

VARIABILIDAD EN CARACTERÍSTICAS MORFO-FISIOLÓGICAS DEL FRIJOL COMÚN BAJO SEQUÍA TERMINAL

VARIABILITY IN MORPHO-PHYSIOLOGICAL TRAITS OF COMMON BEAN UNDER TERMINAL DROUGHT

Celia Selene **Romero-Félix**^{1*}, Cándido **López-Castañeda**², Josué **Kohashi-Shibata**³, Carlos Gustavo **Martínez-Rueda**⁴, Salvador **Miranda-Colín**², Víctor Heber **Aguilar-Rincón**²

¹Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, ²Recursos Genéticos y Productividad-Genética, ³Botánica. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Montecillo, 56230 México. (celiaromero82@hotmail.com). ⁴Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca. 50200 México.

RESUMEN

La sequía terminal causa reducciones severas en la acumulación de materia seca y desarrollo del dosel vegetal del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la sequía terminal en la expansión del área foliar (AF), acumulación de peso seco en la parte aérea (PSPA) y raíces (PSR), y eficiencia transpiratoria (ET) en condiciones controladas. La hipótesis fue que la sequía terminal disminuye acumulación de biomasa en parte aérea, pero aumenta peso de raíz y eficiencia transpiratoria. En un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en riego (R) y tres en sequía terminal (S) se incluyeron 12 genotipos. Una dosis de fertilización de 80-40-00 se utilizó. La condición de sequía terminal disminuyó el AF 17-24%, 40-59% y 63-79% en la floración, periodo de llenado de la semilla y madurez fisiológica (MF). La S también redujo 33 y 26% el PSPA y la biomasa total de la planta (BM), mientras el peso seco total de raíces (PSTR), cociente raíz/parte aérea y la ET fueron 53, 67 y 58% mayores en sequía que en riego. La proporción mayor de raíces se produjo en el estrato de 0-20 cm (R=50.6% y S=54.7%). El PSR disminuyó en los estratos inferiores del suelo: 20-40 (R=29.5%; S=26.4%), 40-60 (R=14.1%; S=11.9%), 60-80 (R=5.8%; S=5.2%) y 80-100 cm (sólo en S=1.8%). Las variedades FM M38, FM Sol y FM RMC mostraron un comportamiento mejor en la mayoría de los caracteres evaluados en las plantas. Por lo tanto, se pueden utilizar como líneas parentales en programas de fitomejoramiento.

ABSTRACT

Terminal drought leads to severe reductions in the dry matter and development of the canopy of common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). The aim of this study was to determine the effect of terminal drought on the expansion of the foliar area (AF), the accumulation of dry weight in the aerial section (PSPA) and roots (PSR), and transpiratory efficiency (ET) under controlled conditions. The hypothesis was that terminal drought reduces the accumulation of the biomass in the above ground section (shoot) but increases the root weight and transpiratory efficiency. In a random complete block design with three repetitions in irrigation (R) and three under terminal drought (S), 12 genotypes were included. One 80-40-00 dose of fertilization was used. The terminal drought condition reduced AF 17-24%, 40-59% and 63-79% in flowering, seed-filling period and physiological maturity (MF). The S also reduced PSPA and total plant biomass (BM) by 33 and 26%, whereas the total dry weight of roots (PSTR), the root/shoot ratio and ET were 53, 67 and 58% higher in drought than in irrigation. The highest proportion of roots was produced in the 0-20 cm layer (R=50.6% y S=54.7%). PSR decreased in the lower levels of the soil: 20-40 (R=29.5%; S=26.4%), 40-60 (R=14.1%; S=11.9%), 60-80 (R=5.8%; S=5.2%) and 80-100 cm (only in S=1.8%). Varieties FM M38, FM Sol and FM RMC showed a better behaviour in most of the traits evaluated in plants. Therefore, they can be used as parental lines in plant breeding programs.

Key words: *Phaseolus vulgaris*, foliar area, transpiration efficiency, shoot dry weight, root dry weight, total biomass.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8336-447X>

Recibido: abril, 2020. Aprobado: septiembre, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 55: 471-485. 2021.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, área foliar, eficiencia transpiratoria, peso seco de la parte aérea, peso seco de raíces, biomasa total.

INTRODUCCIÓN

La sequía terminal reduce severamente el crecimiento y la expansión del área foliar del frijol, sobre todo cuando coincide con las etapas de floración y llenado de la semilla del frijol común. El efecto del déficit hídrico del suelo en la planta puede mitigarse, si el genotipo posee caracteres de tolerancia a sequía terminal y patrones de uso de la humedad que le permitan mantener la actividad fisiológica y el estatus hídrico del área fotosintética. El patrón de extracción de agua contribuye a la determinación del rendimiento en cultivos con limitaciones de humedad edáfica, en particular en aquellos de hábito indeterminado como el frijol común. En esta especie el mantenimiento de la transpiración y la fijación de CO₂ durante el periodo de llenado de la semilla son cruciales para el rendimiento (Zaman-Allah *et al.*, 2011).

La disminución en el alargamiento de los órganos del dosel de la planta en un suelo en proceso de sequía puede tener su origen en una reducción de la capacidad de absorción de agua y la disminución en la tasa de producción de células. La reducción en el crecimiento del área foliar puede ocurrir sin cambios en el estatus hídrico o la conductancia estomática de la hoja (Munns y Sharp, 1993). La reducción en el potencial de turgencia causa pérdida de humedad en el tejido foliar y afecta de modo directo algunos procesos fisiológicos y morfológicos como expansión de hojas, conductancia estomática y tasa de fotosíntesis (Riboldi *et al.*, 2016). El déficit hídrico del suelo inicia efectos negativos sobre los procesos de transpiración y fotosíntesis, relaciones hídricas, desarrollo del área foliar, floración, diferenciación y establecimiento de los órganos reproductores, cuando el suelo alcanza un punto crítico en el contenido hídrico. En frijol común, incluso antes de alcanzar el porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) en un suelo. Este punto crítico puede variar en dependencia de los procesos de crecimiento y desarrollo, porque la velocidad de la actividad de la planta disminuye de manera considerable (Pang *et al.*, 2017).

A nivel del sistema radical, la respuesta de la planta al estrés por sequía puede diferir entre especies

INTRODUCTION

Terminal drought drastically reduces the growth and expansion of the foliar area of common bean plants, particularly when it coincides with the stages of flowering and seed filling of the common bean. The effect of the water deficit in the soil on the plant may be mitigated if the genotype has traits for tolerance to terminal drought and patterns of water use that can help it to maintain physiological activity and the water status of the photosynthetic area. The water extraction pattern contributes to yield determination in crops with limitations in soil humidity, particularly those with undetermined habits, such as the common bean. In this species, the maintenance of transpiration and CO₂ fixation during the period of the seed filling are crucial for yield (Zaman-Allah *et al.*, 2011).

The reduction in the elongation of the above ground organs of the plant in a drought process may be due to a reduction in the capacity of water absorption and the reduction in the cell production rate. The reduction in the growth of the foliar area may take place without changes in the water status or the stomatal conductance of the leaf (Munns and Sharp, 1993). A decrease in the turgor pressure causes losses in water content in the foliar tissue and directly affects some physiological and morphological processes such as leaf expansion, stomatal conductance and photosynthesis rate (Riboldi *et al.*, 2016). The deficit in soil humidity triggers negative effects on the processes of transpiration and photosynthesis; hydric relations; development of the foliar area; flowering and differentiation; and establishment of reproductive organs when the soil reaches a critical scarce point in the water content. In the common bean, this takes place even before reaching the permanent wilting point (PMP) in the soil. This critical point may vary, depending on the growth and development processes, since the speed of the activities of the plant drops considerably (Pang *et al.*, 2017).

