



Caracterización morfológica de líneas avanzadas de chiles (*Capsicum annuum* L.) del centro de México*

Morphological characterization of advanced pepper lines (*Capsicum annuum* L.) from central Mexico

Enrique González-Pérez¹, Salvador Villalobos-Reyes¹, Carlos Alberto Núñez-Colín², Jaime Canul-Ku³

* Recepción: 23 de agosto, 2024. Aceptación: 12 de noviembre, 2024. Este trabajo formó parte del proyecto de investigación “Desarrollo y liberación de materiales mejorados de chile, ajo y jitomate”, financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato, México. gonzalez.enrique@inifap.gob.mx (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6648-1113>); villalobos.reyes@inifap.gob.mx (<https://orcid.org/0009-0004-7299-9789>).

² Universidad de Guanajuato, Programa de Ingeniería en Biotecnología. Celaya, Guanajuato, México. carlos.nunez@ugto.mx (<https://orcid.org/0000-0002-9912-6097>).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatepec. Zacatepec, Morelos, México. canul.jaime@inifap.gob.mx (<https://orcid.org/0000-0002-9875-0736>).

Resumen

Introducción. De las cinco especies cultivadas de chile, *Capsicum annuum* L. es la más importante en el mundo, debido a su alta demanda en las industrias alimentaria, médica y cosmética, entre otras. México tiene la mayor diversidad de tipos cultivados, entre los que destacan jalapeño, guajillo, ancho, serrano y habanero. No obstante, algunos agricultores siembran materiales nativos que deben ser estudiados y preservados, tales como mulato y chilaca. En ciertos casos, como el de chilaca, no existen cultivares comerciales mejorados, por lo que los productores dependen de la semilla que producen. **Objetivo.** Caracterizar morfológicamente líneas avanzadas de diferentes tipos de *C. annuum* procedentes del centro de México. **Materiales y métodos.** El trabajo se llevó a cabo en los ciclos primavera-verano de 2022 y 2023, en el Campo Experimental Bajío, ubicado en Celaya, Guanajuato, México. En 32 líneas avanzadas de ocho tipos de *C. annuum*, se evaluaron 42 caracteres con base en las directrices de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales y de la guía del Instituto Internacional de Recursos Genéticos. Los datos obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva y sometidos a un análisis de conglomerados y de correspondencias. **Resultados.** La variación morfológica mostró que quince caracteres de planta, hoja y fruto fueron determinantes para diferenciar tipos y líneas de chile. Con base en caracteres similares, el análisis clúster permitió ubicarlos en cinco grupos. Los grupos I y III estuvieron conformados por tres tipos de chile, y seis caracteres presentaron los eigenvalores positivos más altos. **Conclusiones.** La diversidad observada reveló caracteres morfológicos determinantes para distinguir tipos y líneas de chiles, los cuales deben concluir su proceso de mejora genética.

Palabras clave: diversidad genética, morfología vegetal, rasgo biológico, mejoramiento genético.



Abstract

Introduction. Of the five cultivated pepper species, *Capsicum annuum* L. is the most important worldwide, due to its high demand in the food, medical, and cosmetic industries, among others. Mexico has the greatest diversity of cultivated types, including jalapeño, guajillo, ancho, serrano, and habanero. However, some farmers grow native materials that should be studied and preserved, such as mulato and chilaca. In certain cases, like chilaca, there are no improved commercial cultivars, so producers depend on the seed they produce. **Objective.** To morphologically characterize advanced lines of different *C. annuum* types from central Mexico. **Materials and methods.** The study was conducted during the spring-summer cycles of 2022 and 2023, at the Bajío Experimental Station, located in Celaya, Guanajuato, Mexico. In 32 advanced lines of eight *C. annuum* types, 42 traits were evaluated based on the guidelines of the International Union for the Protection of New Varieties of Plants and the International Plant Genetic Resources Institute guide. The data obtained were analyzed using descriptive statistics and subjected to cluster and correspondence analysis. **Results.** Morphological variation showed that fifteen plant, leaf, and fruit traits were crucial to differentiating pepper types and lines. Based on similar traits, the cluster analysis grouped them into five clusters. Groups I and III included three pepper types, and six traits presented the highest positive eigenvectors. **Conclusions.** The observed diversity revealed determinant morphological characteristics to distinguish pepper types and lines, which must complete their genetic improvement process.

Keywords: genetic diversity, plant morphology, biological trait, plant breeding.

Introducción

El chile (*Capsicum annuum* L.) es una de las hortalizas de mayor relevancia y uno de los principales condimentos utilizados en la preparación de platillos gastronómicos en el mundo (Aguilar-Rincón et al., 2010). Por su importancia cultural, agronómica, gastronómica, nutricional y económica (Pathirana, 2013), la superficie global de cultivo ha aumentado en los últimos años. En la salud humana, el chile representa una fuente importante de vitaminas, y en la industria es una potencial fuente de colorantes naturales, productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos (Pathirana, 2013; Rivera et al., 2016).

En el género *Capsicum* existen cinco especies cultivadas: *C. annuum*, *C. chinense*, *C. pubescens*, *C. frutescens* y *C. baccatum*, así como alrededor de veinticinco especies silvestres y semicultivadas (Hernández-Verdugo et al., 1999). *C. annuum* es la especie con mayor superficie cultivada y de más valor económico en el mundo; la mayor diversidad morfofenotípica se encuentra en México (Aguilar-Rincón et al., 2010). De esta diversidad, solo algunos tipos de chile son ampliamente reconocidos, entre los que destacan jalapeño, ancho, guajillo, pasilla, serrano, manzano, habanero, de árbol y piquín, cuyos caracteres morfofenotípicos distintivos son apreciados y utilizados a nivel regional y local (Aguilar-Rincón et al., 2010; Kraft et al., 2014; Santiago-Luna et al., 2018).

En la última década, la producción de chile en el mundo presentó un crecimiento acelerado, con un aumento superior al 10 % anual, debido a su alta demanda en la industria para la elaboración de alimentos, medicinas, cosméticos, repelentes y colorantes, entre otros (Luna-Ruíz et al., 2018; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024). En México, los chiles son una hortaliza de importancia económica, con una superficie sembrada de 158 000 hectáreas en 2022, que representaron un valor de producción de 1047 millones de dólares (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023). Entre los tipos de chile más cultivados destacan jalapeño, guajillo, ancho, serrano y habanero (Aguilar-Rincón et al., 2010).

Además de su importancia económica, el chile tiene un fuerte impacto social y cultural en las diferentes zonas de producción. Los 12 000 productores de la República Mexicana que se dedican a este cultivo generan alrededor

de 30 millones de jornales al año, cuyos beneficios son colaterales a la industria de agroquímicos, transporte, almacenamiento y comercio en general (Luna García et al., 2021). Estos productores habitualmente utilizan semilla de variedades nativas que reproducen y que no han sido mejoradas (Segovia Lerma & Romero Mozqueda, 2014).

En México, por ser centro de origen y domesticación de la especie *Capsicum annuum* L., se ha generado una gran variedad de formas, colores, sabores y tamaños de fruto (Kraft et al., 2014). Se distribuyen más de cien morfotipos de chiles silvestres que presentan alta variabilidad genética entre y dentro. Además de las divergencias genéticas entre morfotipos, se asocian diferencias en su composición química en compuestos como capsaicinoides, flavonoides, carotenoides, entre otros (Castellón Martínez et al., 2014). Estos chiles por sus peculiares características tienen alta demanda de consumo en mercados de comunidades urbanas y rurales (Toledo-Aguilar et al., 2016).

