

Evaluación fenotípica de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo condiciones de estrés de sequía y altas temperaturas¹

Iveth Yassmin Rodríguez²

irodriguez@zamorano.edu

Asistente de Investigación

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Universidad Zamorano, Honduras

Timothy Porch

timothy.porch@usda.gov

Fitomejorador

USDA- TARS- Agricultural Research Service

Puerto Rico

James Beaver

j_beaver@hotmail.com

Fitomejorador

Universidad de Puerto Rico

Puerto Rico 00681

Juan Carlos Rosas Sotomayor

jcrosas@zamorano.edu

Profesor Emérito

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Universidad Zamorano, Honduras

Resumen. La sequía, altas temperaturas, y las enfermedades son factores críticos que limitan la producción de las leguminosas de grano, especialmente en países tropicales. El frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) es una leguminosa subutilizada, sin embargo, es altamente nutritiva con características de cocción similar al frijol común y representa una alternativa para enfrentar el cambio climático. El objetivo del estudio fue identificar características fenotípicas asociadas con la tolerancia al estrés por sequía terminal y altas temperaturas en una población de líneas endogámicas recombinantes (RIL) proveniente de la cruce entre las accesiones G40001 × G40022 de frijol tépari. La población RIL se evaluó en condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas en la Estación Experimental de la Universidad de Puerto Rico, Juana Díaz, Puerto Rico, durante los años 2015 y 2016, en un diseño de bloques completos al azar. Se evaluaron los componentes de rendimiento de semilla, índices de partición y características fenológicas. Bajo condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas los días a floración y a madurez fisiológica, vigor, temperatura del dosel, el peso de cien semillas, e índice de cosecha, presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). El peso de cien semillas se correlacionó positivamente con el índice de cosecha de vaina bajo estrés por sequía, y con el rendimiento e índice de cosecha bajo altas temperaturas. Tanto en condiciones de sequía y altas temperaturas el peso de cien semillas presentó una correlación negativa con días a floración y a madurez fisiológica, siendo las líneas precoces las que presentaron mayor rendimiento y peso de cien semillas. Este estudio es un recurso útil para entender la genética del frijol tépari y las características agronómicas que influyen en la adaptación a estrés abiótico; así mismo, para desarrollar estrategias de mejoramiento particularmente para el color y tamaño de la semilla en esta leguminosa de grano.

Palabras clave: Cambio climático, estrés abiótico, genética, rendimiento.

Phenotypic evaluation of tepary beans (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) under drought stress and high temperatures

Abstract. Drought, high temperatures, and disease are critical factors limiting grain legume production, especially in tropical countries. Tepary bean (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) is an underutilized legume, however, it is highly nutritious with cooking characteristics similar to common beans and represents an alternative to face climate change. The objective of the study was to identify phenotypic characteristics associated with tolerance to terminal

¹ Trabajo parcial de IY Rodríguez para optar el título de Maestría en Ciencias en Agricultura Tropical Sostenible, Universidad Zamorano, Honduras.

² Autor para correspondencia.

drought stress and high temperatures in a population of recombinant inbred lines (RIL) from the cross between the G40001 × G40022 accessions of tepary bean. The RIL population was evaluated under drought and high temperatures conditions at the Experimental Station of the University of Puerto Rico, Juana Díaz, Puerto Rico, during the years 2015 and 2016, in a randomized complete block design. Seed yield components, dry partitioning indices and phenological characteristics were evaluated. Significant differences ($P \leq 0.05$) were observed for days to flowering, days to physiological maturity, vigor, canopy temperature, hundred seed weight and harvest index under terminal drought and high temperatures conditions. Hundred seed weight was positively correlated with the pod harvest index under drought stress, and with the yield and harvest index under high temperatures. Hundred seed weight presented a negative correlation with days to flowering and physiological maturity under drought and high temperatures conditions, being the early lines the ones with the highest yield and hundred seed weight. This study is a useful resource for understanding tepary bean genetics and agronomic characteristics that influence adaptation to abiotic stress; likewise, to develop improvement strategies particularly for the color and size of the seed in this grain legume.

Keywords: Abiotic stress, climate change, genetic, yield.

Introducción

El aumento de las temperaturas atmosféricas y la sequía como consecuencia del cambio climático, son factores críticos que limitan la producción de leguminosas a nivel mundial, especialmente en los sistemas agrícolas en países tropicales. Estimaciones actuales sobre el cambio climático, predicen que para el 2100 habrá un incremento de las temperaturas entre 2-6 °C y mayores variaciones en precipitación; dando como resultado cambios en zonas agroecológicas e interrupción en los sistemas de producción de cultivos (Rowlands et al. 2012; IPCC 2007). Es probable que a finales del siglo XXI la temperatura global de la atmósfera exceda 1.5 °C, comparado con el período de 1850 a 1900 para la mayoría de los escenarios (IPCC 2013).

El cambio climático es una amenaza para la seguridad alimentaria, causando mayor variación en los factores abióticos tales como la sequía y las altas temperaturas. Si no se toman medidas de adaptación y transformación de los sistemas agrícolas, muchos de los cultivos serán afectados negativamente resultando en reducciones en rendimiento, especialmente en los países tropicales. Por ello es necesario comprender los mecanismos fisiológicos y genéticos de las plantas para adaptar al estrés y crear estrategias que permitan desarrollar cultivares resistentes a los factores abióticos tales como sequía y altas temperaturas con el fin de desarrollar sistemas de producción más sostenibles. Las características genéticas de una planta determinan su potencial máximo de crecimiento, tasa de fotosíntesis, producción de materia seca, y la forma y naturaleza de sus órganos de almacenamiento. Sin embargo, los factores ambientales como la disponibilidad de agua, la temperatura, fotoperíodo, intensidad de luz y la disponibilidad de nutrientes determinan la medida en que el potencial pueda ser alcanzado (Rao 2001).

La sequía es el segundo factor más importante de reducción en rendimiento, debido a que cerca del 60% de las áreas productoras de frijol a nivel mundial presentan periodos prolongados de sequía (Thung y Rao 1999; Rao 2001). Otro problema asociado a la reducción de rendimiento son las altas temperaturas, se espera que para el 2030 las temperaturas promedio en algunos países de América Latina y África serán ≥ 25 °C, debido a esto, se estima que los siguientes países tendrán pérdidas en áreas de producción de frijol: Malawi (36%), DR Congo (22%), Tanzania (12%), Uganda (8%), Kenya (6%), Nicaragua (68%), Haití (40%), Brasil (30%), Honduras (26%), Guatemala (12%) y México (12%) (Beebe et al. 2012). Estudios recientes predicen que aumentos en temperatura de 3°C para el 2100, generaran una reducción en el área de producción de frijol del 60% en África Sub-sahariana (Rippke et al. 2016).

A consecuencia de que el frijol común esta menos adaptado a condiciones de estrés por sequía y altas temperaturas, el uso de especies relacionadas como progenitores, ha sido una estrategia muy utilizada en los programas de mejoramiento. El frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) es una leguminosa subutilizada que puede servir como fuente de alimento o como grano forrajero. Debido a su alta resistencia a la sequía, maximiza eficientemente el uso de agua (Thomas et al. 1983). Es originario de Mesoamérica, que comprende el suroeste de Estados Unidos y noroeste de México. Se adapta a zonas áridas por su tolerancia a sequía y altas temperaturas, por lo tanto, bajo estas condiciones es más productivo que el frijol común (University of Arizona 1983).