In terms of the root system, the response of the plant to stress may differ among species (Lynch, 2013) and within species (López-Hernández *et al.*, 2018). Drought resistance is related to root growth traits and the above ground organs in the plant. Drought-resistant genotypes in common bean develop vigorous and deep root systems, improved

(Lynch, 2013) y dentro de especies (López-Hernández *et al.*, 2018). La resistencia a sequía se relaciona con los caracteres de crecimiento de las raíces y los órganos aéreos de la planta; los genotipos resistentes a sequía en frijol común desarrollan sistemas radicales vigorosos y profundos, mejor crecimiento de la parte aérea con índice de cosecha alto, cantidad mayor de semillas e incremento en la capacidad de movilización de asimilados a las vainas y las semillas (Polania *et al.*, 2017a). También se relacionan con porcentaje mayor de vainas normales y aumentos en peso seco y en la proporción raíz:parte aérea de las plantas (Sofi *et al.*, 2019). Otros caracteres de las raíces relacionados con la resistencia a sequía en frijol son diámetro de raíz mayor para absorción de agua y raíces más finas para adquisición mayor de nitrógeno (Barrios-Gómez *et al.*, 2014; Polania *et al.*, 2017b).

La eficiencia en el uso del agua expresada como relación entre materia seca y agua evapotranspirada o como eficiencia transpiratoria ($\text{MS g kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) es otro de los caracteres genéticos y fisiológicos centrales en la resistencia a la sequía en frijol común. Desde el punto de vista de la eficiencia de la planta al utilizar el agua para acumular materia seca en sus órganos, las variedades se pueden agrupar como 'ahorradoras' o 'gastadoras' de agua. Las plantas consideradas como ahorradoras tienen ventajas en los ambientes más secos y se caracterizan por producir sistemas de raíces someros y raíces finas abundantes. También son precoces y tienen eficiencia alta en el uso del agua, transpiración reducida y desarrollo del dosel vegetal limitado con alta capacidad de movilización de asimilados desde las vainas a las semillas. En cambio, las variedades clasificadas como gastadoras de agua tienen sistemas radicales vigorosos y profundos con crecimiento rápido y raíces gruesas. Además, son precoces con efectividad alta en el uso del agua, transpiración moderada, desarrollo rápido del dosel vegetal, una proporción moderada fuente/demanda y movilización alta de asimilados de las vainas a la formación de las semillas y su crecimiento (Sofi *et al.*, 2019).

Las tecnologías de fenotipado actuales permiten mejorar caracteres de tolerancia a sequía en raíces y órganos aéreos de forma rápida; así como combinar alelos múltiples nuevos en germoplasma para ambientes de estrés hídrico específicos. Los caracteres de las plantas se evalúan de manera simultánea y no destructiva con mediciones automatizadas semilla a

growth of the shoot section with a high harvest index, a greater number of seeds, and an increase in the ability to mobilize assimilates to pods and seeds (Polania *et al.*, 2017a). It is also related to a greater percentage of normal pods and increase in the dry weight and the root/shoot ratio of the plants (Sofi *et al.*, 2019). Other traits of the roots related to drought resistance in common bean plants are a larger root diameter for the absorption of water and finer roots for a higher nitrogen uptake (Barrios-Gómez *et al.*, 2014; Polania *et al.*, 2017b).

Water use efficiency (WUE), expressed as the ratio between dry matter and evapotranspiration water or as transpiration efficiency ($\text{MS g kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$), is another of the main genetic and physiological traits in drought resistance in common bean. Regarding plants efficiency, using water to accumulate dry matter in their organs, some varieties can be grouped as either water 'savers' or 'luxury users'. Plants considered savers have advantages in the driest environments and are characterized for producing shallow root systems and thin, abundant roots. They are also precocious and have a high-WUE, reduced transpiration, and a limited canopy development with a high ability to mobilize assimilates from the pods to the seeds. On the other hand, the varieties classified as water luxury users have vigorous and deep root systems with a rapid growth and thick roots. In addition, they are precocious, with a high-WUE, moderate transpiration, a rapid canopy growth, a moderate source:demand ratio and a high mobility of assimilates from the pods to the formation of seeds and their growth (Sofi *et al.*, 2019).

Current phenotyping technologies help to quickly improve traits of tolerance to drought in roots and above ground organs, as well as to combine multiple new alleles in germplasm for specific water stress environments. Plant traits are evaluated simultaneously and non-destructively with automatized measurements seed to seed (Tracy *et al.*, 2020). Based on the hypothesis that terminal drought reduces the accumulation of shoot biomass but increases root dry weight and transpiration efficiency, the aim of this study was to evaluate variability in the development of foliar area, dry weight accumulation in shoot and roots, and transpiration efficiency in a group of varieties of common bean plants under controlled irrigation and drought conditions.

semilla (Tracy *et al.*, 2020). Con base en la hipótesis de que la sequía terminal reduce acumulación de biomasa en parte aérea, pero aumenta peso de raíz y eficiencia transpiratoria; el objetivo de este estudio fue evaluar variabilidad en desarrollo del área foliar, acumulación de peso seco en la parte aérea y raíces, y eficiencia transpiratoria en un grupo de variedades de frijol común bajo condiciones controladas de riego y sequía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Un experimento en tubos de PVC se estableció en condiciones de intemperie en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México (19° 21' N, 98° 55' O; altitud 2250 m) durante el ciclo primavera-verano 2014. Los tubos de PVC se mantuvieron bajo una cubierta de polietileno colocada a una altura de 2.5 m para evitar la entrada de lluvia.

Material genético

El germoplasma utilizado incluyó ocho variedades comerciales de frijol del tipo 'Flor de Mayo', obtenidas por el INIFAP para áreas de temporal y suelos con humedad favorable en la región del Altiplano Mexicano (Acosta-Gallegos *et al.*, 2014). Tres variedades de frijol negro colectadas en la región sur del estado de Veracruz (Morales-Rivera *et al.*, 2015) y una variedad de frijol nativo colectada en el estado de Michoacán (Barrios-Gómez *et al.*, 2014). Todas las variedades fueron de hábito de crecimiento indeterminado tipo III (Cuadro 1).

Diseño experimental y tratamientos

El experimento tuvo dos tratamientos de humedad edáfica: riego (R) con aplicación de agua desde la siembra hasta la madurez fisiológica y sequía terminal (S), donde la aplicación de agua se suspendió desde los 45 días después de la siembra (dds) hasta la maduración de las plantas. Las variedades se analizaron en diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en R y tres repeticiones en S. La unidad experimental consistió en una planta individual crecida en un tubo de PVC de 10 cm de diámetro y 1 m de alto con una bolsa de plástico de las mismas dimensiones en su interior. Un tubo con sustrato sin planta se incluyó como testigo en cada repetición. El sustrato utilizado fue un suelo de textura franco-arenosa (63:27:9.8%, arena:limo:arcilla), capacidad de campo (CC = 41.6%) y porcentaje de marchitamiento permanente (PMP = 28.2%). La siembra se hizo en 12

MATERIALS AND METHODS

Experimental site

An experiment was established in PVC tubes in the open in the Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Mexico (19° 21' N, 98° 55' O; altitude 2250 m) during the 2014 Spring-Summer cycle. The PVC tubes were kept under a polyethylene cover placed at a height of 2.5 m to avoid additional water uptake from rainfall.

Genetic material

The germplasm used included eight commercial varieties of 'Flor de Mayo' common bean, obtained by the INIFAP for rainy areas and soils with a favourable humidity condition in the Mexican Highlands (Acosta-Gallegos *et al.*, 2014). Three black common bean varieties were gathered in the southern area of the state of Veracruz (Morales-Rivera *et al.*, 2015) and a native bean variety was gathered in the state of Michoacán (Barrios-Gómez *et al.*, 2014). All varieties had a habit of type III undetermined growth (Table 1).

Experimental design and treatments

The experiment had two soil humidity treatments: irrigation (R) with the application of water from planting until physiological maturity, and terminal drought (S), where the application of water was suspended since 45th day after sowing (das) until the maturation of plants. The varieties were analysed in a complete random blocks design with three replicates in R and three replicates in S. The experimental unit consisted of an individual plant grown in a PVC tube with 10cm diameter and 1m height, with a plastic bag of the same dimensions inside it. A tube with a substrate without a plant was included as a control in each repetition. The substrate used was a loamy-sandy soil (63:27:9.8%, sand:lime:clay), field capacity (CC = 41.6%) and a percentage of permanent wilting (PMP = 28.2%). Planting was carried out on April 12, 2014, with the application of 40 kg ha⁻¹ of N and 40 kg ha⁻¹ of P; urea and triple superphosphate were used as sources of N and P. On 35th das, a second application of nitrogen was performed (40-0-0). The soil was sterilized with Furadan® (Carbofuran) and Quatz IV® (Sulfosuccinate) in doses of 1 mL per PVC tube, before sowing. Nugor® (Dimetoate) was applied in doses of 1 L ha⁻¹ at 23 and 30 das for the control of whitefly (*Bemisia tabaci*).