En varias regiones del territorio nacional existen poblaciones silvestres que es necesario explorar, recolectar, estudiar y preservar. Como es el caso de los chiles chilaca que son cultivados en regiones locales con alta demanda y aceptación en el mercado nacional (Segovia Lerma & Romero Mozqueda, 2014). A la fecha, no existen cultivares mejorados de tipo chilaca registrados en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV), por lo que los productores continúan dependientes de la semilla que reproducen con conocimiento empírico, lo cual no ha podido subsanar la calidad genética y sobre todo sanitaria que el mercado nacional e incluso internacional demanda (Productores y Comercializadores de Puebla, comunicación personal, septiembre 18, 2022).

La mejora genética en algunos tipos de chile nativo como chilaca ha sido a través de la selección realizada por los productores, por lo que los materiales obtenidos presentan variabilidad aún no caracterizada (López & Castro, 1999). Por ello, es necesario robustecer la información que a la fecha se tiene sobre caracteres morfológicos que expliquen la variabilidad en los tipos de chile nativos de diferente procedencia. La caracterización morfológica es considerada crucial para definir una serie de descriptores con relevancia agronómica útiles para clasificar e identificar grupos genéticos (Tapia et al., 2005). Debido a la importancia de contar con patrones de caracterización para las plantas cultivadas, estudios básicos se han enfocado en conocer la variabilidad de caracteres dentro y entre plantas, y en seleccionar características cualitativas o cuantitativas en órganos menos influidos por el ambiente, como la flor, el fruto, las hojas, los tallos, las raíces y los tejidos celulares que son útiles para la descripción (Pérez et al., 2004; Raven et al., 2005).

En el Programa de Hortalizas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), se ha estado trabajando durante la última década en la mejora genética de materiales de tipo mulato, poblano y, en especial, chilaca. El propósito es contar con germoplasma que posea caracteres de interés agronómico para generar materiales mejorados con amplia adaptación, características sobresalientes y competitividad, que contribuyan al desarrollo de la cadena de valor del chile en beneficio de los productores. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar morfológicamente líneas avanzadas de diferentes tipos de *C. annuum* procedentes del centro de México.

Materiales y métodos

Área de estudio

La presente investigación se realizó en una parcela ubicada en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), situado entre la latitud 20° 34' 47" N y longitud -100° 49' 13" O, a una altitud de 1750 m. El clima es BS1hw (W) (e) semicálido con lluvias en verano, temperatura media anual 18,4 °C y precipitación media anual de 601 mm (García, 2004).

Material vegetal

Se utilizaron 32 líneas avanzadas obtenidas por selección masal e individual (cinco ciclos de selección) de poblaciones criollas de diferentes tipos de chile (*Capsicum annuum* L.) proporcionados por el Programa de Hortalizas del Campo Experimental Bajío del INIFAP y de distinta procedencia (LN, LO, m s. n. m.). 1) chilaca: CHI-1-GTO (Celaya, Guanajuato, 20°34'38", 100°49'25", 1,763), CHI-10-GTO (San Salvador el Verde, Puebla, 19°16'46", 98°29'34", 2,358), CHI-5-GTO, CHI-9-GTO, CHI-12-GTO, CHI-2-GTO, CHI-7-GTO, CHI-1-PUE, CHI-8-GTO y CHI-11-GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,115); 2) jalapeño: JALP-2-GTO, VAR-BENITO (Juventino Rosas, Guanajuato, 20 38'17", 101 00'40", 1,758) y JALP-1-GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,115); 3) piteado: CPIT-1-GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,113), CPIT-2-GTO y CPIT-3-GTO (Apaseo el Alto, Guanajuato, 20°27'21", 100°37'26", 1,845); 4) poblano: PBO-BG-1130-6 (Celaya, Guanajuato, 20°34'38", 100°49'25", 1,763) y PBO-BG-1114-1 (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,113); 5) mulato: MUL-2- GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,113), MUL-3-PUE y MUL-1-PUE (San Salvador el Verde, Puebla, 19°16'46", 98°29'34", 2,358); 6) ancho: CHIANC-1-PUE (San Salvador el Verde, Puebla, 19°16'46", 98°29'34", 2,358) y BG-1114-2 (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,113); 7) chorro: CHR-3-GTO, CHRO-5-GTO, CHR-10-GTO (Celaya, Guanajuato, 20°34'38", 100°49'25", 1,763), CHR-BG-1114-2, CHR-7-GTO, G-SE-PQ, CHR-4-GTO y CHR-8-GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,113); y 8) guajillo: GUAJ-1-GTO (Dolores Hidalgo, Guanajuato, 21°09'22", 100°55'57", 2,098).

Establecimiento y manejo experimental

Durante los ciclos primavera-verano 2022 y 2023, en un lote experimental de 600 m² con acolchado plástico en surcos de siembra, bajo un diseño completamente al azar se establecieron 32 líneas avanzadas de chile (tratamientos) con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental fue de un surco de 4,0 m de largo por 0,9 m de ancho con dieciséis plantas. El arreglo topológico fue a tres bolillos en doble hilera con distancia entre plantas de 30 cm y entre hileras de 35 cm. Los riegos se aplicaron tres veces por semana, variando en tiempo, de acuerdo con las condiciones climáticas y con la necesidad de humedad del cultivo.

La fertilización se suministró a través del sistema de riego por goteo, una vez por semana, a partir de la segunda semana después del trasplante (DDT), acorde con las especificaciones del plan de nutrición (245N-45P-120K) generado en el Programa de Hortalizas del Campo Experimental Bajío de INIFAP. La eliminación de malezas fue manual y, para el manejo de plagas y enfermedades a partir de la sexta semana después del trasplante, una vez por semana se aplicó sulfato de gentamicina, clorhidrato de oxitetraciclina, tiofanato metílico, benomilo, ditiocarbamato de manganeso, oxiclورو de cobre, cipermetrina, iprodione, extracto de neem, y clorotalonil a las dosis comerciales recomendadas.

Variables de estudio

Con base en los descriptores de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (2006) y de la guía del Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (1995), en cada línea avanzada se evaluaron 42 caracteres morfológicos; a saber: plántula: pigmentación antociánica del hipocótilo (PAH); planta: porte, longitud del tallo (LT; cm), entrenudo acortado en la parte superior (EAPS), número de entrenudos entre la primera flor y los entrenudos acortados (NEPFEA), y pigmentación antociánica de los nudos (PAN); Tallo: intensidad de la pigmentación antociánica de los nudos (IPAN) y pilosidad de los nudos (PN); Hoja: longitud del limbo

(LL; cm), anchura del limbo (AL; cm), intensidad del color verde (ICV), forma (FH), ondulación del margen (OM), abullonado, perfil en sección transversal (PST) y brillo (BH); Pedúnculo: porte (PP); Flor: pigmentación antociánica de la antera (PAA); Fruto: color antes de la madurez (CAM), intensidad del color antes de la madurez (ICAM), pigmentación antociánica (PAF), porte (PF), longitud (LF; cm), diámetro (DF; cm), relación entre la longitud y el diámetro (RLD), forma en sección longitudinal (FSL), forma en sección transversal (FST), sinuosidad del pericarpio en la parte basal (SPPB), sinuosidad del pericarpio excluida la parte basal (SPEPB), textura de la superficie (TS), color a la madurez (CMF), intensidad del color a la madurez (ICMF), brillo, cavidad peduncular (CP), profundidad de la cavidad peduncular (PCP), forma del ápice (FA), profundidad de los surcos interoculares (PSI), número de lóculos (NL), espesor de la pulpa (EP), capsaicina en la placenta (CPF), aspecto del cáliz (AC) y longitud del pedúnculo (LP; cm). Los niveles de expresión registrados en cada carácter fueron asignados con base en la tabla de caracteres de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales.