El frijol tépari es un cultivo con alto valor nutritivo, mostrando menor concentración de grasa y alta concentración de sucrosa (Porch et al. 2016). Estudios previos reportaron que el contenido de proteína

de frijol tépari en 100 g de semilla esta entre 21.5-25.3 g (Benitez et al. 1994; Nabhan et al. 1980; Tinsley et al. 1985). El contenido de proteína en la semilla de frijol tépari (24%) y hierro (10.7 mg/100 g) fue comparable con los de frijol blanco pequeño (22.3%, 6.4 mg/100 g), rojo arriñonado (22.5%, 6.7 mg/100 g) y pinto (20.9%, 5.9 mg/100 g), respectivamente (Bhardwaj y Hamama 2004).

El frijol tépari, además de mostrar tolerancia a sequía y altas temperaturas, también ha mostrado resistencia a bacteriosis común, saltahojas y bruchidos (Mejía-Jiménez et al. 1994). En los últimos años se ha seleccionado germoplasma de frijol tépari (TARS-Tep 22 y TARS-Tep 32) con tolerancia a múltiples estreses, incluyendo altas temperaturas, sequía, resistencia a bacteriosis común causada por *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* (*Xap*) y semilla resistente a gorgojos (*Accanthoscelides obtectus* Say y *Zabrotes subfasciatus*) (Porch et al. 2013). El frijol tépari es más tolerante a las enfermedades relacionadas con la sequía y al daño por insectos que el frijol común (Thomas et al. 1983).

Las preferencias locales de una región son las que determinan el consumo de una determinada leguminosa (Broughton et al. 2003). Para frijol tépari el tamaño de la semilla es una de las desventajas que tiene para que sea atractivo al consumidor (Well et al. 1986). La selección masal en las primeras generaciones es un método eficaz para aumentar el peso de la semilla en poblaciones híbridas de frijol tépari (Wells et al. 1986). En experimentos conducidos para evaluar el potencial de rendimiento en frijol tépari, se reportaron que el peso de cien semillas promedio en téparis cultivados varió de 12.6 a 18.8 g (Bhardwaj et al. 2002).

Hay una gran diversidad en color y patrones de color de semilla en frijol tépari incluyendo: blanco, marrón, amarillo, crema, negro, rosado y moteado (Tepary Diversity Panel). El frijol tépari es un cultivo que juega un papel muy importante como cultivo y como donador de características de interés para el frijol común (Porch et al. 2013); Sin embargo, es necesario seguir evaluando germoplasma e identificar características fisiológicas y mecanismos de adaptación a múltiples estreses que sirvan como herramientas de selección para el mejoramiento genético del cultivo y que permitan incrementar la producción de frijol tépari, debido a que es una alternativa dentro de las leguminosas de grano con un alto potencial genético y en la actualidad en Centro América y algunos países de África su producción es muy limitada.

El objetivo del estudio fue identificar características fenotípicas asociadas con la tolerancia al estrés por sequía terminal y altas temperaturas en una población de líneas endogámicas recombinantes (RIL, siglas en inglés) proveniente de la cruce entre las accesiones G40001 × G40022 de frijol tépari.

Materiales y métodos

El material experimental consistió en una población de líneas endogámicas recombinantes (RIL), F5:8, proveniente de la cruce entre las accesiones de frijol tépari G40001 x G40022, evaluada bajo condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas. La accesión G40001 es originaria de Córdova, Veracruz, México, conocida como “frijol Bayo”. Las características morfológicas que presenta la accesión son: semilla de color blanco, peso de 100 semillas en promedio de 12.3 g, hábito de crecimiento voluble y resistente a bacteriosis común. La accesión G40022 es originaria de Pima, Arizona, Estados Unidos, conocida como Ac 2. Entre sus características morfológicas presenta: semilla de color amarillo, peso de 100 semillas promedio de 15.3 g, hábito de crecimiento voluble e inmune a la roya en Puerto Rico (Pastor-Corrales et al. 2011).

Los experimentos de estrés por sequía terminal y altas temperaturas se llevaron a cabo en la Subestación de Fortuna de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico, en Juana Díaz durante 2015 y 2016, respectivamente (Figura 1). La Subestación de Fortuna está ubicada en Juana Díaz, P.R. (18 ° 01'.81"N, 66 ° 31'.713"W, elevación de 23 m) en la costa sur de la isla. El suelo donde se realizaron los experimentos es un molisol, con una mezcla de suelo franco arcilloso ligeramente ácido con alta fertilidad.

Experimentos de estrés por sequía terminal y altas temperaturas

El experimento de estrés de sequía se llevó a cabo durante los meses de diciembre a febrero de 2015, debido a que son los meses de menor precipitación durante el año. Se sembraron 117 RILs (F5:8), los dos padres G40001 y G40022 y un testigo (TARS-Tep 22), en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. La unidad experimental fue un surco de 3 m de largo con 0.76 m entre surco y 0.10 m entre

planta. Se utilizó riego por goteo para asegurar la aplicación uniforme del agua en todo el experimento y a los 18 días después de la siembra (DDS) el riego se suspendió para someter el experimento a condiciones de estrés por sequía terminal.

Para el experimento de altas temperaturas se sembraron 142 RILs ($F_{5,8}$), los dos padres G40001 y G40022 y el testigo TARS-Tep 22. El experimento se sembró en junio de 2016 en un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones. La unidad experimental fue un surco de 3 m de largo con 0.76 m entre surcos y 0.10 m entre plantas. Se utilizó riego por goteo para asegurar la aplicación uniforme del agua en todo el experimento y evitar el estrés hídrico durante el ciclo de cultivo.

Variables evaluadas y análisis estadístico

En ambos experimentos de campo se colectaron datos de características agronómicas incluyendo días a floración (DF), días a madurez fisiológica (DMF), vigor (escala 1-9), índice de cosecha (IC), índice de cosecha de vaina (ICV), rendimiento y componentes de rendimiento. El análisis estadístico para los datos de campo se realizó usando el software estadístico Infostat (2016). Se realizó el análisis de varianza para comparar las medias de las líneas de la población RIL en condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas, usando la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS), con un nivel de probabilidad de $P \leq 0.05$. Se realizaron análisis de componentes principales (ACP), coeficiente de correlación Pearson y análisis de dispersión para identificar líneas con tolerancia a sequía y altas temperaturas.

Resultados

Se registraron los datos de precipitación, temperatura promedio, máxima y mínima diaria durante todo el ciclo del cultivo bajo condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas, durante 2015 y 2016, respectivamente, con la finalidad de asegurar que la población RIL se sometió al estrés abiótico establecido.