Measured variables

The data of all the variables determined were recorded as averages per plant. The foliar area was measured (AF, cm²) in

Cuadro 1. Material genético (variedades de frijol común) utilizado en el experimento.
Table 1. Genetic material (varieties of *Phaseolus vulgaris*) used in the experiment.

Variedad	Año de liberación o colecta	Días a floración	Rendimiento de semilla (g m ⁻²)
Flor de Mayo Anita	2002	44-62	301 [‡]
Flor de Mayo Corregidora	2000	56	210 [‡]
Flor de Mayo 2000	2001	45-50	210 [‡]
Flor de Mayo M38	1994	50-57	97 [†]
Flor de Mayo Sol	1996	45-51	87 [†]
Flor de Mayo Bajío	1989	45-47	83 [†]
Flor de Mayo Noura	2006	47-50	76 [†]
Flor de Mayo RMC	1981	44-55	75 [†]
Negro Veracruz	2012	37	116 [†]
Negro Cotaxtla 91	2012	37	110 [†]
Criollo San Andrés	2012	36	113 [†]
Michoacán 128	1974	47-53	95 [†]

[†]Rendimiento de semilla obtenido en condiciones de campo en seco, en el municipio de Juan Rodríguez Clara, Veracruz (Morales-Rivera *et al.*, 2015); [‡]Rendimiento de semilla obtenido en promedio de riego y seco en Montecillo, Texcoco, estado de México (Barrios-Gómez *et al.*, 2010). ♦ [†]Seed yield obtained under rainfed conditions in the municipal area of Juan Rodríguez Clara, Veracruz (Morales-Rivera *et al.*, 2015); [‡] Seed yield obtained under average irrigation and rainfed condition in Montecillo, Texcoco, Mexico (Barrios-Gómez *et al.*, 2010).

abril 2014 con la aplicación de 40 kg ha⁻¹ de N y 40 kg ha⁻¹ de P; se utilizó urea y superfosfato de calcio triple como las fuentes de N y P. A los 35 dds se hizo una segunda aplicación de nitrógeno (40-0-0). El suelo se esterilizó con Furadan® (Carbofuran) y Quatz IV® (Sulfosuccinato) en dosis de 1 mL por tubo de PVC, antes de la siembra. Nugor® (Dimetoato) se aplicó en dosis de 1 L ha⁻¹ a los 23 y 30 dds para el control de mosquita blanca (*Bemisia tabaci*).

Variables medidas

Los datos de todas las variables determinadas se registraron como promedios por planta. El área foliar se midió (AF, cm²) en las hojas simples y los folíolos de las hojas trifolioladas completamente expandidas en el vástago y en las ramas en alargamiento, al multiplicar el largo (cm) × ancho (cm) × 0.62 cada 5d, desde los 18 hasta los 88 dds (Barrios-Gómez *et al.*, 2014). Días a floración (DF) se determinó cuando la planta mostró la primera flor abierta; días a madurez fisiológica (DMF) se consideró cuando el 90% de las vainas presentes en la planta adquirieron el color paja característico de la variedad. Peso seco de la parte aérea (PSPA, g) fue la suma de la materia seca acumulada en los órganos aéreos vegetativos (tallo, peciolos, folíolos y ramas) y reproductores (botones, flores y vainas) al final del ciclo biológico de la planta. Peso seco total de raíces (PSTR, g) se obtuvo al separar las raíces

the simple leaves and the leaflets of the completely expanded trifoliolate leaves in the shoot and the branches in elongation by multiplying the length (cm) × width (cm) × 0.62 every 5d, from 18 until 88 das (Barrios-Gómez *et al.*, 2014). Days to flowering (DF) were determined when plants showed their first open flower; days to physiological maturity (DMF) were considered when 90% of the pods in plants displayed the hay-colour typical of the variety. Shoot dry weight (PSPA, g) was the sum of the dry matter accumulated in the vegetative above ground organs (stem, petioles, leaflets and branches) and reproductive organs (buttons, flowers and pods) at the end of the biological cycle of the plant. Total root dry weight (PSTR, g) was obtained by separating the roots present in the different soil levels (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm) and drying them in a stove (RIOSSA™) at 70 °C for 48 h. The total plant biomass (BM, g) was calculated as the sum of the PSPA and the PSTR (BM=PSPA+PSTR). Finally, the transpiration efficiency to produce total plant biomass (ET_{BM}) was estimated from the total biomass as a gram of dry matter per kilogram of water (MS g kg⁻¹ H₂O) transpired by the plant during the cycle.

Water content in the soil

In all tubes, we determined the initial weight at CC (PICC) after the excess water finished draining out of the base of each

presentes en los diferentes estratos de suelo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) y secarlas en una estufa (RIOSSA®) a 70 °C durante 48 h. Biomasa total de la planta (BM, g) se calculó como la suma de PSPA y PSTR (BM=PSPA+PSTR). Por último, la eficiencia transpiratoria para producir biomasa total de la planta (ET_{BM}) se estimó a partir de la biomasa total, como gramo de materia seca por kilogramo de agua ($MS\ g\ kg^{-1}\ H_2O$) transpirada por la planta durante el ciclo.

Contenido de humedad en el suelo

En todos los tubos se determinó el peso inicial a CC (PICC) una vez que cesó el drenaje del exceso de humedad en la base de cada tubo. El contenido de humedad edáfica se registró de manera sistemática cada tercer día para calcular la cantidad de agua perdida por evapotranspiración (E_T) y sus fracciones, transpiración de la planta (T) y evaporación directa del suelo (E_S) debajo de la planta (López-Avendaño *et al.*, 2019). La cantidad de humedad perdida por E_T en cada intervalo de medición se recuperó al agregar una cantidad equivalente de agua después de cada pesaje. En R la aplicación de agua se hizo de la misma forma de la siembra a la madurez fisiológica y se mantuvo el contenido de humedad del suelo cercano a CC, mientras en S, la aplicación de agua se suspendió desde los 45 dds (inicio de la floración) hasta que las plantas completaron su ciclo biológico (Figura 1).

La E_T en cada tubo se obtuvo como la diferencia entre el PICC y el peso actual del tubo (Pa), registrado en cada fecha de

tubo. The soil humidity content was recorded systematically every three days to calculate the amount of water lost by evapotranspiration (E_T) and its fractions, plant transpiration (T) and direct soil evaporation (E_S) (López-Avendaño *et al.*, 2019). The water content loss by E_T in each measurement interval was recovered by adding an equivalent amount of water after each time weighing. In R, water was applied in the same way from planting to physiological maturity, and the soil humidity content was maintained near to CC, whereas in S, the application was suspended at 45 das (beginning of flowering) until the plants completed their biological cycle (Figure 1).

The E_T in each tube was obtained as the difference between the PICC and the current weight of the tube (Pa) registered in each measurement date ($E_T = PICC - Pa$). The T_p was calculated as the difference between E_T and E_S ($T_p = E_T - E_S$). E_S was estimated as the water loss by the direct soil evapotranspiration in the tube without plants. The total T_p per plant in R and S was calculated by adding the T_p values obtained during the experiment. The soil water content in S began decreasing at 45 das, and it reached levels below PMP starting at 70 das and until the physiological maturity of plants, which caused a very severe water deficit (Figure 1).