La intensidad del color verde de la hoja se determinó mediante el método automatizado para medir color y área foliar con imágenes digitales (MACF-II) (Sauceda-Acosta et al., 2017), considerando los siguientes niveles: muy claro, claro, medio, oscuro y muy oscuro. La presencia de capsaicina se evaluó por medio del método de cromatografía líquida de alta resolución (Organización Internacional de Normalización, 1993).

Análisis de datos

Con la información obtenida de la caracterización morfológica se determinó el porcentaje de las líneas que presentaron caracteres similares. Para comprobar la similitud y disimilitud entre líneas, se realizó un análisis de conglomerados usando la distancia χ^2 (Núñez-Colín et al., 2004), con el método de aglomeración UPGMA (Núñez-Colín & Escobedo-López, 2011), y un análisis de correspondencias múltiple (Peña-Caballero et al., 2020), con el programa NTSYS 2.2 (Rohlf, 2009).

Resultados

Caracteres morfológicos

La caracterización mostró diferencias morfológicas en 21 de los 42 caracteres evaluados en las 32 líneas avanzadas de chile. Se denotaron esas diferencias entre los tipos de chile y entre líneas del mismo tipo. En plántula, todas las líneas presentaron pigmentación antociánica del hipocótilo.

En planta, se identificaron tres tipos de hábito de crecimiento: erecto (65,6 %), semierecto (28,1 %) y postrado (6,3 %). Todas las líneas de chilaca tuvieron un porte erecto, excepto en CHI-7-GTO, que fue semierecto. El porte postrado se registró en PBO-BG-1130-6 (poblano) y CHR-7-GTO (chorro). La longitud del tallo en 50 % de las líneas fue chico (<15 cm), y medio en el resto (15,1 a 25 cm). Los tallos chicos se presentaron en jalapeños, anchos, guajillo, un poblano (PBO-BG-1130-6) y un chilaca (CHI-7-GTO). En estos dos últimos el comportamiento difirió del observado en las otras líneas de chilaca y poblano que tuvieron tallos de longitud media.

El entrenudo corto (<6 cm) fue dominante en 27 de las 32 líneas, entretanto las líneas CHI-9-GTO, CHR-3-GTO, PBO-BG-1130-6, CHR-4-GTO y CHR-10-GTO no lo presentaron. Todas las líneas tuvieron de uno a tres entrenudos entre la primera flor y entrenudos acortados, excepto GUAJ-1-GTO que no presentó. La pigmentación antociánica de los entrenudos se halló en 90,6 % de las líneas y ausente en CHI-1-GTO (chilaca), CHR-3-GTO (chorro) y GUAJ-1-GTO (guajillo). La intensidad de la pigmentación antociánica de los nudos (IPAN) fue de muy débil a muy fuerte (Cuadro 1).

Cuadro 1. Caracteres variables dentro de cada línea avanzada de chile con importancia agronómica. Ciclos primavera-verano, 2022 y 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Table 1. Variable traits within each advanced pepper line with agronomic importance. Spring-summer cycles, 2022 and 2023. Celaya, Guanajuato, Mexico.

Código	IPAN	PN	ICV	F	OM	PST	PP	CAM	PF	SPPB	CM	CP	FA	PCP
CHI-1-GTO	MD	A	M	L	F	C	I	V	Co	D	Ma	A	Re	A
CHI-2-GTO	MD	A	M	L	MF	C	I	V	Co	M	Ma	A	Re	A
CHI-5-GTO	MD	A	M	L	M	C	Co	V	Co	MD	Ma	A	Re	A
CHI-7-GTO	D	MD	Cl	L	M	MC	Co	V	Co	D	Ma	A	Re	A
CHI-8-GTO	D	MD	M	Ov	D	MoC	Co	V	Co	MD	Ma	A	Re	A
CHI-9-GTO	MD	M	M	L	MD	P	Co	V	Co	MD	Ma	A	Re	A
CHI-10-GTO	MD	A	O	Ov	MD	MC	Co	V	Co	MD	Ma	A	H	A
CHI-11-GTO	MD	A	O	L	MD	P	Co	V	Co	MD	Ma	A	Re	A
CHI-12-GTO	MD	A	O	Ov	D	P	Co	V	Co	MD	Ma	A	Ag	A
CHR-3-GTO	MD	A	M	L	D	MoC	E	Am	Co	A	Am	Pr	H	M
JALP-1-GTO	D	MF	M	L	M	MoC	I	V	E	MD	Ro	A	Re	A
JALP-2-GTO	D	MF	M	L	D	P	I	Pu	Co	A	N	A	Re	A
PBO-BG-1114-1	MD	A	O	Ov	D	MoC	Co	V	Co	A	N	Pr	Re	PPr
PBO-BG-1130-6	MD	A	M	Ov	D	P	E	V	Co	A	Ro	Pr	H	PPr
CHR-4-GTO	D	A	M	L	M	P	E	Am	Co	A	Ro	Pr	H	PPr
CHR-5-GTO	MD	A	M	Ov	D	P	E	V	Co	M	N	Pr	Re	PPr
CHR-7-GTO	MD	A	M	L	D	P	Co	V	Co	D	V	Pr	H	M
CHR-8-GTO	MD	A	O	L	D	P	Co	V	Co	D	N	Pr	Ag	PPr
CHR-10-GTO	MD	A	M	Ov	D	MoC	Co	V	Co	M	Am	Pr	H	PPr
G-SE-PQ	MF	A	M	L	MD	P	E	V	E	MD	Ro	A	Ag	A
VAR-BENITO	D	M	M	L	D	P	Co	V	E	MD	Ma	A	Re	A
CPIT-1-GTO	MD	M	M	L	M	P	Co	V	Co	MD	Ro	A	Re	A
CPIT-2-GTO	MD	M	M	L	M	P	Co	V	Co	MD	Ro	A	Re	A
CPIT-3-GTO	MD	MD	O	L	D	MoC	Co	V	Co	MD	N	A	Re	A
MUL-1-PUE	F	A	M	Ov	D	MC	Co	V	Co	D	Ma	Pr	Ag	MMP
MUL-2-GTO	D	A	O	Ov	D	MoC	E	V	Co	D	Ma	Pr	Ag	MMP
MUL-3-PUE	D	A	O	Ov	D	MoC	E	V	Co	D	Ma	Pr	Ag	MMP
BG-1114-2	MD	A	M	Ov	D	MC	E	V	Co	M	Ro	Pr	H	MMP
CHR-BG-1114-2	MD	A	M	L	M	P	E	V	Co	MF	Am	Pr	H	PPr
CHIANC-1-PUE	MD	A	M	L	M	MoC	Co	V	E	MD	Ma	Pr	Re	MMP
GUAJ-1-GTO	MD	A	O	Ov	M	P	Co	V	Co	M	Ro	A	Re	A
CHI-1-PUE	MD	A	M	L	MD	MoC	Co	V	Co	M	V	A	H	A

