



Fecha de recibido: 09-05-2023

Fecha de aceptado: 01-09-2023

DOI: 10.22490/21456453.6805

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica L.*) EN RESPUESTA AL DÉFICIT HÍDRICO DEL SUELO

EVALUATION OF PARAMETERS RELATED TO THE GROWTH OF COFFEE PLANTS (*Coffea arabica L.*) IN RESPONSE TO SOIL MOISTURE DEFICIT

Luz Adriana Lince Salazar ¹

Siavosh Sadeghian Khalajabadi ²

Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera ³

¹ MSc, Cenicafé, Manizales, Colombia. luz.lince@cafedecolombia.com

² PhD, Cenicafé, Manizales, Colombia. siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

³ MSc, Cenicafé, Manizales, Colombia. ninibeth.sarmiento@cafedecolombia.com

Citación: Lince, L.A, Sadeghian, S. y Sarmiento, N. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica L.*) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 11-34. <https://doi.org/10.22490/21456453.6805>

RESUMEN

Contextualización: el agua es indispensable para el desarrollo de las plantas y su respuesta al déficit hídrico varía según las especies y las etapas de crecimiento de estas.

Vacío de conocimiento: se desconoce la magnitud del efecto del déficit hídrico del suelo en el crecimiento de las plantas jóvenes de café (*Coffea arabica* L.) evaluado en el tiempo.

Propósito: se realizó una investigación tendiente a identificar el efecto del déficit hídrico del suelo y por consiguiente la sensibilidad a la sequía en plantas jóvenes de café.

Metodología: se utilizó el método de riego deficitario. Se plantaron colinos de café variedad Cenicafé 1 de 3 meses de edad en materos cilíndricos y se acondicionaron por cuatro meses en casas de malla en Cenicafé, Planalto y posterior al acondicionamiento, por 140 días se evaluó el efecto en el crecimiento y la materia seca de las plantas sometidas a cinco rangos de potencial mátrico del suelo. Los potenciales iban desde -20 ± 10 kPa (testigo) hasta -600 ± 100 kPa

Resultados y conclusiones: los resultados mostraron que el déficit hídrico del suelo afecta el crecimiento de las plantas

jóvenes de café (*C. arabica*), lo que podría definir a *C. arabica* en esta etapa como sensible a la sequía. Las plantas sometidas al menor estrés y a sequía extrema presentaron una disminución del 30% y 57% en materia seca, respectivamente. Para las variables de crecimiento, el efecto del déficit hídrico se evidenció en las evaluaciones de los 77, 113 y 140 días de aplicación de tratamientos. En todos los casos, los resultados mostraron diferencias entre la sequía extrema y el testigo de hasta 30 cm en altura y diámetro ecuatorial, 0.9 m^2 de área foliar, 132 hojas, 3 cruces y 66 nudos. Los modelos matemáticos que explicaron el efecto de la sequía en la masa seca fueron de tipo logarítmico. Se identificó que para condiciones climáticas y de suelo similares a las del estudio, las plantas jóvenes de café inician el deterioro a los 40 días de sequía. Con un potencial mátrico del suelo cercano a -40 kPa, por un tiempo mantenido de 120 días, las plantas de café pueden perder un 10% de masa seca y cuando el potencial supera los -90 kPa se pueden dar pérdidas mayores en materia seca y disminuciones en el número de cruces entre los 77 y 113 días.

Palabras clave: crecimiento, estrés hídrico, materia seca, potencial mátrico, riego deficitario, sequía

ABSTRACT

Contextualization: Water is indispensable for plant development, and its response to water deficit varies according to the species and their growth stages.

Knowledge gap: The magnitude of the effect of soil water deficit on the growth of young coffee (*Coffea arabica* L.) plants evaluated over time is unknown.

Purpose: Research was carried out to identify the effect of soil water deficit and, therefore, the sensitivity to drought in young coffee plants.

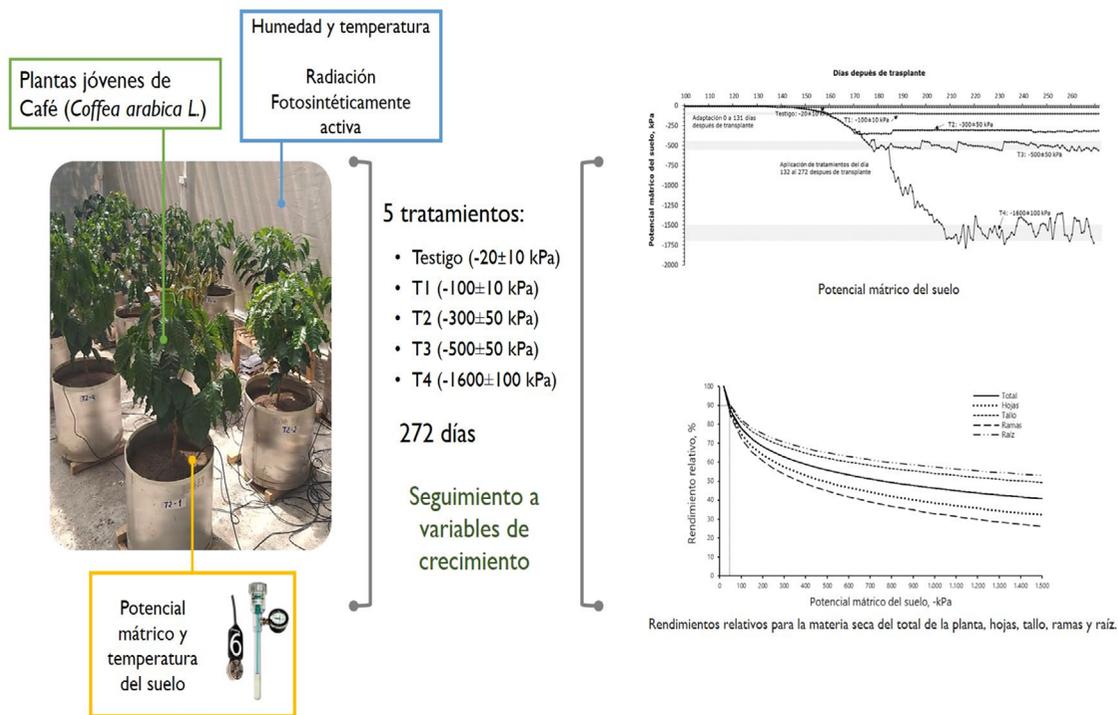
Methodology: The deficit irrigation method was used. Coffee plants of the Cenicafé 1 variety were planted at three months old in cylindrical pots and conditioned for four months in mesh houses at Cenicafé - Planalto. After conditioning, the effect on plants' growth and dry matter subjected to five ranges of soil matrix potential was evaluated over 140 days. Potentials ranged from -20 ± 10 kPa (control) to -1600 ± 100 kPa.

Results and conclusions: The results showed that soil water deficit affects the growth of young coffee (*C. arabica*) plants, which could define *C. arabica* at this stage

as drought sensitive. Plants subjected to the least stress and the extreme drought showed a 30% and 57% decrease in dry matter, respectively. For growth variables, the effect of water deficit was evident in the evaluations at 77, 113, and 140 days of treatment application. In all cases, the results showed differences between the extreme drought and the control of up to 30cm in height and equatorial diameter, 0.9 m² of leaf area, 132 leaves, 3 branches, and 66 nodes. The mathematical models that explained the effect of drought on dry mass were of the logarithmic type. It was identified that for weather and soil conditions similar to those in the study, young coffee plants begin to deteriorate after 40 days of drought. With a soil matrix potential close to -40 kPa, for a time of 120 days, coffee plants can lose 10% of dry mass, and when the potential exceeds -90 kPa there can be further losses in dry matter and decreases in the number of branches between the 77 and 113 days.