Air temperature

The data for maximum and minimum air temperatures (°C) during the experiment were recorded daily, using a maximum

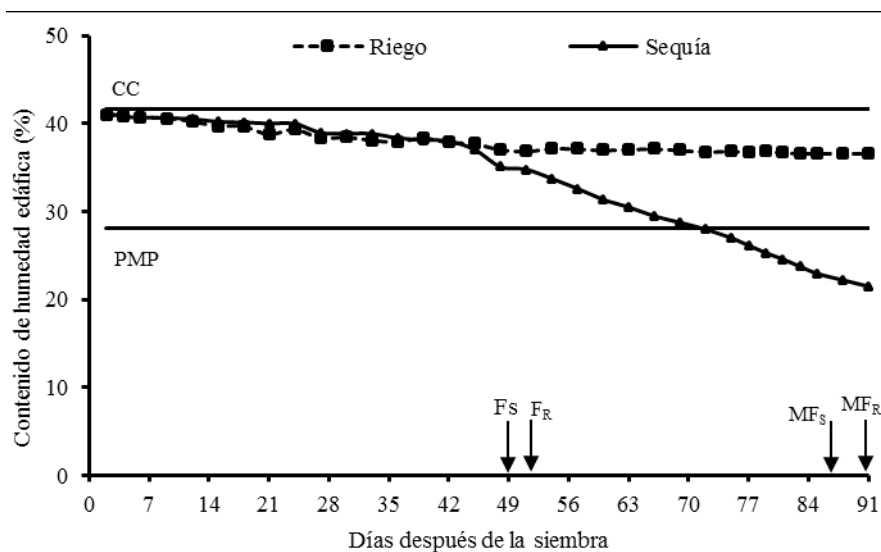


Figura 1. Media de contenido de humedad en el suelo en promedio de 12 variedades de frijol en riego y sequía. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitamiento permanente; F_S: días a floración en sequía; F_R: días a floración en riego; MF_R: días a madurez fisiológica en riego; MF_S: días a madurez fisiológica en sequía.

Figure 1. Mean of soil water content of 12 common bean varieties under irrigation and drought. CC: field capacity; PMP: permanent wilting point; F_S: days to flowering in drought; F_R: days to flowering in irrigation; MF_R: days to physiological maturity in irrigation; MF_S: days to physiological maturity in drought.

medición ($E_T = \text{PICC} - P_a$). La T_p se calculó como la diferencia entre E_T y E_S ($T_p = E_T - E_S$). E_S se estimó como la cantidad de agua perdida por evaporación directa del suelo en los tubos sin planta. La T_p total por planta en R y S se calculó al sumar los valores de T_p obtenidos durante el experimento. El contenido de humedad edáfica en S empezó a disminuir a partir de los 45 dds, y alcanzó niveles inferiores al PMP a partir de los 70 dds y hasta la madurez fisiológica de las plantas, lo cual causó un déficit hídrico terminal muy severo (Figura 1).

Temperatura del aire

Los datos de temperatura (°C) máxima y mínima del aire durante el experimento se registraron diariamente, con un termómetro de columna de mercurio de máxima y mínima (Taylor®) colocado a una altura de 1.8 m junto a las plantas. La temperatura máxima promedio varió entre 25 y 40 °C y la temperatura mínima fluctuó de 7 a 13 °C con una tendencia a aumentar después de la floración.

Análisis estadístico

El análisis de varianza se realizó con el programa estadístico SAS®, v. 9.1 para Windows (SAS Institute, Inc., 2009) en forma combinada R y S como serie de experimentos ($Y_{ijk} = m + NH_i + G_j + NHG_{ij} + B_{(j)} + E_{ijk}$), para determinar las diferencias entre los tratamientos de humedad del suelo (H), genotipos (G), y la interacción G×H. La prueba de Tukey, basada en la diferencia significativa honesta (DSH Tukey, $p \leq 0.05$) se utilizó para la comparación múltiple de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo del área foliar

El área foliar fue similar en R y en S, desde la emergencia de las plántulas hasta los 43 dds, período en el cual, el contenido de humedad en el suelo fue favorable para el crecimiento en ambos R y S. Una vez iniciado el tratamiento S (45 dds) se observó que la expansión del área foliar mostró disminución significativa conforme transcurrió el tiempo. Las reducciones mayores ocurrieron en las etapas de floración [49 dds (17%) a 53 dds (24%)], formación de la semilla [53 a 83 dds (40, 56, 52, 49 y 59%) y madurez fisiológica [88 a 95 dds (63 y 79%)] (Figura 2). El mantenimiento de la expansión del área foliar en condiciones de déficit hídrico es un mecanismo de resistencia a sequía. Polania *et al.* (2016) determinaron

and minimum mercury column thermometer (Taylor™), placed at a height of 1.8 m beside the plants. The average maximum temperature varied between 25 and 40 °C and the minimum temperature ranged from 7 and 13 °C tending to increase after flowering.

Statistical analysis

The analysis of variance was performed with SAS® v. 9.1 for Windows (SAS Institute, Inc., 2009) combining R and S as a series of experiments ($Y_{ijk} = m + NH_i + G_j + NHG_{ij} + B_{(j)} + E_{ijk}$) to determine the differences among treatments of soil water content (H), genotypes (G) and the G×H interaction. The Tukey's test based on the honest significant difference (DSH, $p \leq 0.05$) was used to the multiple comparison of means.

RESULTS AND DISCUSSION

Development of the foliar area

Foliar areas were similar in R and S, from seedling emergence up to 43 das, and in this period the soil water content was favourable for growth in both R and S. After treatment S began (45 das), the expansion of the foliar area showed significant decrease along time. Greater decreases occurred in the stages of flowering [49 das (17%) to 53 das (24%)], seed formation [53 to 83 das (40, 56, 52, 49 and 59%)] and physiological maturity [88 to 95 das (63 and 79%)] (Figure 2). Sustaining the foliar area expansion under water deficiency conditions is a drought resistance mechanism. Polania *et al.* (2016) determined that the drought tolerant common bean genotypes combined a high biomass accumulation in the canopy with greater seed yield under conditions of water stress and they observed a positive strong correlation between these plant traits under irrigation ($r = 0.39$, $p \leq 0.05$) and drought ($r = 0.59$, $p \leq 0.05$).

In R, significant differences were found among varieties from the beginning of foliar area measurements of (18 das) up to 68 das; differences were later found among genotypes at 78 and 83 das. The varieties FM M38 Negro Veracruz and Negro Cotaxtla 91 displayed a greater foliar area from 18 to 68 das. In addition, the varieties FM Sol, FM RMC, FM Anita, FM Noura, FM 2000, Michoacán 128, FM Bajío, FM Coregidora and Criollo San Andrés displayed a similar foliar area to FM M38, Negro Veracruz and Negro Cotaxtla 91 at 23, 53 and 63 das;

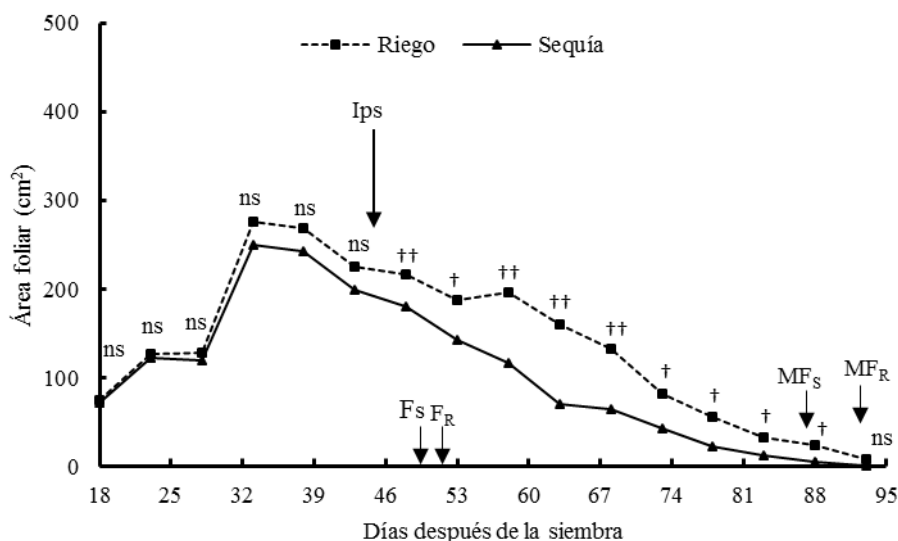


Figura 2. Desarrollo del área foliar de 12 variedades de frijol en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México. Las flechas indican los días a floración (F) y madurez fisiológica (MF). †($p \leq 0.01$); ††($p \leq 0.05$); no significativo.