Entrenado: ^{IPAN}Intensidad de la pigmentación antocianica; ^{PN}Pilosidad. Hoja: ^{ICV}Intensidad del color verde; ^{FH}Forma; ^{OM}Ondulación del margen; ^{PST}Perfil en sección transversal; ^{PP}Porte del pedúnculo. Fruto: ^{CAM}Color antes de la madurez; ^{PF}Porte; ^{SPPB}Sinuoidad del pericarpio en la parte basal; ^{CM}Color a la madurez; ^{CP}Cavidad peduncular; ^{FA}Forma del ápice; ^{PCP}Profundidad de la cavidad peduncular. ^AAusente; ^PPresente; ^{MD}Muy débil; ^MMedio; ^{MF}Muy fuerte; ^LLanceolada; ^{Ov}Oval; ^{Cl}Claro; ^OOscuro; ^FFuerte; ^DDébil; ^CCóncavo; ^{MC}Muy cóncavo; ^{MoC}Moderadamente cóncavo; ^PPlano; ^IIntermedio; ^{Co}Colgante; ^EErecto; ^{Ma}Marrón; ^{Pu}Púrpura; ^{Am}Amarillo; ^{Ro}Rojo; ^NNaranja; ^VVerde; ^{MPP}Muy poco profunda; ^{PPr}Poco profunda; ^HHundida; ^RRedonda; ^{Ag}Aguda. / Internode: ^{IPAN}Intensity of anthocyanin pigmentation; ^{PN}Hairiness. ^{FH}Leaf: ^{ICV}Green color intensity; ^{FH}Shape; ^{OM}Margin undulation; ^{PST}Cross-sectional profile; ^{PP}Peduncle attitude. Fruit: ^{CAM}Color before maturity; ^{PF}Attitude; ^{SPPB}Pericarp sinuation at basal part; ^{CM}Maturity color; ^{CP}Stalk cavity; ^{FA}Apex shape; ^{PCP}Stalk cavity depth. ^AAbsent; ^PPresent; ^{MD}Very weak; ^MMedium; ^{MF}Very strong; ^LLanceolate; ^{Ov}Oval; ^{Cl}Light; ^ODark; ^FStrong; ^DWeak; ^CConcave; ^{MC}Very concave; ^{MoC}Moderately concave; ^PPlane; ^IIntermediate; ^{Co}Drooping; ^EErect; ^{Ma}Brown; ^{Pu}Purple; ^{Am}Yellow; ^{Ro}Red; ^NOrange; ^VGreen; ^{MPP}Very shallow; ^{PPr}Shallow; ^HDepressed; ^RRound; ^{Ag}Acute.

La pilosidad de los nudos (PN) no se mostró en 68 % de las líneas y fue muy fuerte en chiles jalapeños (Cuadro 1). En hoja, la longitud del limbo osciló entre 2,0 cm (CPIT-1-GTO) y 11,0 cm (CHR-4-GTO), observándose variación entre tipos de chile. Entretanto el ancho del limbo estuvo entre los 3,0 (CHR-3-GTO) y 13,0 cm (CHR-BG-1114-2). La intensidad del color verde (ICV) fue media (68 %) y oscura (28,1 %), solo en CHI-7-GTO fue verde claro (Cuadro 1). La hoja lanceolada se presentó en jalapeños, piteados, chorros y chilacas; mientras que, fue oval en el resto de los tipos. En los cinco tipos de ondulación del margen (OM) identificadas predominó la ondulación débil (50 %); mientras que, en chilacas se registró el nivel fuerte (CHI-1-GTO) y muy fuerte (CHI-2-GTO) (Cuadro 1).

Todas las líneas presentaron abullonado en diferente grado de expresión. El perfil en la sección transversal (PST) fue plano (46 %), moderadamente cóncavo (31 %) y cóncavo en CHI-1-GTO, CHI-2-GTO y CHI-5-GTO (Cuadro 1). El nivel de expresión del brillo fue medio (65,6 %), débil (18,7 %) y fuerte en CHI-10-GTO, CHI-12-GTO, CHR-7-GTO, MUL-2-GTO y MUL-3-PUE. En flor, el porte del pedúnculo (PP) fue colgante (59,3 %), erecto (28,1 %) e intermedio en líneas de chilaca (CHI-1-GTO y CHI-2-GTO) y jalapeño (JALP-1-GTO y JALP-2-GTO) (Cuadro 1). La pigmentación antocianica en la antera se observó en todas las líneas, excepto en CHR-3-GTO (chorro) y CHI-1-PUE (chilaca).

En fruto, el color verde antes de la madurez (CAM) se presentó en 90,6 % de las líneas, amarillo en CHR-3-GTO y CHR-4-GTO, y púrpura en JALP-2-GTO (Cuadro 1). La intensidad del color antes de la madurez fue oscura en líneas de chilaca, poblano, piteado y ancho (40,6 %), clara en CHI-11-GTO, CHR-3-GTO, JALP-1-GTO, CHR-5-GTO, CHR-8-GTO, CHR-10-GTO, BG-1114-2 y CHR-BG-1114-2, medio en JALP-2-GTO, PBO-BG-1114-1, G-SE-PQ, VAR-BENITO, CPIT-3-GTO, MUL-1-PUE, MUL-2-GTO, MUL-3-PUE y GUAJ-1-GTO, muy claro en CHR-4-GTO, y muy oscuro en CHI-12-GTO. La pigmentación antocianica se encontró en todas las líneas, excepto en VAR-BENITO (jalapeño) y GUAJ-1-GTO (guajillo).

Predominó el porte (PF) colgante; solo en JASPIT-1-GTO, G-SE-PQ, VAR-BENITO y CHIANC-1-PUE fue erecto (Cuadro 1). La longitud (LF) varió de 2,5 a 24 cm; los jalapeños y piteados tuvieron una longitud de muy corta (2,5 cm) a media (10 cm), mientras que en chilacas y poblanos la longitud varió de corta (11,0 cm) a grande (20 cm); CHI-8-GTO superó los 20 cm. El diámetro (DF) varió de 4,0 a 8,0 cm. Los frutos de poblano fueron muy anchos (7,5 a 13,5 cm); en cambio, los frutos más angostos (4,5 a 5,5 cm) se observaron en jalapeños y piteados. En 96,8 % de las líneas, la relación longitud-diámetro fue muy pequeña (<1); solo en CHR-3-GTO fue grande (>1).

La forma moderadamente triangular de la sección longitudinal (FSL) fue predominante en 84,4 % de las líneas, acorazonada en VAR-BENITO, circular en CHI-2-GTO y CHI-7-GTO (chilaca), rectangular en CHI-10-GTO (chilaca), y en forma de cuerno en CHR-BG1114-2 (chorro). Tres formas en la sección transversal (FST) fueron identificadas: angular en 56,3 % (chorro y mulato); circular en chilacas (CHI-2-GTO, CHI-5-GTO, CHI-7-GTO, CHI-8-GTO y CHI-1-PUE), jalapeños (JALP-1-GTO y VAR-BENITO), ancho (CHIANC-1-PUE) y guajillo (GUAJ-1-GTO), y elíptica en piteados (CPIT-1-GTO y CPIT-2-GTO) y en chilacas (CHI-9-GTO, CHI-11-GTO y CHI-12-GTO).

La sinuosidad del pericarpio en la parte basal (SPPB) muy débil y débil se observó en 84,4 % de las líneas, y fue media en chilacas (CHI-1-PUE, CHI-2-GTO), chorro (CHR-5-GTO, CHR-10-GTO, BG-1114-2) y guajillo (GUAJ-1-GTO). En cambio, fue muy fuerte en CHR-BG-1114-2, y no se mostró en CHR-3-GTO, CHR-4-GTO, JALPIT-2-GTO, PBO-BG-1114-1 ni PBO-BG-1130-6 (Cuadro 1). La sinuosidad del pericarpio excluida la parte basal (SPEPB) se presentó en todas las líneas; en diecinueve líneas fue débil; muy débil en G-SE-PQ (chorro), VAR-BENITO (jalapeño), CPIT-1-GTO y CPIT-2-GTO (piteados); media en chilacas (CHI-1-GTO, CHI-2-GTO, CHI-8-GTO, y CHI-1-PUE) y un ancho (BG-1114-2); fuerte en chilacas (CHI-5-GTO, CHI-7-GTO y CHI-11-GTO), y muy fuerte en CHR-BG-1114-2.