Keywords: deficit irrigation, drought, dry matter, growth, matrix potential, water stress

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para el desarrollo de las plantas por intervenir de forma directa e indirecta en la mayoría de los procesos fisiológicos. La escasez de este recurso genera estrés por sequía en los cultivos y es considerado el tipo de estrés abiótico que causa mayores retrocesos en la productividad agrícola (Ahluwalia *et al.*, 2021; DaMatta, 2004).

Entre los parámetros más destacados para relacionar la producción de los cultivos y el agua en el suelo están: i) el agua disponible en el suelo para los cultivos (HS), que es una referencia universal con la que se cuantifica la cantidad de agua retenida en el suelo entre un potencial mátrico de -33 kPa (capacidad de campo) y -1500 kPa (punto de marchitez perma-

nente), propuesto por Richards y Weaver (1943). ii) el riego deficitario (RD), el cual es un método útil para identificar la sensibilidad y los efectos del estrés hídrico en plantas, así como para determinar el nivel de agua en que se maximiza la producción, sin ser requisito el rendimiento máximo que se busca con el riego suplementario. iii) la productividad del agua en los cultivos (PA), definida como el rendimiento o el ingreso neto por unidad de agua utilizada (Molden *et al.*, 2003).

Dado que las plantas utilizan diferentes mecanismos para afrontar el estrés hídrico, la respuesta a corto y largo plazo es diferente (Etesami y Maheshwari, 2015). En general, las respuestas a corto plazo ocurren cuando el período de estrés es muy pequeño y habitualmente no causa daño a las plantas (estrés leve a moderado), mientras que las de largo plazo se asocian con períodos prolongados de estrés y producen lesiones celulares que conllevan a daños permanentes en los tejidos (Kaur y Asthir, 2017).

El estrés leve y el moderado, provocado por la sequía a corto plazo, se asocia con respuestas estomáticas como asimilación ineficaz de CO₂ en las hojas y las cavidades subestomáticas (Liu *et al.*, 2019). El severo, consecuencia de la sequía prolongada, se asocia con las no estomáticas, como disminución en la actividad de rubisco, actividad del cloroplasto, deterioro de los fotosistemas I y II (Liu *et al.*, 2019) y producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (Chiappero *et al.*, 2019), que llevan a modificar rasgos morfológi-

cos y bioquímicos en las raíces (Liang *et al.*, 2017; Fry *et al.*, 2018). Estas reacciones de defensa, en conjunto, producen daño celular, marchitamiento general y disminución en el crecimiento (Tesfaye, *et al.* 2013; Ngumbi y Kloepper, 2016; Liu, *et al.* 2021). No obstante, la respuesta al estrés y la duración de exposición al evento deficitario es diferente entre plantas, pues depende de la especie y el genotipo (Cavatte *et al.*, 2012; Menezes-Silva *et al.*, 2017).

En Colombia, los procesos de estrés por sequía que se presentan en las plantas de café están asociados con la sequía estacional, donde las deficiencias hídricas anuales más severas se presentan en el municipio de Tibacuy en el departamento de Cundinamarca, Chinácota en Norte de Santander, Restrepo en Valle del Cauca, Dolores en Tolima y Pueblo Bello en Cesar. En las dos primeras se presenta la máxima limitación hídrica, con deficiencias acumuladas durante 10 meses continuos (de diciembre a septiembre) (Jaramillo, 2005).

Otro factor que genera estrés por sequía en varias localidades de la zona cafetera colombiana son los eventos fuertes de El Niño, que históricamente (1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2015-2016) han generado disminuciones de hasta un 29% en las lluvias y, de estos periodos, El Niño de 2015-2016 afectó el desarrollo de los árboles de *Coffea arabica* (L.), con atraso en el crecimiento, defoliación, marchitez de las ramas y brotes en alrededor de un 15% de los mismos, así como un deficiente llenado de frutos en el 55% de la producción

(Sadeghian *et al.*, 2017). Estas características fueron descritas por Arcila y Jaramillo (2003) como daños relacionados con la deficiente disponibilidad de agua en el suelo para la planta.

Para *Coffea arabica* L, se presume que el componente clave de la adaptación diferencial a la sequía entre cultivares es el control estomático de la pérdida de agua o la eficiencia en la extracción del agua del suelo (DaMatta y Ramalho, 2006), mientras que el ajuste osmótico o el aumento de la elasticidad de la pared celular, mantienen la turgencia y permiten que la actividad fisiológica se conserve durante períodos prolongados de sequía (Turner, 1996). Además, estas respuestas permiten que el potencial hídrico de la hoja disminuya, sin que se afecten la actividad metabólica de los tejidos y la elongación celular (Morgan, 1984) y al mismo tiempo hace que se dé una fuerza impulsora para la absorción de agua en raíces y otros órganos (Ennajeh *et al.*, 2009).

En todos los cultivares de café el ajuste estomático no es tan eficiente para contrarrestar el estrés hídrico, debido a que en algunos las hojas pierden turgencia a medida que el suelo se seca (Tounekti *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando este ocurre de forma lenta, las plantas pueden generar respuestas de adaptación nivel morfológico y fisiológico (DaMatta, 2004), de forma que las plantas expuestas constantemente al déficit de agua se adapten más fácilmente que aquellas que han estado expuestas a un solo evento (Menezes-Silva *et al.*, 2017).

Otro reporte en el que ponen en evidencia las diferentes respuestas de la planta de café según sus cultivares al déficit hídrico, son los realizados por Molina *et al.* (2016), en el que mediante investigaciones enfocadas en la evaluación de variedades tolerantes a sequía, reportaron dos introducciones etíopes (E.480, ET.56 y E.177) como promisorias progenitoras para el desarrollo de una variedad tolerante al déficit hídrico, debido a que presentaron altura, área foliar, número de hojas, biomasa total, peso seco de la parte aérea y longitud de raíz primaria y secundaria, similar a las plantas con riego normal.

Estudios de riego deficitario en *C. arabica* y uso eficiente de agua en etapa de vivero, mostraron que las plantas en déficit, irrigadas en 40% con relación a los requerimientos hídricos teóricos (suelo a 0.33 MPa y evapotranspiración) tuvieron disminuciones de 17 y 15% en el número de nudos y área foliar en comparación con plantas irrigadas en 120%, y de 14 y 4% en las mismas variables pero con plantas en 80% de riego, que para el uso eficiente de agua fue el nivel de mejores resultados, en comparación con los de 40 y 120% (Minda, 2021). Resultados similares al anterior habían sido reportados para plantas jóvenes de *C. arabica* por Tesfaye *et al.* (2008), Xiaogang *et al.* (2016) y González-Robaina *et al.* (2017).

El efecto del déficit hídrico sobre la respuesta estomática y los fotosistemas ha sido evaluado en *C. arabica* cv Colombia[®] y cv Castillo[®]. resistentes a la roya anaranjada. En la variedad Colombia, bajo condi-

ciones controladas, se observó que la humedad ambiental tiene mayor influencia en las relaciones de intercambio gaseoso que la humedad del suelo (Cano, 2000). Sin embargo, en condiciones no controladas, la humedad del suelo afectó la respuesta fotosintética de la planta, alcanzando un óptimo fotosintético cuando el suelo (andisol) presentó un $32\pm 3\%$ de humedad y una disminución en el crecimiento y desarrollo de las plantas cuando el suelo presentó humedades fuera del rango del 15% al 45% (Gómez, 2000). Además, otros estudios indican que estas relaciones de intercambio gaseoso, también se ven afectadas por las caídas nocturnas de temperatura (Barros *et al.* 1997; Mosquera-Sánchez *et al.*, 1999) y las exposiciones a la luz directa del sol (López *et al.*, 1999), lo cual las hace

de utilidad como variables de apoyo para evaluar la respuesta de la planta al estrés hídrico, pero no específicas. Para la variedad Castillo[®], en plantas de 13 meses de edad, se ha reportado la disminución en la conductancia estomática y cambios en el aparato fotosintético de las plantas después de 20 y 40 días de sequía, respectivamente (León-Burgos, *et al.* 2022).