Figure 2. Development of foliar area of 12 varieties of common bean plants in irrigation and drought. 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico. Arrows indicate days to flowering (F) and physiological maturity (MF). † $p \leq 0.01$; †† $p \leq 0.05$; ns, not significant.

que los genotipos de frijol común tolerantes a sequía combinaron acumulación de biomasa alta en el dosel vegetal con rendimiento de semilla alto en condiciones de estrés hídrico y observaron correlación positiva alta entre estos caracteres de la planta en riego ($r = 0.39$, $p \leq 0.05$) y sequía ($r = 0.59$, $p \leq 0.05$).

En R se observaron diferencias significativas entre variedades desde el inicio de las mediciones del área foliar (18 dds) hasta los 68 dds; después se detectaron diferencias entre genotipos en 78 y 83 dds. Las variedades FM M38 Negro Veracruz y Negro Cotaxtla 91 mostraron área foliar mayor de los 18 a los 68 dds. Además, las variedades FM Sol, FM RMC, FM Anita, FM Noura, FM 2000, Michoacán 128, FM Bajío, FM Coregidora y Criollo San Andrés exhibieron un área foliar similar a FM M38, Negro Veracruz y Negro Cotaxtla 91 a los 23, 53 y 63 dds; 18, 53, 63, 76 y 83 dds; 83 dds; 53, 58 y 63 dds; 18, 56, 63 y 83 dds; 18, 63 y 83 dds; 63, 73 y 83 dds; 23, 43, 53 y 63 dds; y 33, 38, 43, 48, 53 y 58 dds (Figura 3A).

En condición de sequía y riego se detectaron diferencias significativas en el área foliar entre variedades de los 18 a 68 dds, con reducción severa en la expansión del área foliar en sequía durante el curso del tiempo en comparación con riego. Las variedades FM M38, Negro Veracruz y Negro Cotaxtla 91 exhibieron expansión mayor del área foliar cada 5d de 28 a 68 dds;

18, 53, 63, 76 and 83 das; 83 das; 53, 58 and 63 das; 18, 56, 63 and 83 das; 18, 63 and 83 das; 63, 73 and 83 das; 23, 43, 53 and 63 das; and 33, 38, 43, 48, 53 and 58 das (Figure 3A).

In the drought (S) and irrigation (R) conditions, significant differences were found in the foliar area between varieties from 18 to 68 das, with a severe reduction in the foliar area expansion under drought in time in comparison with irrigation. Varieties FM M38, Negro Veracruz and Negro Cotaxtla 91 displayed a greater expansion of the foliar area every 5d between 28 and 68 das; 18-28, 33-53 and 78 das; and from 18 to 78 das. In addition, genotypes FM Sol, FM RMC, FM Anita, FM Noura, FM 2000, Michoacán 128, FM Bajío, FM Corregidora and Criollo San Andrés displayed higher values of foliar expansion every 10d from 38 to 78 das; 38-68 das; 53-83 das; 48-73 das; 18, 53-78 das; 38 and 53-78 das; 53, 63 and 68 das; and 38-78 das (Figure 3B).

The development of the foliar area is very important for the productivity of the plant, because as the moisture availability is reduced in the soil from the beginning of flowering and the formation of pods, vegetative growth, seed yield and water use efficiency are also reduced (Pang *et al.*, 2017). Varieties FM M38, Negro Veracruz and Negro Cotaxtla 91 maintained high foliar area values during water stress

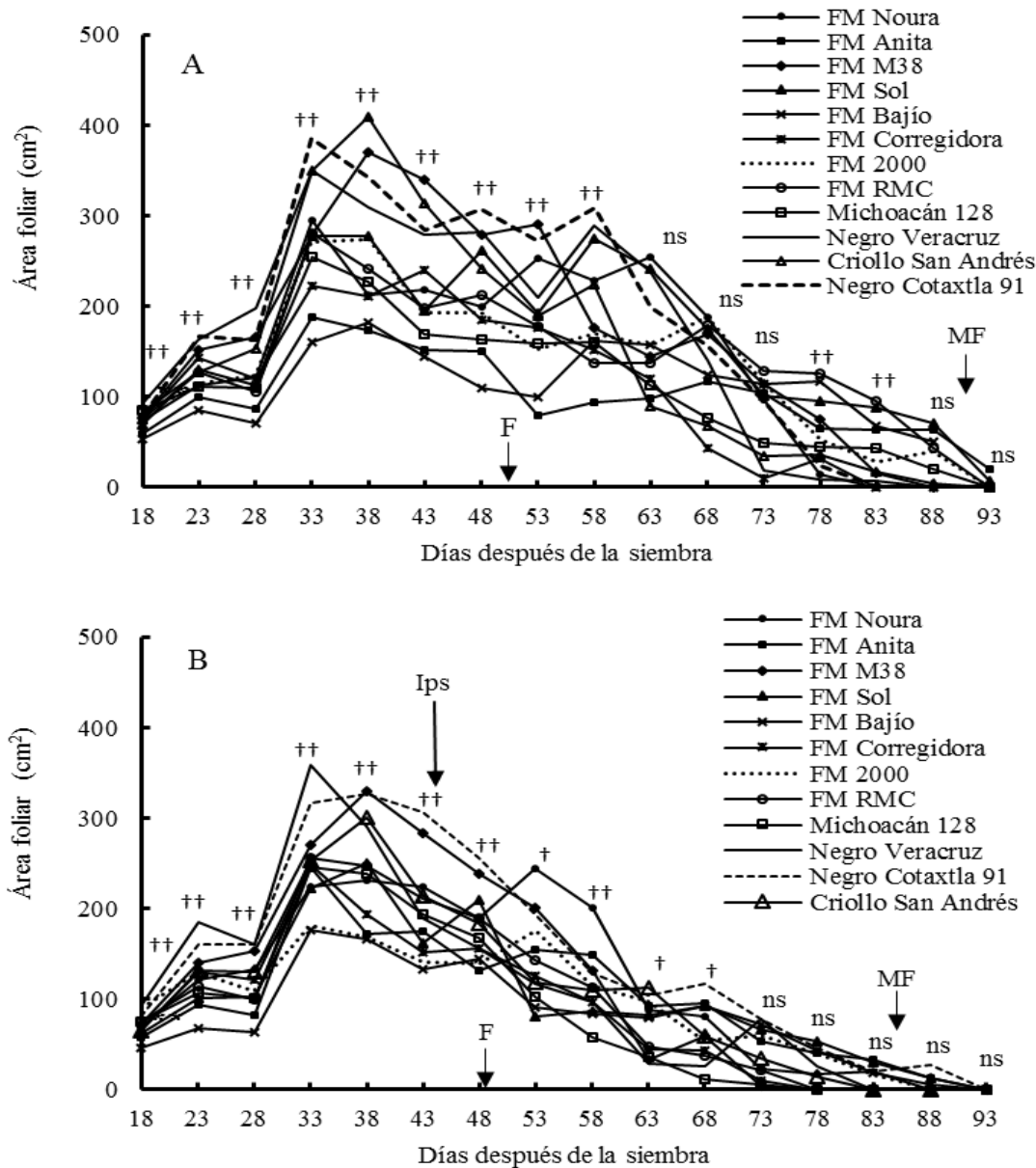


Figura 3. Desarrollo del área foliar de 12 variedades de frijol en riego (A) y sequía (B). Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México. Las flechas indican los días a floración (F) y madurez fisiológica (MF). †($p \leq 0.01$); ††($p \leq 0.05$); no significativo: ns.

Figure 3. Development of the foliar area of 12 varieties of common bean in irrigation (A) and drought (B). 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico. Arrows indicate days to flowering (F) and physiological maturity (MF). † $p \leq 0.01$; †† $p \leq 0.05$; ns, not significant.

18-28, 33-53 y en 78 dds; y de 18-78 dds. Además, los genotipos FM Sol, FM RMC, FM Anita, FM Noura, FM 2000, Michoacán 128, FM Bajío, FM Corregidora y Criollo San Andrés mostraron valores altos de expansión foliar cada 10d de 38-78 dds;

and this helped them to maintain transpiration rate and vegetative growth, combined with the ability to mobilize photoassimilates from the vegetative structures to pods and seed production (Polania *et al.*, 2017a).

