y Y. Massieu T. (2009) La bioseguridad y el maíz en México: ¿En pro de los transgénicos o en pro de la cultura y la biodiversidad del maíz? *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* 9:13-52.
- Grant R. F., B. S. Jackson, J. R. Kiniry and G. F. Arkin (1989) Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal* 81:61-65, <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100010011x>
- Hijmans R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones and A. Jarvis (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978, <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Jans Y., W. von Bloh, S. Schaphoff and C. Müller (2021) Global cotton production under climate change: implications for yield and water consumption. *Hydrology and Earth System Sciences* 25:2027-2044, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2027-2021>
- Linhart Y. B. and M. C. Grant (1996) Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 27:237-277, <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.27.1.237>
- López-Morales F., M. G. Vázquez-Carrillo, J. J. García-Zavala, G. López-Romero, D. Reyes-López y J. D. Molina-Galán (2019) Estabilidad y adaptación del rendimiento y calidad de tortilla en maíz Tuxpeño, Valles-Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10:1809-1821, <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1851>
- Nelimor C., B. Badu-Apraku, A. Y. Tetteh and A. S. P. N'guetta (2019) Assessment of genetic diversity for drought, heat and combined drought and heat stress tolerance in early maturing maize landraces. *Plants* 8:518, <https://doi.org/10.3390/plants8110518>
- Neumann P. M. (2008) Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany* 101:901-907, <https://doi.org/10.1093/aob/mcn018>
- Oktem A. (2008) Effects of deficit irrigation on some yield characteristics of sweet corn. *Bangladesh Journal of Botany* 37:127-131, <https://doi.org/10.3329/bjb.v37i2.1718>
- Orozco-Ramírez Q., H. Perales and R. J. Hijmans (2017) Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) races in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution* 64:855-865, <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0>
- Pandey R. K., J. W. Maranville and A. Admou (2000) Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: I. grain yield and yield components. *Agricultural Water Management* 46:1-13, [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00073-1)
- PINCC, Programa de Investigación en Cambio Climático (2023) 2021 fue el cuarto año más caluroso en México del que se tenga registro. UNAM, Ciudad de México. <https://www.pincc.unam.mx/2021-fue-el-cuarto-ano-mas-caluroso-en-mexico-del-que-se-tenga-registro/#:~:text=El%202021%20es%20el%20cuarto,M%C3%A9xico%20es%20espacialmente%20muy%20heterog%C3%A9neo> (Noviembre 2025)
- Ranum P., J. P. Peña-Rosas and M. N. García-Casal (2014) Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1312:105-112, <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org>
- Ruiz C. J. A., N. Durán P., J. J. Sánchez G., J. Ron P., D. R. González E., J. B. Holland and G. Medina G. (2008) Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize races. *Crop Science* 48:1502-1512, <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0518>
- Ruiz C. J. A., J. M. Hernández C., J. J. Sánchez G., A. Ortega C., G. Ramírez O., M. J. Guerrero H., ... y L. de la Cruz L. (2013) Ecología, Adaptación y Distribución Actual y Potencial de las Razas Mexicanas de Maíz. Libro Técnico Núm. 5. INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 159 p.
- 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, <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Santos R. M. and R. Bakhshoodeh (2021) Climate change, global warming, climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications. *Heliyon* 7:e08219, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08219>
- Shojaei H. S., K. Mostafavi, A. Omrani, Á. Illés, C. Bojtor, S. Omrani and J. Nagy (2022) Comparison of maize genotypes using drought-tolerance indices and graphical analysis under normal and humidity stress conditions. *Plants* 11:942, <https://doi.org/10.3390/plants11070942>
- Zomer R. J., J. Xu and A. Trabucco (2022) Version 3 of the Global Aridity Index and potential evapotranspiration database. *Scientific Data* 9:409, <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01493-1>