Debido a la insuficiente información disponible acerca del efecto de la sequía progresiva en las plantas jóvenes de café (*C. arabica*) en Colombia, se realizó una investigación cuyo objetivo fue determinar el efecto del déficit hídrico en las variables de crecimiento y materia seca de plantas jóvenes de café, provenientes de una variedad resistente a la roya.

MATERIALES Y MÉTODOS **2**

Ubicación

La investigación se realizó entre los años 2020 y 2021, con plantas jóvenes de *C. arabica* variedad Cenicafé 1, en las instalaciones de Planalto del Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé, ubicado en Manizales, zona central de Colombia a $4^{\circ} 59' 26.83''$ N y $75^{\circ} 35' 27.09''$ W, a una altitud de 1384 m. El montaje se realizó en una casa de malla bajo condiciones semi-controladas, que durante el tiempo de la

investigación presentó temperatura entre 18 y 30 °C, humedad relativa entre 40 y 80%, radiación fotosintéticamente activa máxima de $305 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un déficit de presión de vapor mínimo de 0.4 y máximo de 2.9 kPa.

Materiales

El material vegetal se obtuvo a partir de semillas comerciales de *C. arabica* varie-

dad Cenicafé 1 conformada por 8 progenies sembradas en suelo Typic Dystrandepts (andisol) proveniente de la estación experimental Naranjal-Cenicafé. Las propiedades químicas del suelo utilizado presentaron valores de pH 4.0 y un contenido de aluminio $1.1 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$, materia orgánica 9.2% y fósforo 8.0 mg kg^{-1} . En bases intercambiables para potasio, calcio y magnesio los valores fueron 0.5, 1.0 y 0.2 mg kg^{-1} respectivamente. Otros elementos como azufre, hierro, manganeso, boro, zinc y cobre estuvieron presentes en cantidades de 15.2, 185.0, 9.0, 0.4, 3.0 y 4.7 mg kg^{-1} , respectivamente. En las propiedades físicas, la densidad aparente y real fue de 0.80 y 2.15 g cm^{-3} , respectivamente. En la distribución del tamaño de partículas las arenas representaron el 54%, los limos el 35% y las arcillas el 12%.

Para desarrollar el experimento se utilizaron materos cilíndricos tipo lisímetro, de acero inoxidable de 0.40 m de diámetro por 0.40 m de alto y para la aplicación del riego, tubos de PV de 0.4 m de longitud y 0.025 m de diámetro, microperforados y tapados en la base. Con el propósito de registrar el potencial mátrico y temperatura del suelo se emplearon sensores Teros (MPS 6 y MPS 21) y tensiómetros marca Irrrometer. A fin de monitorear las condiciones climáticas de la casa de malla se empleó un sensor HMP60 para temperatura ambiental y humedad relativa, y un SQ-110 para radiación fotosintéticamente activa. Tanto las variables edáficas como climáticas se registraron cada cinco minutos.

Método estadístico

El efecto de la sequía se evaluó a través del riego deficitario (RD), mediante el control de cinco rangos de potencial mátrico del suelo que fueron desde $-20 \pm 10 \text{ kPa}$ (tratamiento control) hasta $-1600 \pm 100 \text{ kPa}$, bajo un diseño de bloques completamente aleatorios de seis bloques y cinco tratamientos, con unidad experimental de una planta. El factor de bloqueo fue el número de hojas por planta a los 99 días después del trasplante y la variable de interés materia seca total de la planta. El bloqueo se realizó debido a que la variedad Cenicafé 1 está conformada por varias progenies, que, si bien como variedad tienen una arquitectura definida, entre ellas pueden presentar variaciones en el crecimiento.

Instalación

Cuando las plantas alcanzaron tres meses de edad, correspondientes al tiempo en el que emitieron el primer par de hojas verdaderas, se trasplantaron a los materos tipo lisímetro. A cada matero se adicionaron 50 kg de suelo con humedad de 44.5%, hasta una altura de 0.35 m, para un volumen de 0.044 m^3 , con lo que se procuró conservar la densidad aparente del suelo en campo (800 kg.m^{-3}). También, se instalaron los sensores de potencial mátrico y temperatura del suelo marca Teros (MPS 6 y MPS 21), a una profundidad de 0.15 a 0.20 m, que corresponde al rango

de profundidad del perfil del suelo, en el que la planta de café presenta el mayor número de raíces absorbentes (Rendón y Giraldo, 2019).

Se instalaron los tubos de PVC perforados (cinco por materia) alrededor de la planta, con el fin de que la aplicación del riego fuera lo más homogénea posible en todo el volumen de suelo. Un mes antes del trasplante se hizo un ajuste de pH del suelo de 4.0 a 5.1 con caliza dolomítica, según las recomendaciones de Sadeghian (2008).

Las plantas se dejaron en adaptación durante cuatro meses y medio en la casa de malla. El manejo agronómico fue el recomendado por Cenicafé y la fertilización se realizó según las recomendaciones de Sadeghian (2008). En los primeros 45 días de la etapa de adaptación, las plantas se mantuvieron con un potencial mátrico en el suelo entre -30 y -10 kPa, que se logró con aplicaciones semanales de 1.5 L de agua por planta y en los 90 días siguientes se mantuvieron en dicho potencial con aplicaciones semanales de 2.0 L de agua

por planta. Los riegos se realizaron por medio de los tubos de PCV perforados, mencionados en los materiales.

Aplicación de tratamientos

Pasados 132 días de aclimatación, se inició la aplicación de los tratamientos (T) de riego deficitario, mediante control de potencial mátrico: Testigo: -20 ± 10 kPa, T1: -100 ± 10 kPa, T2: -300 ± 50 kPa, T3: -500 ± 50 kPa y T4: -1600 ± 100 kPa. Dado que la metodología respondió a un déficit progresivo, el potencial mátrico de T1 se alcanzó a los 24 días de déficit, el T2 a los 34 días de déficit, el T3 a los 42 días de déficit y el T4 a los 71 días (Figura 1). Para mantener las plantas el mayor número de días posibles en los rangos establecidos en cada tratamiento, se aplicaron las cantidades de agua que se muestran en la Tabla 1, las cuales fueron desde 271.44 L para las 6 plantas testigo, distribuidos en 198 riegos y 4.05 L para las 6 plantas del T4 distribuidos en 70 riegos.