68 dds; 53-83 dds; 48-73 dds; 18, 53-78 dds; 38 y 53-78 dds; 53, 63 y 68 dds; y 38-78 dds (Figura 3B). El desarrollo del área foliar es muy importante para la productividad de la planta, porque al reducirse la disponibilidad de humedad en el suelo desde el inicio de la floración y la formación de las vainas, disminuye el crecimiento vegetativo, el rendimiento de semilla y la eficiencia en el uso del agua (Pang *et al.*, 2017). Las variedades FM M38, Negro Veracruz y Negro Cotaxtla 91 mantuvieron valores altos de área foliar durante el estrés hídrico y esto les permitió mantener tasa de transpiración y crecimiento vegetativo combinado con la habilidad para movilizar fotoasimilados de las estructuras vegetativas a las vainas y a la producción de semilla (Polania *et al.*, 2017a).

Características de crecimiento de las raíces

En promedio, el peso seco total de raíces de las 12 variedades de frijol en S fue 53% mayor que en R. El peso seco de raíces en S fue mayor que en R en todos los estratos del suelo y la proporción mayor de peso seco de raíces se observó en el estrato 0-20 cm en R (50.6%) y S (54.7%). El peso seco de raíces disminuyó en los estratos inferiores en los dos tratamientos de humedad edáfica: 20-40 (R = 29.5%; S = 26.4%), 40-60 (R = 14.1%; S = 11.9%) y 60-80 cm (R = 5.8%; S = 5.2%). En el estrato de 80-100 cm sólo se observó la presencia de raíces en S (1.8%) (Figura 4).

Characteristics of root growth

On average total roots dry weight of the 12 varieties was 53% higher in S than in R. The dry weight of the roots in S was higher than in R in all soil levels and the highest proportion of root dry weight was observed in the level 0-20 cm in R (50.6%) and S (54.7%). Root dry weight decreased in the lower levels in both treatments of soil moisture: 20-40 (R = 29.5%; S = 26.4%), 40-60 (R = 14.1%; S = 11.9%) and 60-80 cm (R = 5.8%; S = 5.2%). In the 80-100 cm level, the presence of roots was only found in S (1.8%) (Figure 4). Mohamed *et al.* (2005) determined that two common bean lines exposed to drought accumulated 80% more dry matter and had roots 30 cm longer than irrigated plants. In addition, plants developed more fibrous roots in the level between 40 and 50 cm and had a higher root/shoot ratio.

In R, the varieties FM RMC and Negro Veracruz showed a higher total root dry weight than the other varieties. The varieties FM RMC, Negro Veracruz, Negro Cotaxtla 91 and Criollo San Andrés; FM RMC and Negro Veracruz; FM RMC and Negro Veracruz; FM RMC and Michoacán 128 displayed a higher dry weight of roots than the rest of the varieties in the levels 0-20; 20-40; 40-60; and 60-80 cm; no roots were found in the 80-100 cm level (Table 2).

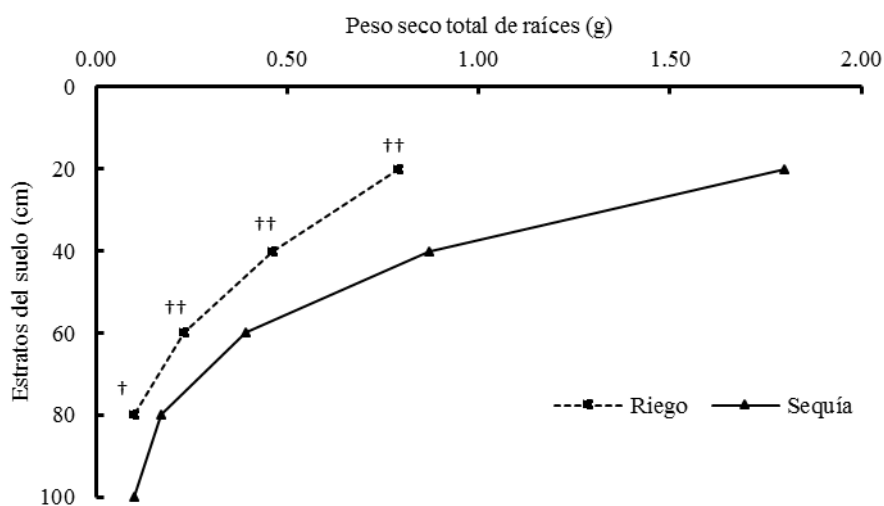


Figura 4. Media de peso seco de raíces de 12 variedades de frijol en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México. † $p \leq 0.01$; †† $p \leq 0.05$.

Figure 4. Mean dry weight of roots in 12 common bean varieties in irrigation and drought. 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico. † $p \leq 0.01$; †† $p \leq 0.05$.

Mohamed *et al.* (2005) determinaron que dos líneas de frijol común sometidas a sequía acumularon 80% mayor cantidad de materia seca y 30 cm mayor longitud de raíces que las plantas conducidas en riego. Además, las plantas desarrollaron más raíces fibrosas en el estrato de 40 a 50 cm y tuvieron cociente raíz/parte aérea mayor.

En R las variedades FM RMC y Negro Veracruz mostraron mayor peso seco total de raíces que las otras variedades. Las variedades FM RMC, Negro Veracruz, Negro Cotaxtla 91 y Criollo San Andrés; FM RMC y Negro Veracruz; FM RMC y Negro Veracruz; FM RMC y Michoacán 128 exhibieron peso seco de raíces mayor que las demás variedades en los estratos 0-20; 20-40; 40-60; y 60-80 cm; en el estrato de 80-100 cm no se detectó la presencia de raíces (Cuadro 2).

En S la variabilidad en el peso seco total y el peso seco de raíces en los diferentes estratos del suelo fue mayor y las raíces alcanzaron mayor profundidad de suelo que en R. Los genotipos FM M38, FM Sol, FM RMC, FM 2000, Negro Cotaxtla 91 y Criollo San Andrés produjeron mayor peso seco total que las otras variedades. Los genotipos FM M38, FM Sol, FM RMC, FM 2000, FM Anita, Negro Cotaxtla 91, Criollo San Andrés, FM Noura, y Negro Veracruz y acumularon mayor peso seco de raíces que las otras variedades en todos los estratos (Cuadro 2).

El valor mayor en peso seco total y peso seco de raíces de la variedad FM M38 en estratos distintos del suelo en R y S, resultó importante para incrementar la capacidad de absorción de agua y nutrientes para la fotosíntesis y la formación del rendimiento y sus componentes en la planta (Tracy *et al.*, 2020). Así mismo, mayor biomasa puede ser importante para lograr eficiencia en el uso del agua mayor, al aumentar la ganancia de carbono cuando mejora la bioquímica fotosintética y la respuesta de la planta; o a través de una mayor conductancia del mesófilo (Condon, 2020).

Eficiencia transpiratoria y materia seca de raíces

En R el peso seco de la parte aérea y la biomasa total de la planta fueron 33 y 26% mayores que en S, mientras el cociente raíz/parte aérea y la eficiencia transpiratoria para producir biomasa total en la planta fueron 67 y 58% mayores en S que en R (Cuadro 3). Los incrementos en asignación y acumulación de

In S, the variability in the total dry weight and the dry weight of roots in the different levels of the ground was greater and roots reached a greater soil depth than in R. Genotypes FM M38, FM Sol, FM RMC, FM 2000, Negro Cotaxtla 91 and Criollo San Andrés produced a greater total dry weight than the other varieties. Genotypes FM M38, FM Sol, FM RMC, FM 2000, FM Anita, Negro Cotaxtla 91, Criollo San Andrés, FM Noura, y Negro Veracruz accumulated more dry weight in the roots than the other varieties in all depths (Table 2).