Los datos de distribución de lluvia y el agua aplicada por irrigación durante el ciclo de cultivo de la población RIL de frijol tépari en el primer experimento (diciembre a febrero de 2015) indican que fueron insuficientes para un desarrollo fenológico óptimo (Figura 1). Durante el experimento se registraron lluvias esporádicas y el riego se suministró desde la siembra hasta los 18 días después de la siembra (DDS). Hasta la etapa de floración (R6) el experimento había recibido 32 mm y a la madurez fisiológica (R9) 61 mm, y en todo el ciclo un total de 106.7 mm de agua. La temperatura ambiental promedio fue de 25.23 °C, con temperaturas máximas promedios de 30.7 °C y mínimas promedio de 20.7 °C.

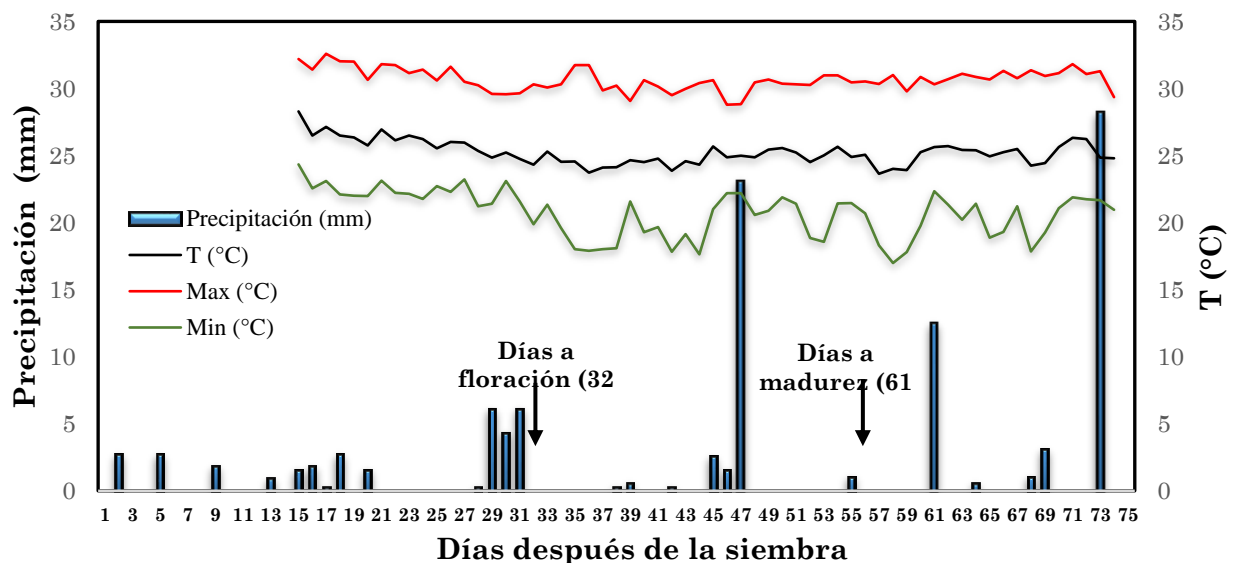


Figura 1. Cantidad de lluvia (mm) y datos de temperatura ambiental promedio, máximas y mínimas (°C) registradas para experimento de estrés por sequía terminal en Juana Díaz, Puerto Rico en 2015. Se indica la lluvia acumulada (mm) hasta los días promedios de ocurrencia de floración y madurez fisiológica.

Durante el período de desarrollo del segundo experimento para estudiar la tolerancia al estrés por altas temperaturas (junio a agosto de 2016) en Juana Díaz, PR, Las temperaturas diarias registradas fueron de 27.9°C en promedio, con temperaturas máximas de 33.1 °C y mínimas de 23.5 °C y la humedad relativa fue de 76% (Figura 2). Estas temperaturas fueron adecuadas para generar estrés por altas temperaturas requeridas para evaluar el comportamiento de la población RIL. Se aplicó riego por goteo durante el desarrollo del cultivo para evitar el estrés hídrico.

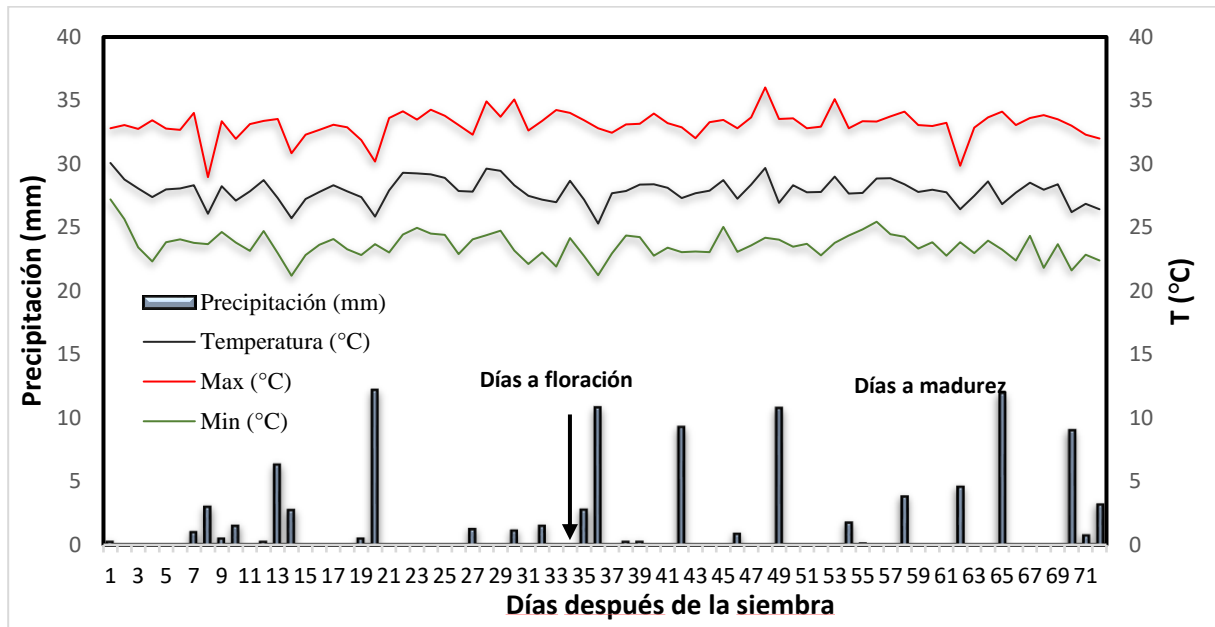


Figura 2. Datos de temperatura ambiental promedio diaria, máxima y mínima (°C) y precipitación (mm) durante el experimento de estrés por altas temperaturas para la población RIL G40001 x G40022 en Juana Díaz, Puerto Rico en 2016. Se indican los días promedio a floración y a madurez fisiológica.

En las condiciones de estrés por sequía terminal se evaluaron 117 RILs y se recolectaron datos de rendimiento, componentes de rendimiento, índices de partición y variables fenológicas. De las 12 variables evaluadas, nueve presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$); para cada variable se comparó el comportamiento de la población RIL respecto a sus padres (G40001 y G40022) utilizando el promedio, rango máximo y mínimo. La población RIL mostró segregación transgresiva con respecto a los padres en cada característica evaluada (Cuadro 1).