La textura de la superficie (TS) fue lisa en veintinueve líneas y ligeramente arrugada en CHI-1-GTO, CHI-5-GTO y G-SE-PQ. El color del fruto a la madurez (CM) fue variable: marrón en chilacas, mulatos y un poblano (PBO-BG-1130-6); naranja y rojo en jalapeños; rojo, naranja, verde y amarillo en chorro, y rojo en piteados y

guajillo. La intensidad del color a la madurez fue oscura en 46,8 % de las líneas; media en chilacas (CHI-1-GTO, CHI-2-GTO y CHI-5-GTO), jalapeños (JALP-1-GTO y JALP-2-GTO) y en todos los piteados, y clara en todos los tipos chorro y en un ancho (BG-1114-2).

El brillo fuerte del fruto se mostró en 18 de las 32 líneas. Fue débil en un jalapeño (VAR-BENITO) y en todos los piteados, mulatos, un ancho (CHIANC-1-PUE) y en guajillo; mientras que fue medio en JALP-2-GTO, CHR-7-GTO, G-SE-PQ, BG-1114-2 y CHI-1-PUE. La cavidad peduncular (CP) se observó en chiles poblanos, mulatos, chorros y ancho; no se encontró en chilacas, piteados, jalapeños ni guajillo (Cuadro 1). La profundidad de la cavidad peduncular (PCP) fue muy poco profunda en mulatos y ancho; poco profunda en un poblano (PBO-BG-1114-1) y en chiles chorro (CHR-4-GTO, CHR-5-GTO, CHR-8-GTO, CHR-10-GTO y CHR-BG-1114-2); media en chorro (CHR-3-GTO y CHR-7-GTO), y profunda en un poblano (PBO-BG-1130-6).

La forma del ápice (FA) redonda predominó en chilacas, jalapeños, piteados, anchos y guajillo. En chiles chorro, chilacas (CHI-10-GTO y CHI-1-PUE), un poblano (PBO-BG-1130-6) y un ancho (BG-1114-2) fue hundida; mientras que en mulatos, un chilaca (CHI-12-GTO) y un chorro (CHR-8-GTO) fue aguda. La profundidad de los surcos interoculares (PSI) en chiles chorro (CHR-3-GTO, CHR-4-GTO, CHR-10-GTO y CHR-BG-1114-2), en un jalapeño (JALP-2-GTO), en poblanos (PBO-BG-1114-1 y PBO-BG-1130-6), en un ancho (BG-1114-2) y en los piteados fue muy poco profunda. En cambio, fue poco profunda en CHI-11-GTO, JALP-1-GTO, CHR-7-GTO, CHR-8-GTO y CHI-1-PUE; tuvo profundidad media en CHI-1-GTO, CHI-2-GTO, CHI-5-GTO, CHI-8-GTO, CHI-12-GTO, CHR-5-GTO, MUL-1-PUE, MUL-2-GTO, MUL-3-PUE, CHIANC-1-PUE y GUAJ-1-GTO, y fue profunda en CHI-7-GTO, CHI-9-GTO, CHI-10-GTO, VAR-BENITO y G-SE-PQ.

El número de lóculos (NL) fue de 2 a 3 en 59,4 % de las líneas; mientras que, en CHR-4-GTO, CHR-5-GTO y CHR-10-GTO se observaron cuatro lóculos, y el resto tuvo de 3 a 4 lóculos. El espesor medio de la pulpa (EP) se mostró en 56,2 % de las líneas, fue delgado en chilaca (CHI-1-GTO y CHI-12-GTO), mulato (MUL-1-PUE), chorro (CHR-10-GTO), ancho (CHIANC-1-PUE) y guajillo (GUAJ-1-GTO), y fue grueso en varios tipos de chile (CHI-8-GTO, CHR-3-GTO, JALP-2-GTO, PBO-BG-1130-6, G-SE-PQ, VAR-BENITO, CPIT-1-GTO y CPIT-2-GTO). No hubo capsaicina (CPF) en la placenta del 50 % de las líneas. En cambio, algunas líneas de chilaca (CHI-7-GTO y CHI-11-GTO), piteados (CPIT-1-GTO y CPIT-2-GTO), chorro (CHI-1-GTO, CHR-3-GTO, CHR-4-GTO, CHR-7-GTO, CHR-10-GTO, CHR-BG-1114-2 y G-SE-PQ), ancho (BG-1114-2) y mulato (MUL-1-PUE) sí presentaron capsaicina.

El aspecto del cáliz (AC) fue envolvente en chilacas, guajillo, jalapeños, piteados y ancho; mientras que en poblanos, mulatos y chorro fue no envolvente. La longitud del pedúnculo osciló entre 2 y 7 cm, donde la mayor longitud se presentó en chilacas (CHI-11-GTO) con 7 cm, y la menor (2 cm) en VAR-BENITO (jalapeño), CPIT-1-GTO (piteado) y GUAJ-1-GTO (guajillo). Con la diversificación de características cualitativas observadas en las líneas avanzadas, se definieron 15 caracteres como determinantes para diferenciar tipos y líneas: tallo: 1) IPAN, 2) PN; Hoja: 3) ICV, 4) FH, 5) OM, 6) PST; Fruto: 7) PP, 8) CAM, 9) PF, 10) SPPB, 11) CMF, 12) CP, 13) FA, 14) PCP y 15) NL.

Análisis clúster de las líneas avanzadas de chile

Con las diferencias observadas entre líneas se formaron cinco grupos (Figura 1): I) doce líneas (diez chilacas, un guajillo y un ancho); II) una línea (chorro G-SE-PQ-9); III) trece líneas (siete chorros, dos poblanos, un ancho y tres mulatos); IV) cuatro líneas (tres jalapeños y un piteado) y V) dos líneas de piteado (Cuadro 2).