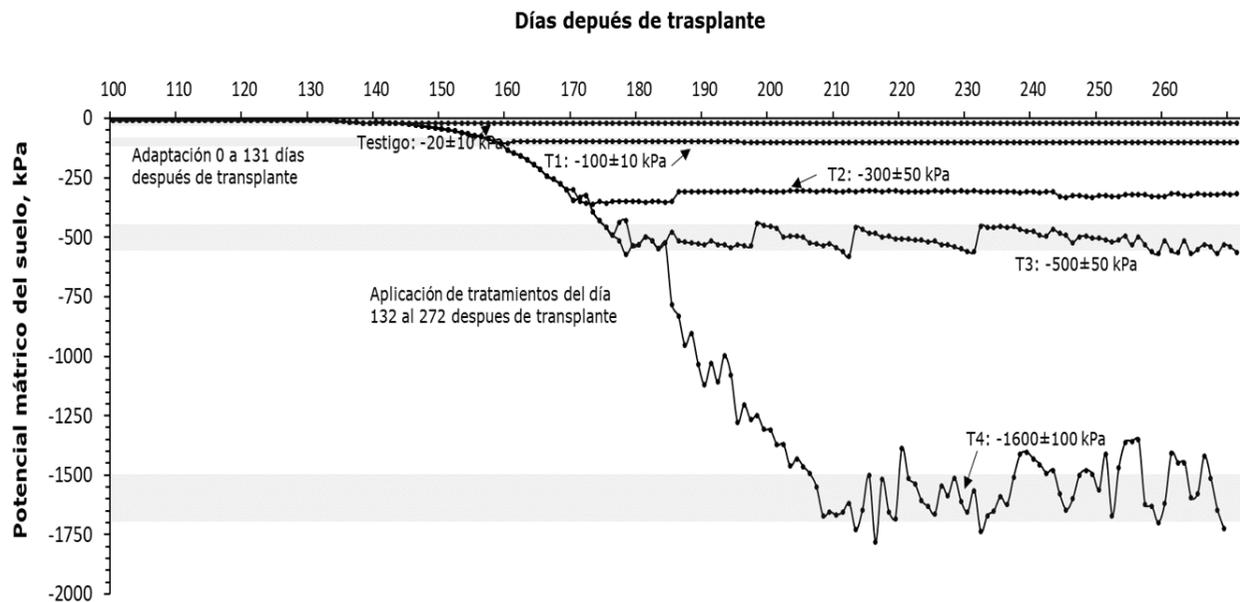


Figura 1. Valores promedio de los potenciales mátricos del suelo en los cinco tratamientos (promedio de 6 sesores por tratamiento, con medición cada cinco minutos)

Fuente: autores.

Tabla 1. Cantidad de agua aplicada (L) para mantener los tratamientos de riego deficitario en los rangos de potencial mátrico establecidos

Tratamiento	Días después del trasplante (DDT)					Total, L	Número de riegos
	132 a 153	154 a 184	185 a 215	216 a 245	246 a 272		
	Días de aplicación de tratamientos (DAT)						
	0 - 21	22 - 52	53 - 83	84 - 113	114 - 140		
Litros de agua aplicados por tratamiento (6 plantas)							
Testigo (-20±10 kPa)	22.80	38.04	60.40	74.60	75.60	271.44	198
T1 (-100±10 kPa)	0.30	10.37	27.03	34.18	33.26	105.14	286
T2 (-300±50 kPa)	0.00	12.55	23.46	18.09	15.83	69.48	247
T3 (-500±50 kPa)	0.00	1.23	7.30	10.35	8.48	27.36	147
T4 (-1600±100 kPa)	0.00	0.00	0.34	2.28	1.43	4.05	70

Fuente: autores.

Evaluación de variables

La evaluación se enfocó en las variables de crecimiento, debido a que según la literatura el efecto de la sequía severa en las plantas se refleja en dichas variables. La principal fue biomasa seca total (hojas, ramas, tallos y raíces) y se cuantificó 140 días después de haber iniciado la aplicación de los tratamientos (DAT), tiempo que corresponde a los 272 días después de trasplante (DDT).

En la casa de malla se separó la parte área de las raíces, en el laboratorio se lavaron las raíces con agua para retirar los residuos de suelo y se separaron hojas, tallos y ramas. Cada una de las partes de la planta se secó por separado en una estufa de ventilación forzada a 60 °C por 72 horas y se pesaron en balanza de precisión con legibilidad de 0.1 g.

Como variables complementarias se midió el área foliar según la metodología propuesta por Unigarro-Muñoz *et al.* (2015), altura de la planta, diámetro ecuatorial, número de cruces, nudos y hojas. Para las últimas cinco variables las mediciones se realizaron a los 50, 99, 132, 175, 209, 245 y 272 DDT, en el que los 132 DDT corresponden al día 0 después de aplicar los tratamientos (DAT), los 175 DDT a 43 DAT, 209 DDT a 113 DAT y 272 DDT a 140 DAT. Las lecturas del día 99 DDT se tomaron como insumo para el bloqueo.

Análisis de resultados

Tanto para la variable principal como para las complementarias, se realizó estadística descriptiva y con el fin de comparar el efecto de los tratamientos en las variables analizadas se realizó el análisis de varianza en dos vías para las variables de crecimiento en el tiempo y en una vía para las de materia seca, ambas para un diseño experimental de seis bloques y cinco tratamientos, con una significancia del 95%. Para las variables altura, diámetro ecuatorial, número de hojas, cruces y nudos, los grados de libertad para tratamientos fue de cuatro, para DAT tres, para la interacción entre estas de 12 y para residuos 100; para área foliar cuatro en tratamientos, dos para DAT, ocho para la interacción entre estas y 75 en residuos. En los casos en los que el análisis de varianza indicó efecto de los tratamientos se realizó la prueba de comparación de medias de Duncan, con un nivel de significancia del 5%. Se probaron los supuestos asociados con la homogeneidad de la varianza por medio de la prueba de Leven al 95% y normalidad por medio de la prueba z para asimetría y curtosis al 95%. En el análisis de la información se utilizó el programa estadístico Statgraphics.

También se buscaron los modelos matemáticos que explicaron el efecto del potencial mátrico del suelo en la materia seca total, de raíces, tallo, ramas y hojas. Para

ello el potencial mátrico del suelo se tomó como tensión del suelo (potencial mátrico del suelo multiplicado por -1). Con los modelos obtenidos se realizó una figura de rendimientos relativos y se determinó

el potencial mátrico del suelo en el que se generan pérdidas de hasta un 10% a causa de la sequía. Se empleó el software SigmaPlot versión 10.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables de crecimiento

El crecimiento de las plantas se vio afectado por los tratamientos en el tiempo y la interacción de estos, tal como se aprecia en la Figura 2 de interacciones y la Tabla

2 de valores P: las diferencias en altura, diámetro ecuatorial, número de hojas y área foliar indicadas en los análisis de varianza a partir de las evaluaciones de los 77 DAT, y en número de cruces y nudos en las de los 113 DAT (Tabla 3 y Figura 3).

Tabla 2. Valores P, producto del análisis de varianza en dos vías para los tratamientos y los días de aplicación de los tratamientos (DAT).

Fuente	Altura		Numero de hojas		Diámetro ecuatorial		Número de cruces		Número de ramas		Número de nudos		Área foliar	
	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P
Efectos principales														
A: Tratamiento	21,72	0,0000	20,31	0,0000	22,84	0,0000	11,68	0,0000	11,68	0,0000	17,57	0,0000	28,07	0,0000
B: DAT	24,49	0,0000	22,18	0,0000	19,59	0,0000	26,96	0,0000	26,96	0,0000	22,32	0,0000	12,60	0,0000
Interacciones														
AB	3,45	0,0003	4,07	0,0000	2,37	0,0101	2,48	0,0069	2,48	0,0069	3,62	0,0002	3,77	0,0009

Fuente: autores.