Dentro de los componentes de rendimiento se identificaron diferencias estadísticas significativas para biomasa y peso de cien semillas (PCS), el rango de la biomasa de los 117 RIL fue de 2,082 a 5,803 kg ha⁻¹ y el PCS de 10.0 a 16.5 g (Cuadro 1). El análisis de los componentes principales y el coeficiente de correlación de Pearson indican que no hubo correlación entre biomasa y PCS bajo estrés de sequía (Figura 3), sin embargo, si existe correlación negativa entre la biomasa y temperatura del dosel; debido a que algunos genotipos de la población RIL que mostraron mayor rendimiento en biomasa presentaron una menor temperatura del dosel (Cuadro 2).

La temperatura de dosel (TD) se determinó utilizando un vehículo rodante de detección proximal a los 35 y 42 DDS. El vehículo utiliza 4 sensores (SI-111, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) con un radiómetro infrarrojo de precisión que determinan la temperatura superficial de la planta y la temperatura del cuerpo del sensor. Uno de los sensores en cada brazo se colocó en dirección vertical hacia las plantas y el otro con una inclinación de 30 °C, para reducir el margen de error de los datos. Se utilizó un registrador de datos (CR3000, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), para correr el programa y guardar los datos de los sensores de temperatura del dosel a una velocidad de 4 datos por segundo.

Se observaron diferencias significativas para los índices de partición. El índice de cosecha (IC) indica la movilización de la parte aérea (biomasa) de la planta a la formación de semilla y el índice de cosecha de vaina (ICV) indica la movilización de vaina a la formación de semilla. El IC de la población en promedio fue de 39.0% (rango de 22.0 a 75.0%) y el ICV en promedio fue de 79.0% (rango de 72.0 a 83.0%); los padres G40001 y G40022 mostraron 41.0% y 79.0% de IC e ICV, respectivamente. En promedio la población mostró un vigor de 3 (rango de 1.5 a 5.0), utilizando la escala 1-9 (1=excelente, 3=buena, 5=intermedia, 7=pobre, 9=muy pobre). El análisis de componentes principales mostró que los genotipos con mayor PCS fueron los que obtuvieron mayor ICV y fueron más vigorosos, lo cual se traduce a mayor traslocación de foto asimilados a la semilla (Figura 3). Adicionalmente se observó una correlación positiva altamente significativa del PCS con el ICV y el vigor (Cuadro 2).

Cuadro 1. Promedios y rangos de rendimiento de biomasa, semilla y componentes de rendimiento, índices de partición y características fenológicas de 117 líneas endogámicas recombinantes (RIL) y los padres bajo estrés de sequía terminal. Juana Díaz, Puerto Rico, 2015.

Característica	Líneas RIL	G40001 (Padre 1)	G40022 (Padre 2)	P≤0.05
Rendimiento y componentes				
Biomasa (kg ha ⁻¹)	3812.0 (2082.0-5803.0)	4212.0	3148.0	*
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	1462.0 (709.0-2605.0)	1709.0	1230.0	ns
Número de vainas por planta	17.3 (8.8-58.3)	11.8	10.0	ns
Número de semillas por vaina	4.9 (4.0-6.0)	5.0	5.0	ns
Peso de cien semillas (g)	12.0 (10.0-16.5)	10.0	12.0	*
Índices de partición				
Índice de cosecha (%)	39.0 (22.0-75.0)	41.0	41.0	*
Índice de cosecha de vaina (%)	79.0 (72.0-83.0)	79.0	79.0	*
Fenológicas				
Días a floración	32 (28-36)	32	29	*
Días a madurez fisiológica	57 (52-63)	58	57	*
Vigor (1-9)	3.0 (1.5-5.0)	3.0	5.0	*
Temperatura del dosel (35 DDS)	33.2 (30.2-36.6)	32.4	34.0	*
Temperatura del dosel (42 DDS)	30.5 (28.6-33.1)	30.1	30.8	*

*, ns Significativo al P≤0.05 y no significativo. DDS: Días después de la siembra.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson del peso de cien semillas con características fenológicas, índices de partición y temperatura de dosel de 117 RIL evaluadas bajo estrés por sequía terminal. Juana Díaz, Puerto Rico, 2015.

Característica	Correlación (r) con peso de cien semillas	
	Pearson	Probabilidad
Biomasa (kg ha ⁻¹)	0.01	0.8801 ^{ns}
Índice de cosecha	0.13	0.1485 ^{ns}
Índice de cosecha de vaina	0.49	<0.0001 ^{**}
Días a floración	-0.21	0.0214 [*]
Días a madurez fisiológica	-0.29	0.0015 ^{**}
Vigor (escala 1-9)	0.33	0.0002 ^{**}
Temperatura del dosel (35 DDS)	-0.14	0.1465 ^{ns}
Temperatura del dosel (42 DDS)	-0.16	0.0805 ^{ns}

*, **, ^{ns} Significativo al P<0.05, P<0.01 y no significativo, respectivamente.

Para destacar la importancia de la precocidad como un mecanismo de adaptación al estrés de sequía combinado con alto rendimiento, se determinaron los DF y DMF para la población RIL de frijol tépari. El promedio para DF fue de 32 DDS (rango de 28-36 DDS) y para DMF fue de 57 DDS, (rango de 52 a 63 DDS). El progenitor G40022 fue más precoz que G40001 en DF (29) y DMF (57). Se observó que los genotipos más precoces presentaron mayor PCS, demostrándose que existe una correlación negativa entre las características fenológicas con el PCS.

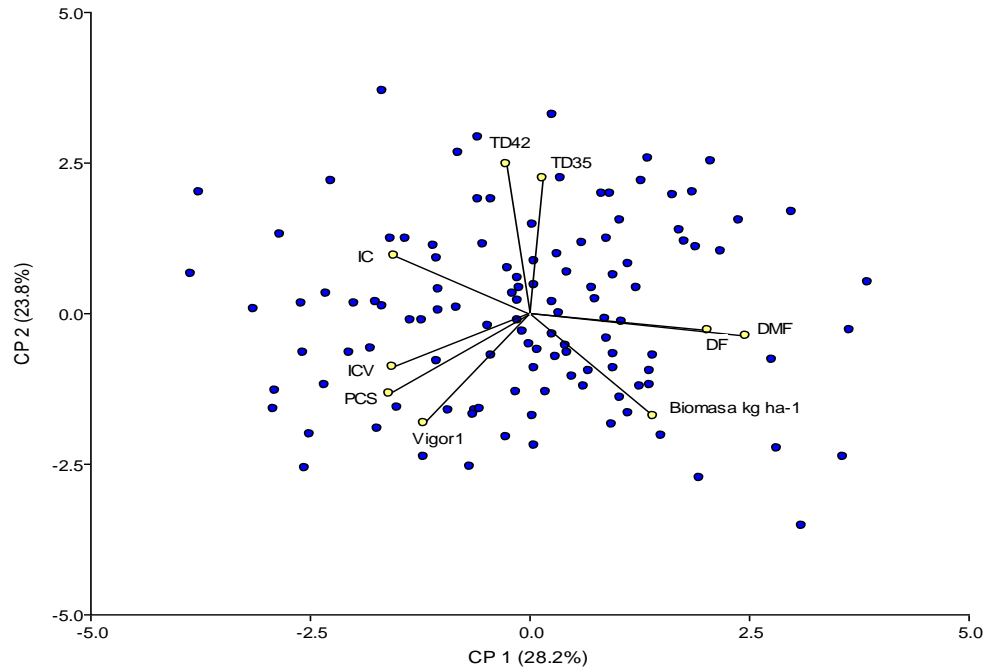


Figura 3. Análisis de componentes principales para biomasa (kg ha⁻¹), peso de cien semillas (PCS), días a floración (DF), días a madurez fisiológica (DMF), índice de cosecha (IC), índice de cosecha de vaina (ICV), vigor y temperatura del dosel (TD, a los 35 y 42 DDS), evaluados en la población RIL de frijol tépari bajo condiciones de estrés por sequía terminal.