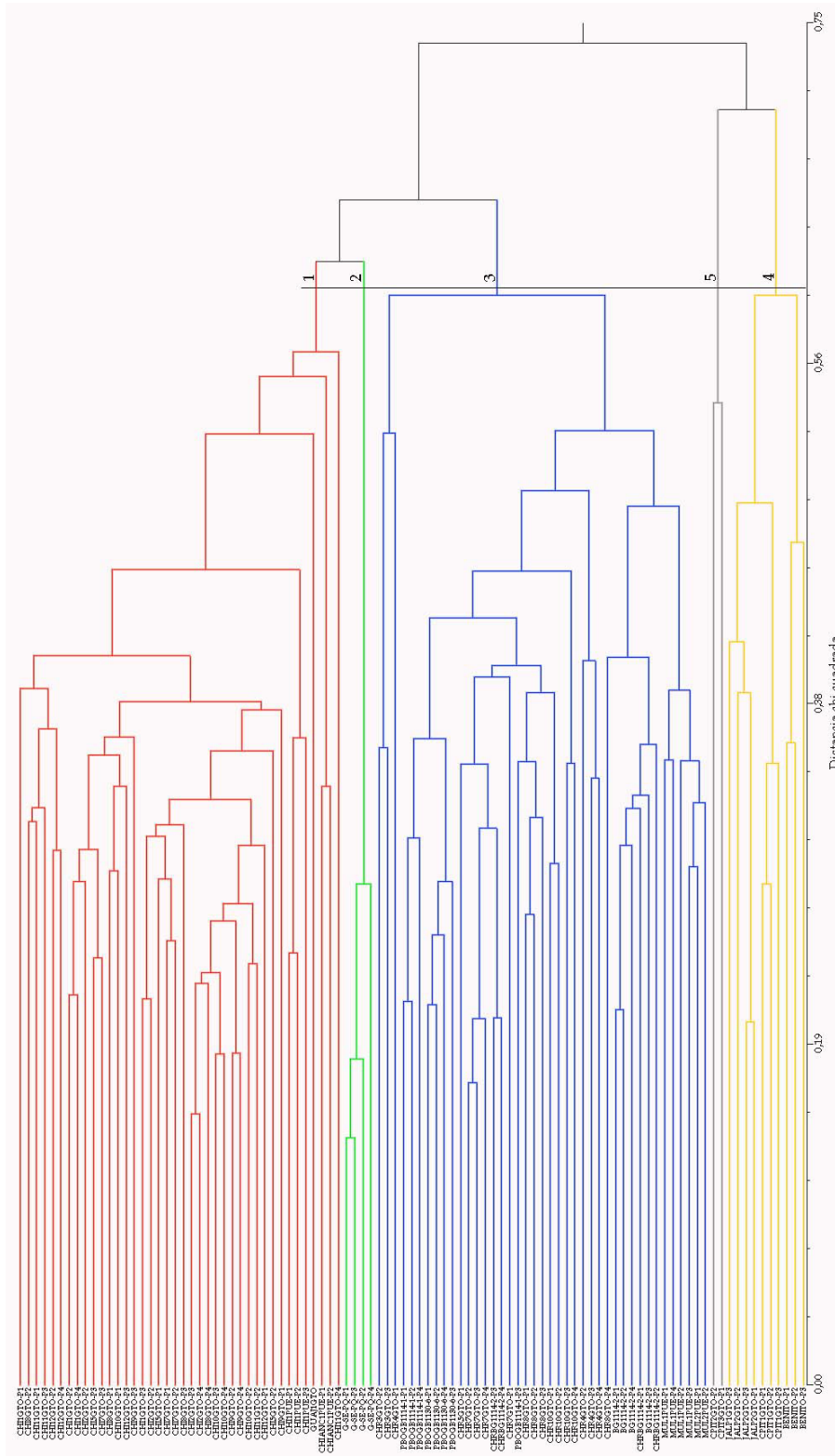


Figura 1. Dendrograma representativo de la disimilaridad morfológica de 32 líneas avanzadas de chile, obtenido mediante la distancia χ^2 y UPGMA (rojo = grupo 1, verde = grupo 2, azul = grupo 3, amarillo = grupo 4 y gris=grupo 5). Primavera-verano, 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Figure 1. Dendrogram showing morphological dissimilarity among 32 advanced pepper lines, obtained through χ^2 distance and UPGMA analysis (red = group 1, green = group 2, blue = group 3, yellow = group 4, and gray = group 5). Spring-summer, 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Cuadro 2. Agrupación de líneas avanzadas de chile con base en la distancia χ^2 y el método UPGMA. Primavera-verano, 2022 y 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Table 2. Classification of advanced pepper lines based on χ^2 distance and the UPGMA method. Spring-summer, 2022 and 2023. Celaya, Guanajuato, Mexico.

Grupos	Número de líneas	Líneas avanzadas
I	12	CHI-1-GTO, CHI-2-GTO, CHI-1-PUE, CHI-5-GTO, CHI-7-GTO, CHI-8-GTO, CHI-9-GTO, CHI-10-GTO, CHI-11-GTO, CHI-12-GTO, CHIANC-1-PUE, GUAJ-1-GTO
II	1	G-SE-PQ
III	13	CHR-3-GTO, CHR-4-GTO, CHRO-5-GTO, CHR-7-GTO, CHR-8-GTO, CHR-10-GTO, PBO-BG-1114-1, PBO-BG-1130-6 MUL-1-PUE, MUL-2- GTO, MUL-3-PUE, BG-1114-2, CHR-BG-1114-2
IV	4	JALPIT-1-GTO, JALPIT-2-GTO, VAR-BENITO, CPIT-1-GTO
V	2	CPIT-2-GTO, CPIT-3-GTO

Las líneas del grupo I presentaron un alto grado de similitud en 28 caracteres: plántula: PAH; planta: porte, LT, EAPS, PAN, IPAN y PN; hoja: abullonado; pedúnculo: PP; flor: PAA; fruto: CAM, ICAM, PAF, PF, LF, DF, RLD, FSL, FST, SPPB, SPEPB, TS, ICMF, CP, PCP, FA, NL y AC. Entretanto el grupo III mostró similitud en 31 caracteres: 26 de los observados en el grupo I (excepto LF y DF), además de NEPFEA, OM, BH, PSI y EP. Los otros caracteres mostraron divergencia en ambos grupos. La TS diferenció a G-SE-PQ de todas las líneas, por lo que se ubicó en el grupo II.

Análisis de correspondencias

El análisis mostró diferencias entre las 32 líneas caracterizadas. Los porcentajes de la varianza obtenidos en cada componente se explican como un porcentaje total de la varianza, de manera que la dimensión 1 (Dim-1) explicó el 27,06 % del total de la diversidad morfológica entre las líneas; mientras que la dimensión 2 (Dim-2) explicó el 12,71 % de esta diversidad, con eigenvalor de 6,49 que decreció gradualmente en los otros coordenantes. Por último, la Dim-3 explicó el 9,28 % de la diversidad.

Las variables más importantes de acuerdo con el vector medido en distancia χ^2 se muestran en el Cuadro 3. La Dim-1 asoció de forma positiva la PCP y de manera negativa el AC. En la Dim-2, la PN se asoció positivamente como la principal fuente de variación de esa dimensión; mientras que, en la Dim-3 la PCF y la IPAN se asociaron de forma positiva, y el CAM de manera negativa.

La agrupación de líneas obtenida del análisis de correspondencias fue similar a la del análisis de conglomerados (Figura 2), por lo que se tomaron los grupos del análisis clúster como referencia. El grupo I mostró una agrupación compacta, principalmente en las coordenadas negativas de las tres dimensiones, que incluyó plantas sin cavidad peduncular o poco profunda, fruto de aspecto envolvente, baja pilosidad de los nudos, presencia de capsaicina, baja intensidad de pigmentación antocianica de los nudos y colores oscuros antes de la madurez, aunque con variaciones en las tres dimensiones.

Cuadro 3. Eigenvectores más altos por tipo de chile obtenidos del análisis de correspondencias. Primavera-verano, 2022 y 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Table 3. Highest eigenvectors by pepper type derived from correspondence analysis. Spring-summer, 2022 and 2023. Celaya, Guanajuato, Mexico.

Carácter	Frecuencia relativa	Distancia χ^2
Pilosidad de los nudos	0,00195	6,49128
Color antes de la madurez (segundo fruto)	0,00340	1,35034
Capsaicina en la placenta (segundo fruto)	0,00790	1,22817
Profundidad de la cavidad peduncular (segundo fruto)	0,00507	1,14353
Intensidad de la pigmentación antocianica de los nudos	0,00435	1,133
Profundidad de la cavidad peduncular (primer fruto)	0,00492	1,11341
Capsaicina en la placenta (primer fruto)	0,00889	1,10734
Color antes de la madurez (primer fruto)	0,00330	1,04911
Presencia de cavidad peduncular (primer fruto)	0,01109	0,79127

* Valor de tabla correspondiente a distancia chi cuadrada (χ^2). / * Table value corresponding to chi square distance (χ^2).