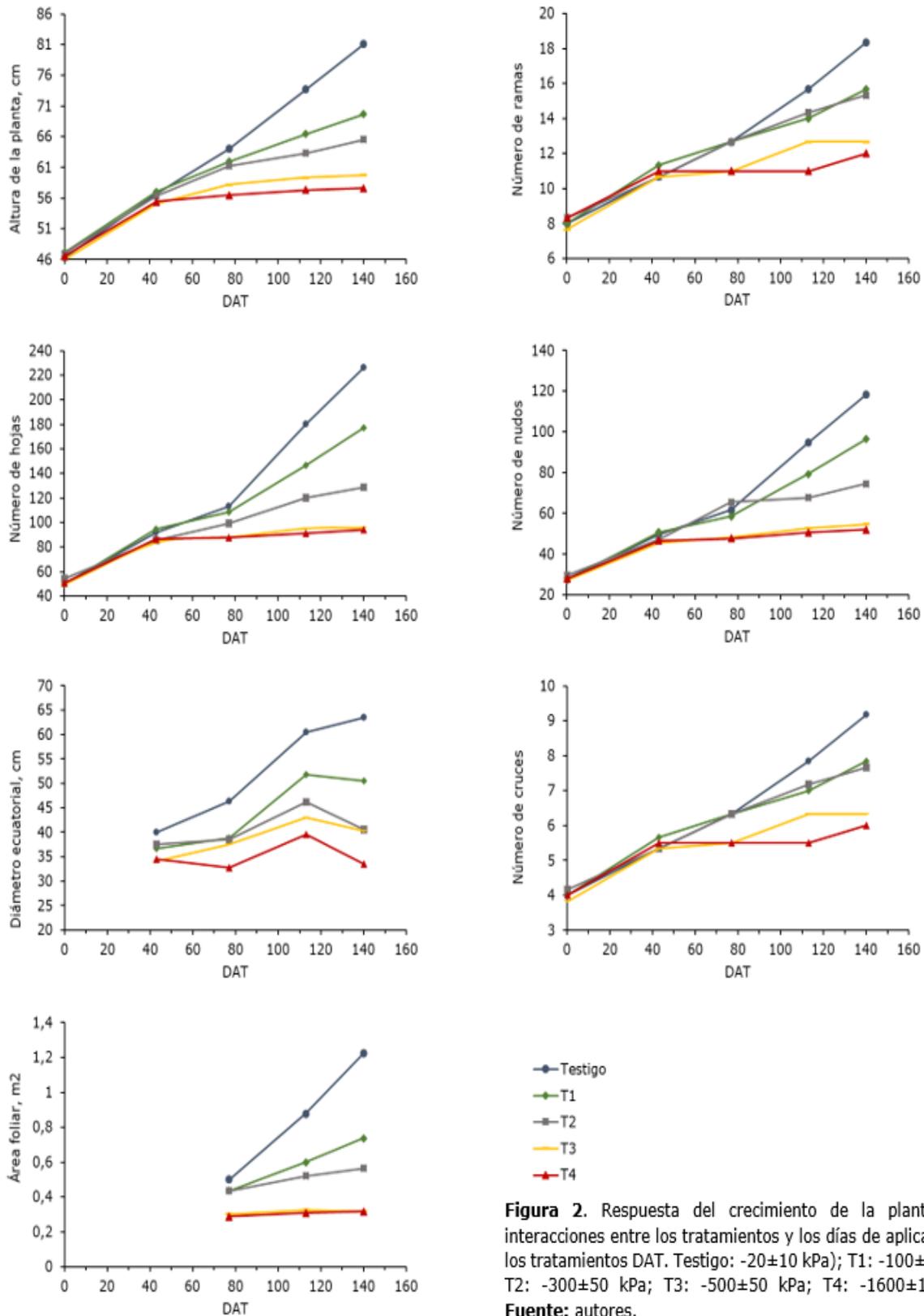


Figura 2. Respuesta del crecimiento de la planta a la interacciones entre los tratamientos y los días de aplicación de los tratamientos DAT. Testigo: -20 ± 10 kPa; T1: -100 ± 50 kPa; T2: -300 ± 50 kPa; T3: -500 ± 50 kPa; T4: -1600 ± 100 kPa
Fuente: autores.

El efecto en la altura de la planta mostró diferencias entre el testigo y el tratamiento más restrictivo en agua (T4). Esta condición fue más acentuada al pasar el tiempo, pues a los 113 DAT los tratamientos T2, T3 y T4 fueron diferentes al testigo y a los 140 DAT. La diferencia se dio con todos los tratamientos (Tabla 3, Figura 2). El diámetro ecuatorial tuvo una dinámica similar a la altura, en el que el efecto se

reflejó por primera vez en la evaluación de los 77 DAT, con diferencia entre el testigo y T4 y en las evaluaciones siguientes (113 y 140 DAT) la diferencia fue con T2, T3 y T4 y en contraste con la altura, T1 fue igual el testigo en todas las evaluaciones (Tabla 3, Figura 2), resultados que coinciden con los presentados por Tesfaye *et al.* (2008) y González-Robaina *et al.* (2017), entre otros.



Izquierda superior: hojas.
 Derecha superior: ramas y tallos.
 Izquierda inferior: tallos.
 T1 (testigo -20 ± 10 kPa); T2 (-100 ± 50 kPa); T3 (-300 ± 50 kPa); T4 (-500 ± 50 kPa); T5 -1600 ± 100 kPa).

Figura 3. Efecto del déficit hídrico en las diferentes partes de la planta de café variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento, tras 140 días de aplicación de tratamientos de sequía

Fuente: autores.

Para el número de hojas, el efecto de los tratamientos se evidenció a partir de la lectura de los 77 DAT, en la que T3 y T4 fueron mayores que el testigo, al igual que el área foliar. En las lecturas de los 113 y 140 DAT el número de hojas fue diferente en los tratamientos T2, T3 y T4 frente al testigo. En cuanto al área foliar, sólo hasta la evaluación de los 140 DAT se presentaron diferencias de todos los tratamientos frente al testigo (Tabla 3, Figura 2). El efecto de los tratamientos en el número de cruces empezó a evidenciarse a los 113 DAT, con diferencia del testigo

con T3 y T4, situación que se mantuvo en la lectura de 140 DAT, mientras que en número de nudos las evaluaciones de los 113 y 140 DAT presentaron diferencias del testigo con respecto a T2, T3 y T4 (Tabla 3, Figura 2). La disminución en el número de nudos y el área foliar a medida que el déficit hídrico aumenta también fue reportada por Minda (2021), Xiaogang *et al.* (2016) y González-Robaina *et al.* (2017). Según Morgan (1984), dichas diferencias en la elongación celular dejan ver que es un comportamiento contrario al que se da para plantas con potencial de adaptación.

■ **Tabla 3.** Resumen estadístico y comparación de medias entre tratamientos, para las variables de crecimiento en el tiempo

Variable	DAT	TRATAMIENTOS				
		Testigo -20±10 kPa	T1 -100±50 kPa	T2 -300±50 kPa	T3 -500±50 kPa	T4 -1600±100 kPa
n=6						
Altura de la planta, cm	43	56.75±2.36	57.00±1.46	56.33±2.14	55.08±1.61	55.42±1.48
	77	64.00±2.64a	61.92±1.80ab	61.25±2.14ab	58.17±1.60ab	56.42±1.26 b
	113	73.67±2.66a	66.42±2.91ab	63.33±1.41bc	59.33±1.53bc	57.33±1.25c
	140	81.08±2.99a	69.67±3.83b	65.50±1.34bc	59.75±1.44c	57.58±1.23c
Diámetro ecuatorial, cm	43	40.00±2.96	36.67±1.61	37.50±1.71	34.00±1.37	34.50±3.02
	77	46.33±4.07a	38.83±1.64ab	38.50±2.43ab	37.50±1.77ab	32.83±1.49b
	113	60.50±4.40a	51.83±3.70ab	46.17±1.96b	43.00±1.34b	39.50±1.75b
	140	63.50±5.02a	50.50±4.57ab	40.50±2.35bc	40.33±2.32bc	33.50±1.23c
Número de hojas	43	91.67±3.77	94.50±7.67	85.67±6.01	83.50±4.96	86.33±5.48
	77	113.17±5.05a	108.33±10.51a	99.50± 4.24ab	88.00±5.30b	87.50±5.14b
	113	180.00±10.91a	146.33±26.40ab	120.00±7.52bc	95.17±5.56c	91.00±5.18c
	140	226.00±15.20a	177.17±35.88ab	128.83±7.18bc	95.83±5.45c	93.83±5.22c
Área foliar, m ²	77	0.50±0.07a	0.44±0.03ab	0.44±0.06ab	0.30±0.03b	0.29±0.05b
	113	0.88±0.10a	0.60±0.09a	0.52±0.08ab	0.33±0.03b	0.31±0.05b
	140	1.22±0.11a	0.74±0.15b	0.56±0.09bc	0.32±0.02c	0.32±0.05c
Número de cruces	43	5.33±0.33	5.67±0.33	5.33±0.21	5.33±0.21	5.50±0.22
	77	6.33±0.33	6.33±0.42	6.33±0.21	5.50±0.34	5.50±0.22
	113	7.83±0.17a	7.00±0.68ab	7.17±0.17ab	6.33±0.33bc	5.50±0.22c
	140	9.17±0.31a	7.83±0.95ab	7.67±0.33abc	6.33±0.33bc	6.00±0.00c