Bajo condiciones de estrés por altas temperaturas en el segundo experimento, nueve de las 12 características evaluadas fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3). El rendimiento promedio de la población RIL fue de 1209 kg ha⁻¹ (rango 388 a 2,192 kg ha⁻¹). En general para las características de rendimiento y componentes de rendimiento el parental G40022 fue superior a G40001. En el análisis de componentes principales se observó que las líneas que mostraron mayor rendimiento fueron las más precoces y con más vigor (Figura 4).

Cuadro 3. Promedios y rangos de rendimiento y componentes, índices de partición y características fenológicas de 142 RIL y los padres bajo estrés por altas temperaturas. Juana Díaz, Puerto Rico, 2016.

Característica	Líneas RIL	G40001 (Padre 1)	G40022 (Padre 2)	P ≤ 0.05
Rendimiento y componentes				
Biomasa (kg ha ⁻¹)	4840 (2831.5-6807.5)	5333.8	4480.0	ns
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	1209 (388-2192)	1036.0	1439.0	*
Número de vainas por planta	21.2 (9.8-46.0)	17.5	20.1	*
Número de semillas por vaina	4.7 (3.3-6.0)	5.5	4.1	*
Peso de cien semillas (g)	12.8 (10.1-16.2)	11.3	16.1	*
Índices de partición				
Índice de cosecha (%)	25.0 (10.0-76.0)	22.0	32.0	*
Índice de cosecha de vaina (%)	81.0 (63.0-92.0)	81.0	84.0	ns
Características fenológicas				
Días a floración	34 (32-38)	35	32	*
Días a madurez fisiológica	61 (53-73)	63	56	*
Vigor (1-9)	3.3 (1.7-6.0)	3.0	2.7	*
Temperatura del dosel (35 DDS)	39.3 (36.7-43.3)	39.2	38.7	*
Temperatura del dosel (42 DDS)	35.6 (31.5-39.7)	30.1	30.8	ns

*, ns Significativo al $P \leq 0.05$ y no significativo. DDS: Días después de la siembra.

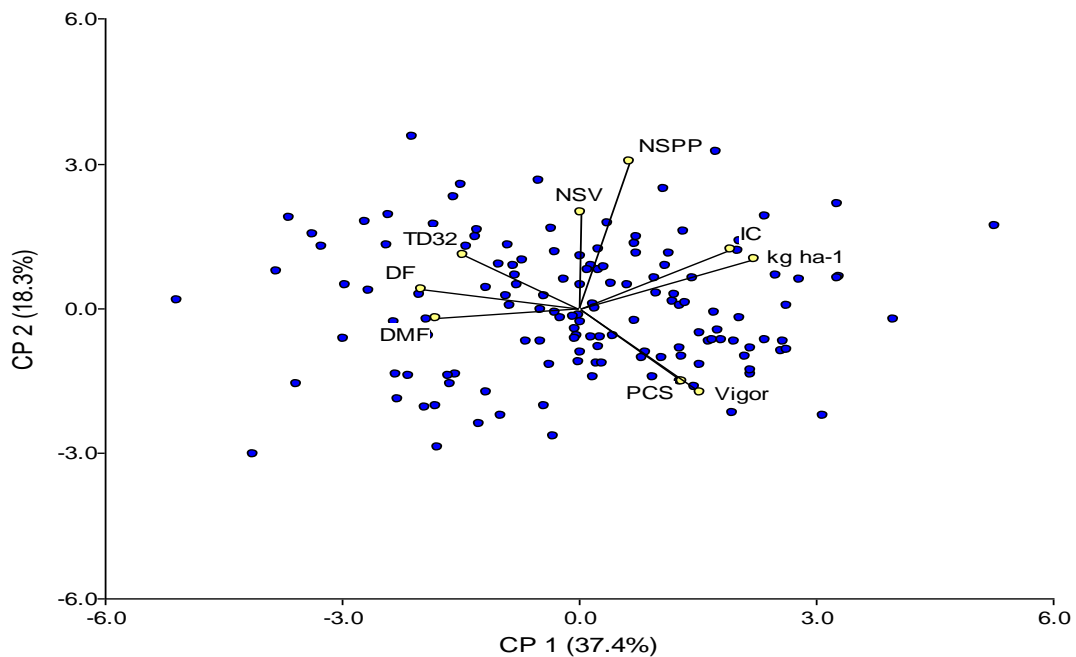


Figura 4. Análisis de componentes principales (CP) para el rendimiento (kg ha⁻¹), peso de cien semillas (PCS), índice de cosecha (IC), vigor, número de semillas por planta (NSPP), número de semillas por vaina (NSV) días a floración (DF), días a madurez fisiológica (DMF) y temperatura del dosel (TD 32) evaluados en la población RIL de frijol tépari bajo condiciones de estrés por altas temperaturas.

El análisis de correlación confirmó que el rendimiento estuvo correlacionado negativamente con los días a floración ($r=-0.49^{**}$) y días a madurez fisiológica ($r=-0.42^{**}$), y positivamente con el vigor ($r=0.43^{**}$), es decir que, a mayor vigor y precocidad, mayor rendimiento (Cuadro 4). A los 32 DDS los datos registrados para TD con el carro de detección proximal fue de 39.3 °C con un rango de 36.7 a 43.3 °C, lo que sugiere que hay mecanismo de regulación de temperatura del dosel para adaptación a altas temperaturas. La población RIL mostró un IC promedio de 25% (rango 10 a 76%), a mayor IC mayor capacidad de movilizar fotoasimilados a la formación de semilla; y G40022 tuvo un mayor IC que G40001. Las líneas con mayor rendimiento también presentaron mayor IC, como lo indica la correlación significativa entre estas características.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento, número de semillas, peso de cien semillas, índices de cosecha y características fenológicas de 142 RIL evaluadas bajo estrés por altas temperaturas. Juana Diaz, Puerto Rico, 2016.

Característica	Correlación (r) con peso de cien semillas	
	Pearson	Probabilidad
Número de semillas por planta	0.51	<0.0001***
Número de semillas por vaina	0.10	0.2417 ^{ns}
Peso de cien semillas	0.37	<0.0001***
Índice de cosecha	0.70	<0.0001***
Días a floración	-0.49	<0.0001***
Días a madurez fisiológica	-0.42	<0.0001***
Vigor (1-9)	0.43	<0.0001***
Temperatura del dosel (32 DDS)	-0.49	<0.0001***

*, ***, ns Significativo a $P<0.0001$ y no significativo.