The highest value for total dry weight and root dry weight of the variety FM M38 in different soil levels in R and S was important to increase water and nutrient uptake ability for photosynthesis, yield and yield components in the plant (Tracy *et al.*, 2020). Likewise, they may be important to achieve a greater water use efficiency by increasing carbon gain when photosynthetic biochemistry improves as well as the response of the plant; or through a greater conductance in the mesophyll (Condon, 2020).

Transpiration efficiency and partition of dry matter in roots

In R, shoot dry weight and the total biomass of the plant were 33 and 26% higher than in S, whereas the root/shoot ratio and the transpiration efficiency to produce total biomass in the plant were 67 and 58% higher in S than in R (Table 3). Increases in partition and accumulation for root dry weight, shoot dry weight, total biomass and water use efficiency in common beans have also been found in other studies. In some of them, drought tolerant lines displayed greater vigour in root growth under dry conditions in greenhouse and a greater seed yield under water stress conditions in the field (Polania *et al.*, 2017b).

In R, genotypes FM M38, FM Sol and FM RMC; Negro Veracruz and Criollo San Andrés; and FM M38, FM Sol, Negro Veracruz and Negro Cotaxtla 91 produced more shoot dry weight, total biomass; transpiration efficiency; and root/shoot ratio than the other varieties. In drought conditions, this was also the case for FM Corregidora and FM 2000 (Table 4).

A group of recombinant common bean lines under irrigation and soil water stress also displayed greater resistance to drought, above ground biomass, mobilization of assimilates to the pods, seeds and

Cuadro 2. Peso seco total y peso seco de raíces en diferentes estratos del suelo de 12 variedades de frijol en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México.**Table 2. Total dry weight and root dry weight at different soil levels in 12 common bean varieties in irrigation and drought. 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico.**

Variedades	PSTR (g)	Peso seco (g)				
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Riego						
FM M38	1.4	0.80	0.44	0.11	-	-
FM Sol	1.6	0.84	0.54	0.25	-	-
FM RMC	2.4	1.10	0.74	0.48	0.14	-
FM Anita	1.1	0.54	0.40	0.20	-	-
FM Noura	0.9	0.50	0.26	0.15	-	-
FM 2000	1.6	0.86	0.51	0.18	0.06	-
Negro Veracruz	2.3	1.20	0.67	0.45	-	-
Michoacán 128	1.2	0.55	0.40	0.17	0.13	-
FM Bajío	1.1	0.56	0.31	0.22	-	-
FM Corregidora	1.1	0.66	0.32	0.15	-	-
Negro Cotaxtla 91	1.4	0.91	0.42	0.05	-	-
Criollo San Andrés	1.8	0.97	0.51	0.28	0.05	-
Media general	1.5	0.79	0.46	0.22	0.09	-
DSH ($p \leq 0.05$)	0.4	0.29	0.11	0.17	0.05	-
Sequía						
FM M38	4.1	2.22	1.30	0.33	0.22	-
FM Sol	3.7	2.30	0.74	0.42	0.16	0.06
FM RMC	3.9	2.30	1.19	0.24	0.16	-
FM Anita	2.7	1.30	0.94	0.25	0.17	0.02
FM Noura	3	1.46	0.81	0.36	0.29	0.09
FM 2000	3.7	2.62	0.56	0.30	0.24	0.04
Negro Veracruz	3.1	1.66	0.84	0.39	0.24	-
Michoacán 128	2.6	1.20	0.81	0.37	0.16	-
FM Bajío	2.7	1.54	0.72	0.42	0.06	-
FM Corregidora	2.3	1.44	0.54	0.33	0.03	-
Negro Cotaxtla 91	3.5	1.81	1.04	0.48	0.15	0.16
Criollo San Andrés	3.7	1.76	0.98	0.77	0.19	0.04
Media general	3.2	1.80	0.87	0.39	0.17	0.06
DSH ($p \leq 0.05$)	0.8	0.65	0.39	0.27	0.12	0.04

PSTR: Peso seco total de raíces. ♦ PSTR: Total dry weight of roots.

Cuadro 3. Asignación de materia seca a parte aérea y raíces, biomasa total y eficiencia transpiratoria, de 12 variedades de frijol en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México.**Table 3. Partition of dry matter to shoot and roots, total biomass and transpiration efficiency of 12 common bean varieties in irrigation and drought. 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico.**

Nivel de humedad edáfica	PSPA (g)	BM (g)	CR/PA	ET _{BM} (MS g kg ⁻¹ H ₂ O)
Riego	27	28.5	0.06	3.5
Sequía	18	21.2	0.18	8.3
DSH ($p \leq 0.05$)	1	1	0.01	0.4

PSPA: Peso seco de la parte aérea; BM: Biomasa total de la planta; CR/PA: Cociente raíz/Parte aérea; ET_{BM} = Eficiencia transpiratoria para producir biomasa total de la planta. ♦ PSPA: shoot dry weight; BM: total biomass; CR/PA: root/shoot ratio; ET_{BM} = transpiration efficiency to produce total biomass.

peso seco en las raíces, peso seco de la parte aérea, biomasa total y eficiencia en el uso del agua en frijol común bajo sequía, también se ha observado en otros estudios. En algunos de ellos, las líneas tolerantes a sequía mostraron vigor mayor en el crecimiento de las raíces en condiciones de sequía en invernadero y rendimiento mayor de semilla bajo condiciones de estrés hídrico en campo (Polania *et al.*, 2017b).

En R los genotipos FM M38, FM Sol y FM RMC; Negro Veracruz y Criollo San Andrés; y FM M38, FM Sol, Negro Veracruz y Negro Cotaxtla 91 produjeron mayor peso seco de la parte aérea, biomasa total; eficiencia transpiratoria y cociente raíz/parte aérea que las otras variedades. En sequía, a estas variedades se agregaron FM Corregidora y FM 2000 (Cuadro 4).

Un grupo de líneas recombinantes de frijol común bajo condiciones de riego y déficit hídrico del suelo, también mostraron mayor resistencia a sequía, biomasa aérea, asignación de asimilados a las vainas, semillas y raíces, y eficiencia en el uso del agua al desarrollar mayor densidad y profundidad de raíces (Polania *et al.* 2017a).

La exploración de caracteres morfológicos y fisiológicos determinantes en la expresión del crecimiento de los órganos aéreos y subterráneos, procesos de desarrollo de la planta, y rendimiento y sus fracciones en ambientes contrastantes de humedad del suelo, pueden ayudar a identificar los factores clave para el mejoramiento bajo condiciones de estrés. Así mismo, esta técnica de fenotipado puede ayudar a una selección de caracteres más rápida en la raíz y parte aérea de las plantas, al combinar por selección alelos múltiples de germoplasma sobresaliente para ambientes específicos con estrés (Tracy *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

El déficit hídrico terminal del suelo disminuyó expansión del área foliar, peso seco de la parte aérea y biomasa total. El desarrollo del área foliar fue el carácter morfológico y fisiológico más afectado por la sequía, seguido por peso seco de la parte aérea y biomasa total.

La deficiencia hídrica del suelo aumentó el peso seco total de raíces y el cociente raíz/parte aérea respecto a la condición en riego. La proporción mayor de peso seco de raíces se presentó en el estrato de 0-20 cm y el peso seco de raíces en sequía fue mayor que en riego en todos los estratos del suelo.

roots, and water use efficiency by developing a higher density and root depth (Polania *et al.* 2017a).

To explore those determining morphological and physiological traits in the expression of the growth of above- and underground organs, plant development processes, yield and its fractions in contrasting soil water conditions may help to identify those key factors for breeding improvement under stress conditions. Likewise, this phenotyping technique may help to faster selection for traits in the roots and canopy of plants; combining by selection multiple alleles of outstanding germplasm for specific stress environments (Tracy *et al.*, 2020).

CONCLUSIONS

The terminal water deficit in soil reduced the foliar area expansion, canopy dry weight and total biomass. The development of foliar area was the morphological and physiological trait most affected by drought, followed by canopy dry weight and total biomass.

The water deficit in soil increased the total root dry weight and the root/shoot ratio compared to the irrigation condition. The highest proportion of root dry weight was observed at the 0-20 cm soil level and root dry weight in drought was higher than in irrigation at all the soil levels.