Número de nudos	43	49.50±1.84	50.67±3.94	47.17±3.28	45.33±2.59	46.50±2.67
	77	61.67±2.69	58.50±5.28	65.50±11.71	48.17±2.75	47.67±2.50
	113	94.67±5.46a	79.33±13.11ab	67.67±3.67bc	52.67±3.05c	50.50±2.53c
	140	118.17±7.67a	96.50±17.68ab	74.50±2.87bc	54.50±2.77c	52.00±2.21c

DAT= días después de aplicación de los tratamientos. Cada letra significa un grupo homogéneo según la prueba de múltiples rangos de Duncan con significancia al 5% y se lee por filas debido a que muestra la diferencias entre tratamientos. Los datos que no presentan letras se asocian con aquellas evaluaciones en las que, según el análisis de varianza, no hubo efecto de los tratamientos en las variables, por lo cual pertenecen al mismo grupo homogéneo

Fuente: autores.

Materia seca

El promedio de la materia seca total de la planta estuvo entre 223.44±23.3 y 96.17±4.9 g, correspondientes al testigo y T4, respectivamente. Para la raíz, los valores estuvieron entre 60.25±6.07 y 31.22±1.83 g, el tallo entre 29.54±3.65 y 14.33±0.56 g, las ramas de 25.88±3.74 y 8.29±0.66 g, y las hojas de 107.77±10.44 a 42.34±3.65 g, en todos los casos el primer valor fue para el testigo y el segundo para T4 (Tabla 4). Estos resultados de respuesta de la planta de *C. arabica* a la sequía, concuerdan con los presentados por Tesfaye *et al.* (2008) y Minda (2021), entre otros; y distan de los de Chemura *et al.* (2014), quienes en *C. arabica* de 8 meses de edad no encontraron cambios ni en la biomasa seca aérea ni de raíces, lo cual se puede explicar en que ellos realizaron la investigación hasta los 21 y 28 días de sequía y en la presente investigación los cambios se empezaron a evidenciar a los 77 y 113 días de estar sometidas las plantas a sequía (Tabla 3).

Tanto la materia seca total como sus partes se vieron afectadas por los trata-

mientos, lo que indica que las plantas incluidas en el estudio son sensibles al déficit hídrico. En la mayoría de los casos los tratamientos difirieron del testigo y T4 (prueba de Duncan al 5%). Entre tratamientos, T1 y T2 se ubicaron en el mismo grupo homogéneo para cada una de las partes de la planta y la suma de estas (Tabla 4); a su vez, T2 y T3 se ubicaron en el mismo grupo homogéneo para la materia seca total, ramas y hojas; y entre T3 y T4 la materia seca de tallos, ramas, hojas y raíz fueron estadísticamente iguales y diferente en materia seca total. Esto indica que las variaciones fueron progresivas, con disminuciones en la materia seca a medida que el agua era más restrictiva para la planta, condición que también se corroboró con los modelos tipo logarítmico que se presentan en la Figura 4. Los modelos de respuesta tipo logarítmico se asocian con la no linealidad que presentan los cultivos arbóreos al déficit hídrico mencionados por Moriana *et al.* (2003) para olivo, y por Fereres y Soriano (2007) al compararlos de manera generalizada con la respuesta lineal de los cultivos anuales.

Tabla 4. Valores promedio, error estándar y grupo homogéneo de la materia seca de las partes de la planta, por tratamiento (n=6)

Parte de la planta	Testigo	T1	T2	T3	T4
	materia seca, g				
Total	223.44±23.30 ^a	157.27±21.39 ^b	142.31±10.96 ^{bc}	105.84±6.82 ^{cd}	96.17±4.97 ^e
Tallo	29.54±3.65 ^a	21.53±2.44 ^b	20.93±1.29 ^b	17.15±1.35 ^{bc}	14.33±0.56 ^c
Ramas	25.88±3.74 ^a	15.85±2.74 ^b	12.19±1.47 ^{bc}	9.26±0.83 ^c	8.29±0.66 ^c
Hojas	107.77±10.44 ^a	69.03±12.09 ^b	59.18±5.94 ^{bc}	43.41±2.57 ^c	42.34±3.65 ^c
Raíz	60.25±6.07 ^a	50.87±5.22 ^a	50.02±3.28 ^a	36.01±4.70 ^b	31.22±1.83 ^b

Cada letra significa un grupo homogéneo según la prueba de múltiples rangos de Duncan con significancia al 5%.

Fuente: autores.

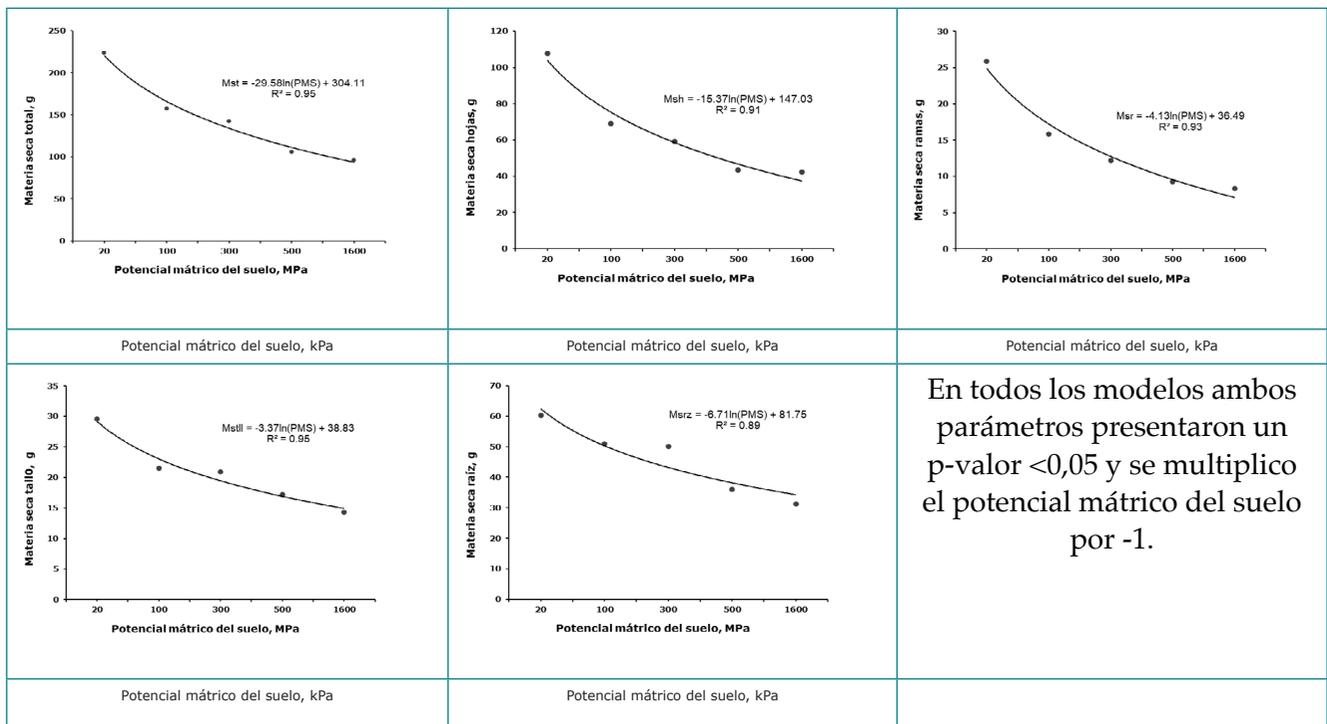


Figura 4. Materia seca total, hojas, ramas, tallo y raíz, de la planta joven de café en respuesta al déficit hídrico

Fuente: autores.