Se realizó un análisis de dispersión para identificar líneas superiores bajo dos condiciones de estrés, utilizando el peso de cien semillas con indicador de tolerancia a estrés de sequía terminal y altas temperaturas (Figura 5). Considerando que el rendimiento bajo estrés por altas temperaturas está positivamente correlacionado con peso de cien semillas bajo los estreses de sequía terminal ($r=0.33^{**}$) y altas temperaturas ($r=0.40^{**}$), los resultados sugieren que a mayor rendimiento mayor peso de cien semillas, la población RIL mostró segregación transgresiva para estas características comparado con el comportamiento de los padres. Entre los genotipos evaluados, se identificaron las líneas RIL TR146, TR147, TR154, TR162, TR163, TR172, TR208 y TR209 como superiores bajo estrés de sequía terminal y altas temperaturas mostrando mayor PCS y rendimiento, lo que demuestra su adaptación a estas condiciones de estreses abióticos.

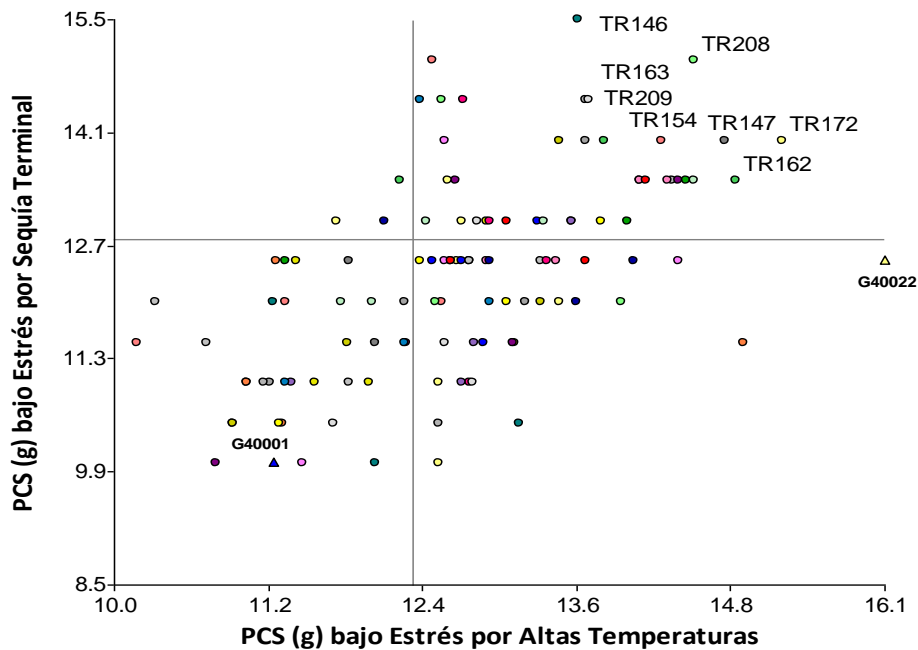


Figura 5. Comparaciones de peso de cien semillas (PCS), de las líneas de la población RIL de frijol tépari, bajo condiciones de estrés por sequía terminal y altas temperaturas durante 2015 y 2016, respectivamente.

Discusión

En el presente estudio, la población de líneas endogámicas recombinantes (RIL) proveniente de la cruce entre G40001 y G40022 fue evaluada para identificar características fenotípicas relacionadas a la tolerancia al estrés de sequía terminal y altas temperaturas. Ambos padres fueron contrastantes para varias características, incluyendo rendimiento de semilla, componentes de rendimiento, características fenológicas e índices de partición. La población RIL mostró segregación transgresiva para las características evaluadas bajo ambos estreses.

En condiciones de estrés de sequía terminal, la cantidad de agua aplicada al cultivo (61 mm de agua hasta madurez fisiológica) fue adecuada para inducir el estrés y evaluar el comportamiento de la población RIL. El frijol tépari desarrolla una raíz principal gruesa y profunda, penetrando rápidamente el suelo para obtener reservas de agua que están limitadas en el suelo (Strock 2017, comunicación personal).

Las altas temperaturas (33.1 °C día /23.5 °C noche), especialmente durante la etapa reproductiva, no afectaron la viabilidad del polen ni el rendimiento en la población RIL de frijol tépari. Por el contrario, el frijol común presenta reducción de rendimiento a temperaturas > 30 °C durante el día y > 20 °C durante la noche. Durante la noche, las altas temperaturas reducen el rendimiento y la calidad de la

semilla de frijol común (Singh 2001; Rainey y Griffiths 2005). En condiciones de altas temperaturas (32/27 °C) el genotipo A55 (frijol común mesoamericano) mostró bajo rendimiento y polen con cambios cualitativos en anteras, polen y arquitectura de la pared del polen (Porch y Jahn 2001).

El rendimiento y PCS son características importantes para seleccionar genotipos con tolerancia a estrés por sequía y por altas temperaturas. Se observó una relación negativa significativa entre PCS con DF y DMF bajo estrés por sequía terminal y un comportamiento similar entre rendimiento y los días a floración y a madurez fisiológica bajo el estrés por altas temperaturas. Estudios previos conducidos bajo estrés por sequía reportan la misma relación (Polania et al. 2016); y los agricultores prefieren genotipos precoces para minimizar la exposición al estrés por sequía (White y Singh 1991; Beebe 2012). Las altas temperaturas por las noches afectan la floración, más que las altas temperaturas durante el día, provocando aborto de flores y vainas. La viabilidad del polen se reduce con deterioro del tubo polínico y una reducción del tamaño de la semilla. Por lo tanto, la adaptación a las altas temperaturas por las noches puede ser un mecanismo de resistencia genotípica (Porch y Jahn 2001; Beebe et al. 2011). En condiciones de altas temperaturas el frijol tépari produce mayores rendimientos que el frijol común (Scully y Waines 1988; Miklas et al. 1994).

En la Universidad de Tolima-Armero en Colombia, durante octubre de 2014, evaluaron bajo condiciones de estrés por altas temperaturas 51 líneas derivadas de cruzamientos interespecíficos entre frijol común y frijol tépari y la línea de germoplasma tépari G40001. Las temperaturas durante la etapa de crecimiento del cultivo fueron de 35°C y 23°C, durante el día y la noche, respectivamente, donde G40001 fue superior en su nivel de tolerancia a altas temperaturas basándose en el rendimiento respecto a frijol común (CIAT 2015).

En el presente estudio se identificó una variación significativa entre las líneas para PCS (10.0 a 16.5 g) con un promedio de 12.0 g. En condiciones de estrés de sequía terminal ambos padres mostraron menor PCS que en condiciones de altas temperaturas. Estudios previos reportan que el tamaño pequeño de la semilla de frijol tépari es una de las desventajas que posee para que sea atractiva para el consumidor (Wells 1986). Otros estudios han demostrado que en condiciones de estrés de sequía se reduce el tamaño de semilla (Singh 1995, 2007). Desde hace algunos años se han realizado esfuerzos para mejorar el tamaño de semilla (Wells et al. 1986); y para frijol tépari domesticado se ha logrado alcanzar un PCS promedio de 12.6 a 18.8 g (Bhardwaj et al. 2002). El PCS es una característica importante, debido a que en condiciones de estrés por sequía se reduce el tamaño de la semilla; por lo tanto, una semilla con mayor tamaño indica tolerancia a sequía y conduce a mayores rendimientos (Ramírez-Vallejo y Kelly 1998).