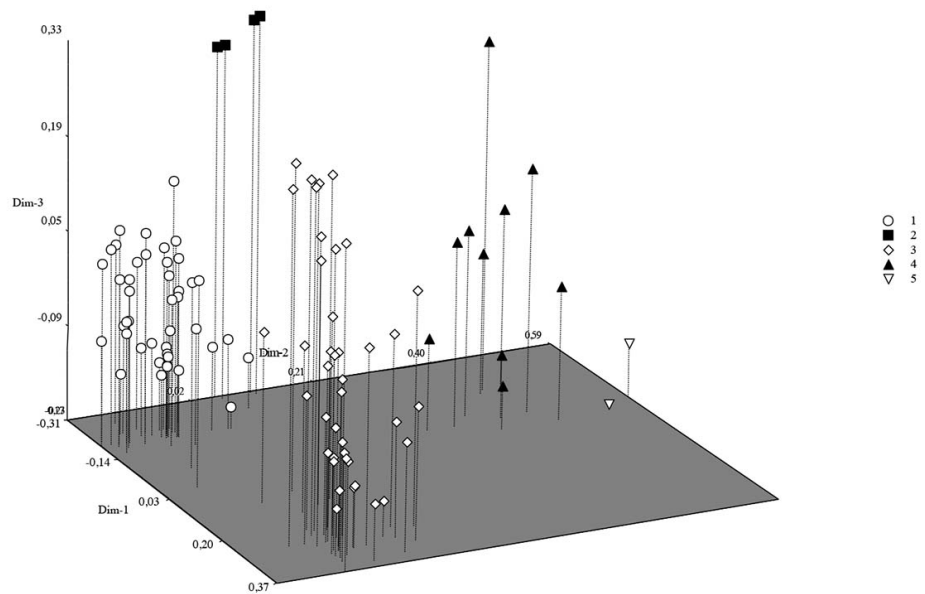


Figura 2. Representación gráfica de la dispersión de 32 líneas avanzadas de chile en tres dimensiones. Primavera-verano, 2023. Celaya, Guanajuato, México.

Figure 2. Three-dimensional scatter plot showing the dispersion of 32 advanced pepper lines. Spring-summer, 2023. Celaya, Guanajuato, Mexico.

El grupo II se localizó en el centro de la Dim-2 (pilosidad media), negativo en la Dim-1 (planta sin cavidad peduncular o poco profunda y fruto de aspecto envolvente) y positivo en la Dim-3 (colores claros antes de la madurez, capsaicina presente e intensidad de pigmentación antociánica de los nudos). El grupo III fue positivo en la Dim-1 (cavidades pedunculares profundas y aspecto envolvente), negativo en la Dim-2 (baja pilosidad de los nudos) y muy variante en la Dim-3 (Figura 2).

El grupo IV estuvo en la parte negativa, aunque cerca del punto medio de la Dim-1 (cavidades pedunculares poco profundas y fruto no envolvente), positivo en la Dim-2 (fuerte pilosidad de los nudos) y negativo en la Dim-3 (capsaicina presente, baja intensidad de pigmentación antociánica de los nudos y color verde antes de la madurez). Finalmente, el grupo V fue similar al IV, pero con valores más altos en la Dim-2 (materiales menos pilosos), positivo en la Dim-1 (sin cavidad peduncular y aspecto no envolvente) y negativo en la Dim-3 (débil intensidad de pigmentación antociánica, capsaicina presente y color verde oscuro antes de la madurez).

Discusión

Las diferencias en caracteres de planta, hoja y fruto observadas en las líneas evaluadas en este estudio evidenciaron la diversidad existente entre líneas y confirmaron que caracteres cuantitativos, como la longitud y ancho de hoja y la longitud del peciolo, y cualitativos, como la pubescencia del tallo y hojas, la forma del fruto y la forma del pedicelo muestran una amplia variación y son de utilidad para distinguir morfotipos y poblaciones (Castellón Martínez et al., 2014; Moreno-Pérez et al., 2011). También revelaron que quince caracteres cualitativos pueden ser determinantes para diferenciar estos tipos de chile.

Como resultado de la caracterización morfológica realizada en las 32 líneas, se evidenció la importancia de emplear las características de tallo (IPAN y PN) y hoja (ICV, FH, OM y PST) en la caracterización varietal de tipos de chile, y no solo enfocarse en caracteres de fruto (CAM, PF, SPPB, CMF, CP, FA, PCP y NL) que han sido empleados en otros estudios (Bozokalfa et al., 2009; Castellón Martínez et al., 2014; Escalera-Ordaz et al., 2019; Singh et al., 2020). Lo anterior, complementado con los caracteres de fruto (PP, CAM, PF, SPPB, CMF, CP, FA, PCP y NL), que en este estudio fueron determinantes y demostraron ser de relevancia como marcadores de los tipos de chile objeto de esta investigación.

Los hallazgos demuestran que los ocho tipos de chile caracterizados tienen caracteres en común en plántula (PAH), tallo (IPAN), flor (PAA), y fruto (PAF). Además, cada morfotipo presentó características propias que los diferencian entre sí (NEPFEA, LL, AL, ICV, PST, BH, LF, DF, CMF, BF, PCP, CPF y LP), las cuales son relevantes en los procesos de selección (Escalera-Ordaz et al., 2019; López-Espinosa et al., 2018; Toledo-Aguilar et al., 2016), y estas características pueden ser conservadas y de utilidad para el desarrollo de materiales mejorados para beneficio de los productores (Castellón Martínez et al., 2014; Ramírez García, 2021).

Los resultados del análisis clúster confirmaron las diferencias y similitudes entre los tipos de chile evaluados. Sin embargo, la clasificación de los tipos de chile en cinco grupos difirió de los ocho de la clasificación morfológica. La principal razón por la cual los chiles chilaca, ancho y guajillo se incluyeron en el grupo I se debe a que comparten características del fruto (PP, PAA, CAM, ICAM, PAF, PF, FSL, FST, SPPB, SPEPB, TS, ICMF, CP, PCP, FA, NL y AC). Lo mismo ocurrió con los chiles chorro, poblanos y mulatos situados en el grupo III. Esta agrupación fue el resultado de los caracteres propios que cada tipo de chile comparte (Aguilar-Meléndez et al., 2009; Alcalá-Rico et al., 2023; Escalera-Ordaz et al., 2019).

La estimación de la contribución de cada línea a la variabilidad en cada coordenada principal permitió identificar seis caracteres poligénicos con valores de mayor distancia positiva en los PCs (Peña-Caballero et al., 2020; Singh et al., 2020). De esta manera, se explica que la variabilidad la determinan los caracteres relacionados con la morfología del tallo (IPAN y PN) y del fruto (CAM, CPF y PCP), que pueden considerarse en los programas de mejoramiento (Cuarán Cuarán et al., 2022).

Conclusiones

La caracterización morfológica mostró que 15 de los 42 caracteres morfológicos evaluados fueron determinantes para denotar diferencias entre los tipos de chiles. El análisis clúster, basado en la similitud de los caracteres, ubicó en el grupo I a los tipos chilaca, ancho y guajillo, y en el grupo III a los tipos chorro, poblano y mulato. La diversidad observada respalda el potencial de las 32 líneas como promisorias para avanzar en procesos de mejoramiento genético.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias para el desarrollo de este trabajo, mediante el proyecto estratégico número SIGI: 16592536649. También agradecen el respaldo de la Universidad de Guanajuato, a través del convenio CIIC 052/2024