Las relaciones entre la materia seca de la raíz y la parte aérea (hojas, ramas y tallo) fue de 1 a 3 en el testigo y de 1 a 2 en los tratamientos, sin diferencia entre los tratamientos para estas relaciones, lo que difiere de lo presentado por Tesfaye *et al.* (2008), quienes advierten que la sequía genera una disminución en esta relación, es decir, ocurre un aumento en la masa seca de las raíces de las plantas sometidas a déficit hídrico. En cuanto a raíces, además de las variaciones en materia seca, se observaron cambios en longitud y abundancia (Figura 5), lo que concuerda con lo expuesto por Liang *et al.* (2017); Fry *et al.* (2018), como respuesta de las plantas a la sequía prolongada.



Figura 5. Efecto del déficit hídrico en las raíces de las plantas de café variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento, tras 140 días de aplicación de tratamientos. T1 (testigo -20 ± 10 kPa); T2 (-100 ± 50 kPa); T3 (-300 ± 50 kPa); T4 (-500 ± 50 kPa); T5 (-1600 ± 100 kPa)

Fuente: autores.

Los efectos de la sequía presentados en esta investigación muestran que en las

plantas jóvenes de café (*C. arabica*), la tasa de crecimiento disminuye en respuesta a los diferentes niveles de déficit hídrico, lo cual indica que no se vio reflejado un posible aumento en la fuerza de extracción de agua, lo anterior sustentado en que no se detectaron disminuciones del potencial mátrico del suelo que indicara que la planta estaba tomando el agua del suelo al mismo ritmo que en potenciales mátricos más bajos, atributo que sería considerado como un componente de adaptación para algunas plantas (Turner, 1996) y genotipos de café (DaMatta y Ramalho, 2006). Estos resultados también se respaldan en que hay cultivares de café que no son tan eficientes para contrarrestar el estrés hídrico (Tounekti *et al.*, 2018), y que la disminución en el crecimiento de las plantas afectadas hace que a su vez la fuerza impulsora para la absorción de agua en raíces y otros órganos sea menor en comparación con las plantas irrigadas, que por tener un mayor crecimiento tienen una mayor fuerza de extracción (Ennajeh *et al.*, 2009).

Rendimiento relativo

En términos de rendimientos relativos, en el que los valores de materia seca del testigo (tratamiento irrigado) fueron tomados como 100%, se encontró que los órganos más afectados fueron las ramas, con reducciones que van desde el 39% para el tratamiento considerado como menos limitante, hasta 68% para la condición más estresante; luego siguen las hojas con reducciones desde

36 hasta 61%, los que menos reducciones presentaron fueron los tallos con valores entre 27 y 52%, las raíces con reducciones de 16 a 48%; la materia seca total presentó reducciones entre el 30 y 57% y se ubicó en la parte intermedia de reducción de en comparación con los diferentes órganos (Figura 6).

Al tener como referencia los valores relativos de la Figura 6, se presume que las pérdidas del 10% en la producción de materia seca total y sus partes, se da aproximadamente a una tensión de -40 kPa en un periodo mantenido de 120 días, teniendo en cuenta que dicho potencial se alcanza en menos de 24 días (Figura 2). Con relación a la afectación de las partes, hojas y ramas presentan mayor deterioro en el rendimiento en comparación con ramas y raíz. Además, según las tendencias de las curvas, las mayores pérdidas se dan apro-

ximadamente hasta los -200 kPa en un periodo mantenido de 110 días, teniendo en cuenta que dicha tensión se alcanzó aproximadamente a los 30 días (Figura 2); sin embargo, las pérdidas se incrementan a medida que se da una disminución de la disponibilidad de agua en el suelo, el cual se da a través del tiempo.

Los resultados de crecimiento se pueden asociar con las respuestas de intercambio de gases presentadas por León-Burgos, *et al.* (2022) para plantas de la variedad Castillo® (*C. arabica*) de 13 meses de edad en el que advierten que la repuesta de la planta inicia pasados 20 días de la sequía y que los cambios en el aparato fotosintético se dan a los 40. Este último tiempo coincide con la disminución del 10% del rendimiento propuesta en esta investigación para condiciones similares de clima y tipo de suelo.

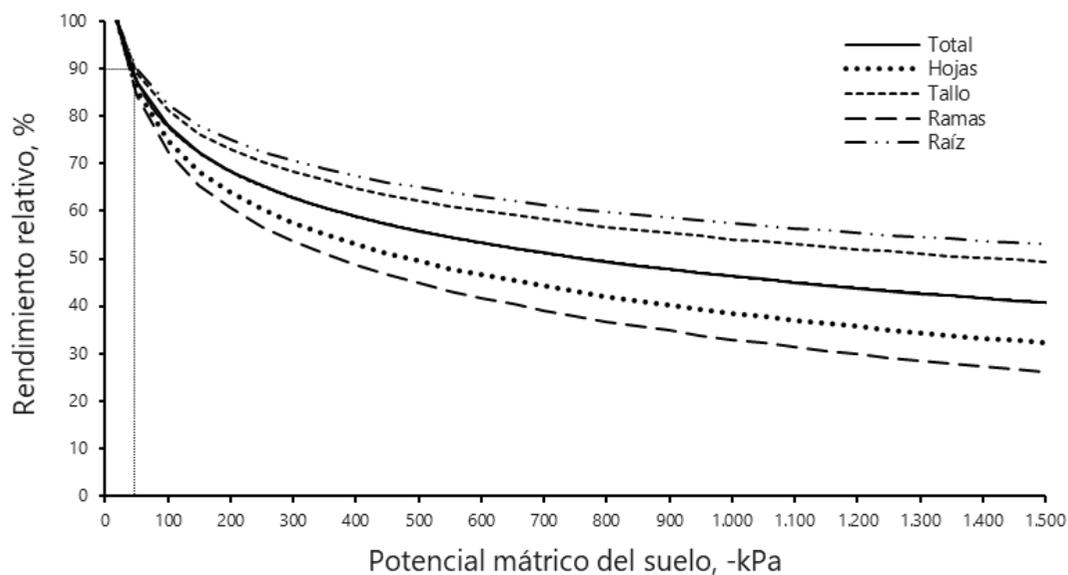


Figura 6. Rendimientos relativos para la materia seca del total de la planta, hojas, tallo, ramas y raíz

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

Debido a la disminución en el rendimiento relativo de hasta en 57% y el retardo en el crecimiento, reflejado con diferencias de 30 cm en altura y diámetro ecuatorial, a causa de la disminución de agua en el suelo, se concluye que las plantas de *C. arabica* son sensibles al déficit hídrico en su etapa de establecimiento y bajo las condiciones de estudio.

La sequía prolongada por 113 días ocasionó disminución en el número de cruces y nudos en las plantas de la variedad Cenicafé 1, en etapa de establecimiento. Este deterioro puede reducirse con la suspensión de la sequía antes de 40 días, periodo después del cual se evidenciaron disminuciones en altura, diámetro ecuatorial,

número de hojas y área foliar, además de determinarse como el tiempo en el cual se da una pérdida del 10% del rendimiento de la biomasa.