En condiciones de estrés por sequía terminal, la biomasa ($r=-0.41^{**}$) se correlacionó negativamente con IC. Estudios recientes han reportado que el rendimiento en *P. acutifolius* no está relacionado con la acumulación de biomasa, sino con la capacidad que tiene de movilizar fotosintatos a la formación de granos (Rao et al. 2013). Se observó una variación amplia para el IC e ICV; y el PCS e ICV están correlacionados positivamente bajo estrés de sequía terminal. El ICV indica la movilización fotosintética de la vaina a la semilla. La pared de la vaina es la fuente de carbono para la semilla en desarrollo (Turner et al. 2005). Ambos padres presentaron un IC de 41% e ICV de 79%, lo que indica la capacidad de estos genotipos de translocar fotoasimilados a la formación de semilla y la herencia de estas características demostrada en un grupo de RIL superiores a ambos padres. Estudios previos han reportado que el frijol tépari es superior al frijol común, considerando varias características deseables (IC, índice de partición de vainas e ICV) que contribuyen a un mayor grado de adaptación al estrés por sequía terminal (Rao et al. 2013). El genotipo G40001 (*Phaseolus acutifolius*) es definido como un “ahorrador de agua” (Polania et al. 2016) y presenta características relacionadas a la tolerancia a sequía como la habilidad de partición de materia seca al grano, sistema de raíces finas, hojas pequeñas para reducir el uso de agua y reducción de conductancia estomática (Mohamed et al. 2005; Butare et al. 2011; Rao et al. 2013; Beebe et al. 2014). Sin embargo, en el frijol tépari el mecanismo de evitar la sequía, no se debe necesariamente a un ajuste osmótico, sino a la preexistencia de un potencial osmótico bajo en la célula que permite la sensibilidad en la apertura y cierre de estomas, acompañado de un sistema radical extenso, manteniendo un alto potencial de agua en las hojas (Markhart 1985; Mohamed 2006).

Los genotipos RIL que mostraron menor días a floración y días a madurez fisiológica tuvieron mayor rendimiento, PCS, IC e ICV; indicando la correlación negativa entre características fenológicas, días a

floración, días a madurez fisiológica y los componentes de rendimiento e índices de partición. La precocidad es un mecanismo de escape a estrés por sequía (Levitt 1972). Mayor (2010) reportó resultados similares demostrando que los genotipos más productivos fueron los que presentaron menores días a floración y a madurez fisiológica.

Se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre las líneas de la población RIL para la temperatura del dosel bajo estrés por sequía terminal y estrés por altas temperaturas. Bajo estrés por altas temperaturas, la temperatura del dosel se correlacionó negativamente con el rendimiento, lo que significa que las líneas con mayor rendimiento presentaron una menor temperatura del dosel. La magnitud del estrés por altas temperaturas depende de la intensidad de la temperatura, duración de la exposición y la tasa de incremento, debido a que las plantas tienen cierta capacidad de aclimatarse, pero cuando los aumentos en la temperatura son rápidos pueden ser más perjudicial para la planta. El desarrollo vegetativo disminuye cuando la fotosíntesis del dosel de la planta se reduce debido al estrés por calor. Si una planta se expone por un tiempo suficiente a un umbral máximo de temperatura el sistema fotosintético se daña de tal manera que la velocidad de absorción de CO₂ se reduce sustancialmente y el daño es irreversible (Porch y Hall 2013).

Conclusiones

Se identificaron características en la población de líneas endogámicas recombinantes (RIL) de frijol tépari, asociadas a la tolerancia a estrés por sequía terminal y altas temperaturas que estuvieron correlacionadas positivamente con rendimiento y PCS, incluyendo el índice de cosecha, índice de cosecha de vaina, número de semillas por planta y vigor. Dentro de la población se identificaron las líneas TR146, TR147, TR154, TR162, TR163, TR172, TR208 y TR209 como superiores bajo estrés de sequía terminal y altas temperaturas mostrando mayor PCS y rendimiento.

Este estudio es un recurso útil para entender la genética del frijol tépari y las características agronómicas que influyen en la adaptación a estreses abióticos; así mismo, para desarrollar estrategias de mejoramiento particularmente para el color y tamaño de la semilla en esta leguminosa de grano.

Los resultados de varios estudios demuestran que existe alto nivel de colinealidad entre frijol tépari y frijol común, los que permiten destacar que el frijol tépari sea un cultivo importante como fuente donadora de genes para mejorar la adaptación del frijol común o como un cultivo domesticado.

Literatura citada

- Beebe SE. 2012. Common bean breeding in the tropics. *Plant Breeding Reviews*. 36: 357–426. DOI:10.1002/9781118358566.ch5.
- Beebe SE, Ramirez J, Jarvis A, Rao IM, Mosquera G, Bueno JM, Blair MW. 2011. Genetic improvement of common beans and the challenges of climate change. In: *Crop Adaptation to Climate Change / Shyam Singh Yadav, Robert Redden, Jerry L. Hatfield, Hermann Lotze-Campen, Anthony Hall*. John Wiley & Sons, Inc, Oxford, GB. 356-369. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470960929.ch25>.
- Beebe SE, Rao IM, Mukankusi C, Buruchara R. 2012. Improving resource use efficiency and reducing risk of common bean production in Africa, Latin America, and the Caribbean. In: Hershey, Clair H. (ed.). *Eco-Efficiency: From vision to reality*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. 18 p. DOI: <https://hdl.handle.net/10568/55608>.
- Beebe SE, Rao IM, Blair MW, Acosta-Gallegos JA. 2013. Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*. 4:35. DOI=10.3389/fphys.2013.00035.
- Benitez MA, Grijalva MI, Valencia ME. 1994. Total and soluble iron content and effect of certain inhibitors present in selected varieties of tepary bean (*Phaseolus acutifolius*). *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 42 (6):1300–1302. DOI: 10.1021/jf00042a009.
- Bhardwaj HL, Rangappa M, Hamma A. 2002. Planting date and genotype effects on Tepary bean productivity. *Horticulture Science*. 37 (2):317-318.
- Bhardwaj H. L and Hamama AA. 2004. Protein and mineral composition of tepary bean seed. *Horticultural Science*. 39 (6):1363-1365.
- Broughton WJ, Hernandez G, Blair M, Beebe SE, Gepts P, Vanderleyden J. 2003. Beans (*Phaseolus* spp.)-Model food legumes. *Plant and Soil (Netherlands)*. 252: 55–128.
- Butare L, Rao IM, Lepoivre P, Polania J, Cajiao C, Cuasquer J, Beebe SE. 2011. New genetic sources of resistance in the genus *Phaseolus* to individual and combined aluminium toxicity and progressive soil drying stresses. *Euphytica*. 181:385–404. DOI: 10.1007/s10681-011-0468-0.