Drought increased transpiration efficiency to produce total biomass in the plant. The most productive genotypes and those with traits evaluated for drought resistance can be used as commercial varieties in rainfed and irrigation agriculture systems with water deficit, or as parental lines in yield improvement programs for common bean.

—End of the English version—

---*---

La sequía aumentó la eficiencia transpiratoria para producir biomasa total en la planta. Los genotipos más productivos y con las características evaluadas para resistencia a sequía, pueden utilizarse como variedades comerciales en los sistemas agrícolas de riego y secano con problemas de déficit hídrico, o como líneas parentales en los programas de mejoramiento del rendimiento de frijol.

Cuadro 4. Peso seco de la parte aérea, biomasa total, cociente raíz/parte aérea y eficiencia transpiratoria de 12 variedades de frijol en riego y sequía. Ciclo primavera-verano 2014. Montecillo, Texcoco, México.

Table 4. Shoot dry weight, total biomass, root/shoot ratio, and transpiration efficiency of 12 common bean varieties in irrigation and drought. 2014 Spring-Summer cycle. Montecillo, Texcoco, Mexico.

Variedades	PSPA (g)	BM (g)	CR/PA	ET _{BM} (g de MS kg H ₂ O ⁻¹)
Riego				
FM M38	33	34.6	0.04	4.1
FM Sol	35	36.8	0.05	3.9
FM RMC	32	34.3	0.07	3.8
FM Anita	27	27.9	0.04	3.3
FM Noura	26	26.6	0.04	3.5
FM 2000	28	29.5	0.06	3.6
Negro Veracruz	26	28.3	0.09	4.5
Michoacán 128	25	26	0.05	3
FM Bajío	22	23.2	0.05	3.1
FM Corregidora	23	24.2	0.05	2.9
Negro Cotaxtla 91	22	23.3	0.06	4.1
Criollo San Andrés	23	24.3	0.08	2.8
Media general	27	28	0.06	3.5
DSH (p≤0.05)	4	4.2	0.01	0.6
Sequía				
FM M38	20	23.9	0.21	7.1
FM Sol	21	25.2	0.17	7.5
FM RMC	21	24.9	0.19	10.6
FM Anita	18	20.7	0.15	6.1
FM Noura	18	21.4	0.16	6.7
FM 2000	16	19.4	0.24	7.3
Negro Veracruz	17	20.6	0.18	11.3
Michoacán 128	20	22.1	0.13	7.6
FM Bajío	17	19.4	0.16	6.1
FM Corregidora	18	20.8	0.13	13.2
Negro Cotaxtla 91	17	20.9	0.2	11.7
Criollo San Andrés	13	17.1	0.29	5.9
Media general	18	21.3	0.18	8.3
DSH (p≤0.05)	3	2.2	0.07	1.9

PSPA: Peso seco de la parte aérea; BM: Biomasa total de la planta; CR/PA: Cociente raíz/Parte aérea; ET_{BM}: Eficiencia transpiratoria para producir biomasa total de la planta. ♦ PSPA: shoot dry weight; BM: total biomass; CR/PA: root/shoot ratio; ET_{BM}: transpiration efficiency to produce total biomass.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Gallegos, J. A., Y. Jiménez-Hernández, V. Montero-Tavera, B. M. Sánchez García y S. H. Guzmán-Maldonado. 2014. Junio León, nueva variedad de frijol para riego y temporal el Altiplano y la Mesa Central de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7: 1369-1374. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1596>
- Barrios-Gómez, E. J., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, J. A. Acosta-Gallegos, S. Miranda-Colín, y N. Mayek-Pérez. 2010. Rendimiento de semilla y sus componentes en frijol Flor de Mayo en el centro de México. *Agrociencia* 44: 481-489.
- Barrios-Gómez, E. J., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, J. A. Acosta Gallegos, S. Miranda-Colín, N. Mayek-Pérez, y J. Kanul-Ku. 2014. Morfología del embrión en frijol y su comparación entre razas Durango y Jalisco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 965-978.
- Condon, A. G. 2020. Drying times: plant traits to improve crop water use efficiency and yield. *J. Exp. Bot.* 71: 2239-2252. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa002>

- López-Avendaño, J. E., J. C. Rodríguez, J. A. Martínez-Gallardo, T. Díaz-Valdez, y R. Lizárraga-Jiménez. 2019. Uso de cintilómetro para estimar la evapotranspiración de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y sus componentes. In: Duran-Hernández, D., O. T. Camacho, O. Grimaldo-Juárez, D. González-Mendoza, C. Ceceña-Durán, L. Cervantes-Díaz, C. Y. Michel-López, y C. Ruíz-Alvarado (eds.) Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología. XXI Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas. OmniaScience, Terrassa, Barcelona. 240 p. <https://doi.org/10.3926/XXICICA-vol1>
- López-Hernández, M. B., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, S. Miranda-Colín, E. J. Barrios-Gómez, y C.G. Martínez-Rueda. 2018. Rendimiento de grano y sus componentes, y densidad de raíces en arroz bajo riego y secano. *Agrociencia* 52: 563-580.
- Lynch, J. P. 2013. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann. Bot.* 112: 347-357. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>
- Mohamed, F., M. Mohamed, N. Schmitz-Eiberger, Keutgen, and G. Noga. 2005. Comparative drought postponing and tolerance potentials of two tepary bean lines in relation to seed yield. *Afr. Crop Sci. J.* 13: 49-60. DOI: 10.4314/ACSJ.V13I1.27903
- Morales-Rivera, A., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, S. Miranda-Colín, y A. García-Esteva. 2015. Comparación de los componentes del rendimiento en variedades de frijol en condiciones de acidez y humedad residual del suelo en el sur de Veracruz. *Terra* 33: 309-319.
- Munns, R., and R. E. Sharp. 1993. Involvement of abscisic acid in controlling plant growth in soils at low water potential. *Aust. J. Plant Physiol.* 20: 425-437.
- Pang, J., N. C. Turner, T. Khan, Y. L. Du, J. L. Xiong, T. D. Colmer, R. Devilla, K. Stefanova, and K. H. M. Siddique. 2017. Response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to terminal drought: leaf stomatal conductance, pod abscisic acid concentration and seed set. *J. Exp. Bot.* 68: 1973-1985. DOI: 10.1093/jxb/erw153
- Polania, J. A., Ch. Poschenrieder, S. Beebe, and I. M. Rao. 2016. Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. *Front. Plant Sci.* 7: 660. DOI: 10.3389/fpls.2016.00660
- Polania, J., I. M. Rao, C. Cajiao, M. Grajales, M. Rivera, F. Velasquez, B. Raatz, and S. E. Beebe. 2017a. Shoot and root traits contribute to drought resistance in recombinant inbred lines of MD 23-24 × SEA 5 of common bean. *Front. Plant Sci.* 8: 296. DOI: 10.3389/fpls.2017.00296
- Polania, J., C. Poschenrieder, I. Rao, and S. Beebe. 2017b. Root traits and their potential links to plant ideotypes to improve drought resistance in common bean. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 29: 143-154. DOI: 10.1007/s40626-017-0090-1
- Riboldi, L. B., R. F. Oliveira, and L. R. Angelocci. 2016. Leaf turgor pressure in maize plants under water stress. *Aust. J. Crop Sci.* 10: 878-886. doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7602
- SAS Institute, Inc. 2009. The SAS System Guide. SAS release 9.1 for Windows. SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA https://www.sas.com/es_mx/software/stat.html (Consultado: junio, 2016).
- Sofi, P. A., A. Ara, M. Gull, and K. Rehman. 2019. Canopy temperature depression as an effective physiological trait for drought screening. DOI: 10.5772/intechopen.85966
- Tracy, S. R., K. A. Nagel, J. A. Postma, H. Fassbender, A. Wasson, and M. Watt. 2020. Crop improvement from phenotyping roots: Highlights reveal expanding opportunities. *Trends Plant Sci.* 25: 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.10.015>
- Zaman-Allah, M., D. M. Jenkinson, and V. Vadez. 2011. A conservative pattern of water use, rather than deep or profuse rooting, is critical for the terminal drought tolerance of chickpea. *J. Exp. Bot.* 62: 4239-4252. DOI: 10.1093/jxb/err139