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias

- Aguilar-Meléndez, A., Morrell, P. L., Roose, M. L., & Seung-Chul, K. (2009). Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annuum*; Solanaceae) from Mexico. *American Journal of Botany*, 96(6), 1190–1202. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800155>
- Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., López-López, P., Latournerie-Moreno, L., Ramírez-Meraz, M., Villalón-Mendoza, H., & Aguilar-Castillo, J. A. (2010). *Los chiles de México y su distribución* (1.^a ed.). Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura.
- Alcalá-Rico, J. S. G., Ramírez-Meraz, M., Maldonado-Moreno, N., Borja-Bravo, M., Camposeco-Montejo, N., & López-Benítez, A. (2023). Morphological variation in fruits of piquín pepper genotypes (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) from Northeast and Central Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3482>
- Bozokalfa, M. K., Eşiyok, D., & Turhan, K. (2009). Patterns of phenotypic variation in a germplasm collection of pepper (*Capsicum annuum* L.) from Turkey. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(1), 83–95. <https://doi.org/10.5424/sjar/2009071-401>
- Castellón Martínez, E., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chávez-Servia, J. L., & Vera-Guzmán, A. M. (2014). Phenotype variation of chile morphotypes (*Capsicum annuum* L.) native to Oaxaca, Mexico. *Phyton, International Journal of Experimental Botany*, 83, 226–236. <https://doi.org/10.32604/phyton.2014.83.225>
- Cuarán Cuarán, D. A. del P., Jiménez Cardona, J. R., Rojas Pantoja, R. D., Vélez Lozano, J. A., Vallejo Cabrera, F. A., & Caetano, C. M. (2022). Caracterización morfológica y proximal de introducciones de *Capsicum chinense* Jacq. (Solanaceae) para uso en programas de mejoramiento genético. *Magna Scientia UCEVA*, 2(1), 121–132. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n1a12>

- Escalera-Ordaz, A. K., Guillén-Andrade, H., Lara-Chávez, M. B. N., Lemus-Flores, C., Rodríguez-Carpena, J. G., & Valdivia-Bernal, R. (2019). Caracterización de variedades cultivadas de *Capsicum pubescens* en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 23, 239–251. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i23.2024>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.th ed., Vol. 6). Instituto Nacional de Geografía.
- Hernández-Verdugo, S., Dávila-Aranda, P., & Oyama, K. (1999). Síntesis del conocimiento taxonómico, origen y domesticación del género *Capsicum*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 64, 65-84.
- Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. (1995). *Descriptores para Capsicum (Capsicum spp.)*. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnac1679.pdf
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., Luna Ruiz, J. L., D'Eeckenbrugge, G. C., Hijmans, R. J., & Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(17), 6165–6170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- López, L. P. S., & Castro, G. F. H. (1999). *Al rescate de la diversidad del chile (Capsicum spp) en Oaxaca* (Publicación especial). Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca.
- López-Espinosa, S. T., Latournerie-Moreno, L., Castañón-Nájera, G., Ruiz-Sánchez, E., Gómez-Leyva, J. F., Andueza-Noh, R. H., & Mijangos-Cortés, J. O. (2018). Diversidad genética de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante ISSR. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 41(3), 227-236. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.227-236>
- Luna García, L. R., Robledo Torres, V., Ramírez Godina, F., Mendoza Villarreal, R., & Pérez Rodríguez, M. Á. (2021). Selection of F3 populations of *Capsicum annuum* for greenhouse production. *Australian Journal of Crop Science*, 15(3), 438–444. <https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.03.p3046>
- Luna-Ruiz, J. J., Nabhan, G. P., & Aguilar-Meléndez, A. (2018). Shifts in plant chemical defenses of chile pepper (*Capsicum annuum* L.) due to domestication in Mesoamerica. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, Article 48. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00048>
- Moreno-Pérez, E. del C., Avendaño-Arrazate, C. H., Mora-Aguilar, R., Cadena-Iñiguez, J., Aguilar-Rincón, V. H., & Aguirre-Medina, J. F. (2011). Diversidad morfológica en colectas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) del centro-norte de México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 23–30.
- Núñez-Colín, C. A., & Escobedo-López, D. (2011). Uso correcto del análisis clúster en la caracterización de germoplasma vegetal. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 415–427. <https://doi.org/10.15517/am.v22i2.8746>
- Núñez-Colín, C. A., Rodríguez-Pérez, J. E., Nieto-Ángel, R., & Barrientos-Priego, A. F. (2004). Construcción de dendrogramas de taxonomía numérica mediante el coeficiente de distancia χ^2 : una revisión. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10(2), 229-237. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2003.07.046>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Organización Internacional de Normalización. (1993). *ISO 7543-1. Determinación del contenido de capsaicinoides totales-Método HPLC*. Secretaría de Economía.

- Pathirana, R. (2013). Peppers: vegetable and spice capsicums, 2nd edition, by Paul W. Bosland and Eric J. Votava. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 41(2), 102–103. <https://doi.org/10.1080/01140671.2012.745161>
- Peña-Caballero, V., Morales-Vargas, A. T., & Núñez-Colín, C. A. (2020). Eigenanálisis aplicado a diferentes áreas de las ciencias agrícolas y biotecnología: una revisión. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 6, Artículo e0061009. <https://doi.org/10.30973/aap/2020.6.0061009>
- Pérez, G. M., González, H. V. A., Mendoza, C. M. C., & Peña, V. C. (2004). Physiological characterization of manzano hot pepper (*Capsicum pubescens* R & P) landraces. *Journal American Society Horticultural Science*, 129(1), 88–92.
- Ramírez García, A. R. (2021). Caracterización morfológica *in situ* de chiles (*Capsicum* spp.) silvestres y cultivados en la región Usumacinta, Tabasco. *Kuxulkab'*, 27(58), 49–57. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a27n58.3959>
- Raven, P. H., Vuelque, R. F., & Eichhorn, S. E. (2005). *Biología de plantas* (7.^a ed.) Book News, Inc.
- Rivera, A., Monteagudo, A. B., Igartua, E., Taboada, A., García-Ulloa, A., Pomar, F., Riveiro-Leira, M., & Silvar, C. (2016). Assessing genetic and phenotypic diversity in pepper (*Capsicum annum* L.) landraces from North-West Spain. *Scientia Horticulturae*, 203, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.006>
- Rohlf, F. J. (2009). *NTSYS-pc: Numerical taxonomy and multivariate analysis system* (Vol. 2, 2nd ed.). Applied Biostatistics, Inc.
- Santiago-Luna, E. G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chávez-Servía, J. L., Perales-Segovia, C., & Heredia-García, E. (2018). Variation of plant and fruit traits in native Mexican costeño pepper. *Horticultura Brasileira*, 36(3), 399–407. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620180319>
- Sauceda-Acosta, C. P., González-Hernández, V. A., Sánchez-Soto, B. H., Saucedo-Acosta, R. H., Ramírez-Tobías, H. M., & Quintana-Quiroz, J. G. (2017). MACF-II, método automatizado para medir color y área foliar mediante imágenes digitales. *Agrociencia*, 51(4), 409–423.
- Segovia Lerma, A., & Romero Mozqueda, Á. Y. (2014). Mejoramiento genético para rendimiento en chile (*Capsicum annum* L.) para consumo en seco en la región centro-sur del estado Chihuahua, México. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), 320–333. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v2i1.312>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, P., Jain, P. K., & Tiwari, A. (2020). Principal Component Analysis Approach for Yield Attributing Traits in Chilli (*Capsicum annum* L.) Genotypes. *Chemical Science Review Letters*, 9(33), 87–91. <https://doi.org/10.37273/chesci.cs232050121>
- Tapia, C. E., Gutiérrez, E. M. A., Warburton, M. L., Santacruz, V. A., & Villegas, M. A. (2005). Characterization of mandarin (*Citrus* spp.) using morphological and AFLP markers. *Interiencia*, 30(11), 687–693.
- Toledo-Aguilar, R., López-Sánchez, H., López, P. A., Guerrero-Rodríguez, J. de D., Santacruz Varela, A., & Huerta-de la Peña, A. (2016). Diversidad morfológica de poblaciones nativas de chile poblano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1005–1015. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.227>
- Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales. (2006). *Ají, Chile, Pimiento. Código UPOV: CAPSI_ANN. Capsicum annum. Directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad*. <https://www.upov.int/edocs/tgdocs/es/tg076.pdf>