- CIAT. 2015. Developing beans that can beat the heat. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (CIAT). 12p. Disponible en <https://hdl.handle.net/10568/61841>.
- InfoStat. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levitt J. 1972. Responses of Plants to Environmental Stresses. New York, NY: Academic Press. 177:698. DOI: 10.1126/science.177.4051.786-a.
- Mayor Duran VM. 2010. Evaluación de líneas de frijol común andino (*Phaseolus vulgaris*) provenientes de cruza intra/intercervo para tolerancia a sequía. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Tesis M.Sc. Ciencias Agrarias. 95p.
- Mejía-Jiménez A, Muñoz C, Jacobse HJ, Roca WM, Singh SP. 1994. Interspecific hybridization between common and tepary beans: increased hybrid embryo growth, fertility, and efficiency of hybridization through recurrent and congruity backcrossing. Theor Appl Genet. 88: 324-331.
- Miklas PN, Rosas JC, Beaver JS, Telek L, Freytag GF. 1994. Field Performance of Select Tepary Bean Germplasm in the Tropics. Crops Science. 34:1639-1644.
- Mohamed MF, Schmitz-Eiberger N, Keutgen N, Noga G. 2005. Comparative drought postponing and tolerance potentials of two tepary bean lines in relation to seed yield. African Crop Science Journal. 13 (1): 49–60.
- Nabhan G, Berry J, Anson C, Weber C. 1980. Papago Indian floodwater fields and tepary bean protein yields. Ecology of Food Nutrition. 10 (2): 71–78. DOI: 10.1080/03670244.1980.9990621.
- Pastor-Corrales MA, Steadman JR, Urrea CA, Blair MW, Venegas JP. 2011. The domesticated tepary bean accession G40022 has broader resistance to the highly variable bean rust pathogen than the known rust resistance genes in common bean. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. 54:124-125.
- Polania JA, Poschenrieder C, Beebe S, Rao IM. 2016. Effective Use of Water and Increased Dry Matter Partitioned to Grain Contribute to Yield of Common Bean Improved for Drought Resistance. Frontier in Plant Science. 7:660. DOI: 10.3389/fpls.2016.00660.
- Porch TG and Jahn M. 2001. Effects of high-temperature stress on microsporogenesis in heat-sensitive and heat-tolerant genotypes of *Phaseolus vulgaris*. Plant, Cell and Environment. 24 (7): 723-731.
- Porch TG, Beaver JS, Brick MA. 2013. Registration of tepary germplasm with multiple-stress tolerance, TARS-Tep 22 and TARS-Tep 32. Journal of Plant Registrations. 7:358-364.
- Porch TG and Hall AE. 2013. Heat tolerance. En C. Kole (ed.), Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops. Verlag Berlin Heidelberg: Springer. 2: 167-202.
- Porch TG, Cichy K, Wang W, Brick M, Beaver JS, Santana D, Grusak MA. 2016. Nutritional composition and cooking characteristics of tepary bean (*Phaseolus acutifolius* Gray) in comparison with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Genetic Resources and Crop Evolution. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0413-0>.
- Rainey KM and Griffiths PD. 2005. Evaluation of *Phaseolus acutifolius* A. Gray plant introductions under high temperatures in a controlled environment. Genetic Resources and Crop Evolution. 52:117-120.
- Ramirez-Vallejo P and Kelly JD. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. Euphytica. 99:127–136. doi:10.1023/A:101835320001.
- Rao IM. 2001. Role of physiology in improving crop adaptation to abiotic stresses in the tropics: The case of common bean and tropical forages. In: M. Pessarakli (Ed.), Handbook of Plant and Crop Physiology. 583–613.
- Rao IM, Beebe SE, Polania JA, Ricaurte J, Cajiao C, García R, Rivera M. 2013. Can tepary bean be a model for improvement of drought resistance in common bean? African Crop Science Journal. 21: 265–281.
- Rippke U, Ramirez-Villegas J, Jarvis A, Vermeulen SJ, Parker L, Mer F, Diekkruger B, Challinor AJ, Mark Howden M. 2016. Timescales of transformational climate change adaptation in sub-Saharan African agriculture. Nature Climate Change.

- Rodríguez Y, Porch T, Beaver J, Rosas-Sotomayor. 2021. Evaluación fenotípica de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo condiciones de estrés de sequía y altas temperaturas. *Ceiba. Zamorano Investiga*: 52–64.
- Rowlands DJ, Frame DJ, Ackerley D, Aina T, Booth BBB, Christensen C, Collins M, Faull N, Forest CE, Grandey BS, Gryspeerdt E, Highwood EJ, Ingram WJ, et al. 2012. Broad range of 2050 warming from an observationally constrained large climate model ensemble. *Nature Geoscience*. 5: 256–260.
- Scully B and Waines JG. 1988. Ontogeny and yield response of common and tepary beans to temperature. *Agronomy Journal*. 80:921-925.
- Singh SP. 1995. Selection for water-stress tolerance in interracial populations of common bean. *Crop Science*. 35: 118–124.
- Singh SP. 2001. Broadening the Genetic Base of Common Bean Cultivars: A Review. *Crop Science*. 41:1659-1675.
- Singh SP. 2007. Drought resistance in the race Durango dry bean landraces and cultivars. *Agronomy Journal*. 99: 1219–1225. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0301>.
- Thung M, Rao IM. 1999. Integrated management of abiotic stresses. In Singh, S. P. (ed) *Common Bean Improvement in the Twenty-First Century*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 331-370.
- Thomas CV, Manshardt RM, Waines JG. 1983. Teparies as a source of useful traits for improving common beans. In: Crosswhite, F. S (ed). *Desert Plants*. 5 (1):43-48.
- Tinsley AM, Scheerens JC, Alegbejo JO, Adan FH, Krumhar KC, Butler LF, Kopplin MJ. 1985. Tepary beans (*Phaseolus acutifolius* var *latifolius*) a potential food source for African and Middle Eastern cultures. *Plant Foods Human Nutrition*. 35:87-101. <https://doi.org/10.1007/BF01092124>.
- Turner NC, Davies SL, Plummer JA, Siddique KHM. 2005. Seed filling in grain legumes under water deficits, with emphasis on chickpeas. *Advances in Agronomy*. 87: 211–250. DOI:10.1016/S0065-2113(05)87005-1.
- University of Arizona. 1983. The desert tepary as a food resource. *Desert plants*. 5 (1).
- Wells WC, Stockinger EJ, Waines JG. 1986. Variation for seed size in tepary beans. *Bean Improvement Cooperative*. 20: 113.
- White JW, Singh SP. 1991. Sources and inheritance of earliness in tropically adapted in determinate common bean. *Euphytica*. 55: 15–19.

Recibido Octubre 15, 2021; aceptado noviembre 10, 2021.

Cómo citar: Rodríguez IY, Porch TG, Beaver JS, Rosas-Sotomayor JC. 2021. Evaluación fenotípica de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo condiciones de estrés de sequía y altas temperaturas. *Ceiba. Zamorano Investiga*: 52–64.