El rango agua en el suelo, disponible para las plantas de café variedad Cenicafé 1 en etapa de establecimiento, se debe estimar teniendo como límite inferior los -300 ± 50 kPa y no hasta los -1500 kPa, debido a que después de dicho potencial mátrico, la planta presenta las mayores disminuciones en rendimiento y crecimiento; además, no muestra diferencias en las variables de crecimiento ni en la materia seca de la parte aérea y raíces, entre los potenciales de -500 ± 50 y -1600 ± 100 kPa.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Luz Adriana Lince Salazar: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura y edición. **Siavosh Sadeghian Khalajabadi:** análisis de datos y revisión del documento. **Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera:** metodología, análisis de datos, escritura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Cenicafé – Federación Nacional de cafeteros de Colombia, por el apoyo financiero en la investigación. A Juan Pablo Carvajal por la automatización y transmisión de los datos de las variables am-

bientales y de potencial mátrico del suelo; Carlos Andrés Unigarro por asesorar la evaluación del área foliar; Jaroliver Cardona y Arturo Gómez por el acompañamiento en el montaje, evaluación de variables y mantenimiento de las plantas.

LITERATURA CITADA

- Ahluwalia, O., Singh, P.C., and Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- Arcila, J. y Jaramillo, A. (2003). Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 311, 1–8.
- Barros, S.R., Da Se Mota, J.W., DaMatta, F.N., and Maestri, M. (1997). Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crop Research*, 54(1), 65-72. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00045-2)
- Cavatte, P.C., Martins, S.C., Morais, L.E., Silva, P.E., and DaMatta, F.M. (2012). The physiology of abiotic stresses. In *Plant breeding for abiotic stress tolerance* (pp. 21-51). https://doi.org/10.1007/978-3-642-30553-5_3
- Chemura, A., Mahoya, C., Chidoko, P., and Kutuywayo, D. (2014). Effect of soil moisture deficit stress on biomass accumulation of four coffee (*Coffea arabica*) varieties in Zimbabwe. *International Scholarly Research Notices*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/767312>
- Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L.G.S., Palermo, T.B., and Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, 139, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553>

- DaMatta, F.M. (2004). Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 1-6. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202004000100001>
- DaMatta, F.M., and Ramalho, J.D.C. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian journal of plant physiology*, 18(1), 55-81. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>
- Ennajeh, M., Vadel, A.M., and Khemira, H. (2009). Osmoregulation and osmoprotection in the leaf cells of two olive cultivars subjected to severe water deficit. *Acta physiologiae plantarum*, 31(4), 711-721. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0283-6>
- Etesami, H., and Maheshwari, D.K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, 156, 225-246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>
- Fereres, E., and Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fry, E.L., Johnson, G.N., Hall, A.L., Pritchard, W.J., Bullock, J.M., and Bardgett, R.D. (2018). Drought neutralises plant-soil feedback of two mesic grassland forbs. *Oecologia*, 186(4), 1113-1125. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4082-x>
- Gómez, M.O. (2000). *Efecto del estrés hídrico sobre la actividad fotosintética en la planta de café (Coffea arabica L. cv, Colombia)*. [Tesis de Grado, Ingeniería Agronómica]. Universidad de Caldas.
- González-Robaina, F., Cisneros-Zayas, E. y Montilla, E. (2017). Respuesta al déficit hídrico del cafeto (*Coffea arabica L.*) en diferentes fases de desarrollo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(3), 4-11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000300001&lng=es&tlng=es
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná, Cenicafé.
- Kaur, G., and Asthir, B. (2017). Molecular responses to drought stress in plants. *Biol Plant* 61, 201-209. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0700-9>
- León-Burgos, A.F., Unigarro, C., and Balaguera-López, H.E. (2022). Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombian? *South African Journal of Botany*, 149, 366-375. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.034>
- Liang, C., Wang, W., Wang, J., Ma, J., Li, C., Zhou, F., Zhang Y.Y., Zhang, L., Li, W., and Huang, X. (2017). Identification of differentially expressed genes in sunflower (*Helianthus annuus*) leaves and roots under drought stress by RNA

- sequencing. *Botanical studies*, 58(42). <https://doi.org/10.1186/s40529-017-0197-3>
- Liu, F., Ma, H., Peng, L., Du, Z., Ma, B., and Liu, X. (2019). Effect of the inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on the photosynthetic characteristics of *Sambucus williamsii* Hance container seedlings under drought stress. *AMB Expr.*, 9, 169. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0899-x>
- Liu, X., Li, R., Han, Z., Yang, Q., and Jiang, Z. (2021). Effects of deficit irrigation on soil microorganisms and growth of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) under different shading cultivation modes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(6), 99-108. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211406.5442>
- López, J.C. (1999). Comportamiento fotosintético diario de la hoja del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Colombia. *Informe anual de labores de la disciplina de fisiología vegetal*. Chinchiná, Cenicafé.
- Menezes-Silva, P.E., Sanglard, L.M., Ávila, R.T., Morais, L.E., Martins, S.C., Nobres, P., Patreze, C.M., Ferreira, M.A., Araújo, W.L., Fernie, A.L., and DaMatta, F.M. (2017). Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. *Journal of experimental botany*, 68(15), 4309-4322. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx211>
- Minda, T. (2021). Effect of Deficit Irrigation on Dry Matter Yield and Water Productivity of Young Harerghe Coffee Genotypes at Jimma, Southwest Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4), 246-252. <https://doi:10.11648/j.ajaf.20210904.21>
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., and Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (pp. 1-18). Cabi Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0001>
- Molina, D.M., Ramírez, V.H. y Cortina, H.A. (2016). Comportamiento de accesiones de *Coffea arabica* sometidas a déficit de humedad del suelo. *Cenicafé* 67(1), 41-54. <https://doi.org/10.38141/10778/67102>
- Morgan, J.M. (1984). Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual review of plant physiology*, 35(1), 299-319. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.35.060184.001503>
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., and Ferreres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425-431. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425>
- Mosquera-Sánchez, L.P., Riaño, N.M., Arcila, J. y Ponce, C.A. (1999). Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea* sp. *Cenicafé*, 50(3), 215-221. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4197/1/arc050%2803%29215-221.pdf>

- Ngumbi, E., and Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009>
- Rendón, J.R. y Giraldo, A. (2019). Distribución de raíces en café variedad Castillo® bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé* 70(1), 7-17. <https://doi.org/10.38141/10778/70101>
- Richards, L.A., and Weaver, L.R. (1943). Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Sci.*, 56, 331-340. <https://doi.org/10.1097/00010694-194311000-00002>
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico*, 32.
- Sadeghian, S., Jaramillo, A. y Duque, H. (2017). Nutrición de los cafetales en Colombia, en escenarios de la niña. *Avances Técnico, Cenicafé*, 477.
- Tesfaye, S.G., Razi, I.M., and Maziah, M. (2008). Effects of deficit irrigation and partial rootzone drying on growth, dry matter partitioning and water use efficiency in young coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Journal of food, agriculture & environment*.
- Tesfaye, S.G., Ismail, M.R., Kausar, H., Marziah, M., and Ramlan, M.F. (2013). Plant water relations, crop yield and quality in coffee (*Coffea arabica* L.) as influenced by partial root zone drying and deficit irrigation. *Australian Journal of Crop Science*, 7(9), 1361-1368.
- Tounekti, T., Mahdhi, M., Al-Turki, T.A., and Khemira, H. (2018). Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. *South African journal of botany*, 117, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.022>
- Turner, N.C. (1996). Further progress in crop water relations. *Advances in agronomy*, 58, 293-338. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60258-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60258-8)
- Unigarro-Muñoz, C.A., Hernández-Arredondo, J.D., Montoya-Restrepo, E.C., Medina-Rivera, R.D., Ibarra-Ruales, L.N., Carmona-González, C.Y. and Flórez-Ramos, C.P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 74(4), 412-416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.