

COMPORTAMIENTO DE ACCESIONES DE *Coffea arabica* SOMETIDAS A DÉFICIT DE HUMEDAD DEL SUELO

Diana María Molina Vinasco*, Víctor Hugo Ramírez Builes**, Hernando Alfonso Cortina Guerrero*

MOLINA V., D. M.; RAMÍREZ B., V. H.; CORTINA G., H. A. Comportamiento de accesiones de *Coffea arabica* sometidas a déficit de humedad del suelo. Revista Cenicafé 67 (1): 41-54. 2016

Una alternativa para mitigar el efecto de El Niño es la producción de variedades resistentes, para lo cual es necesario la evaluación del germoplasma de café por tolerancia a sequía. Con este objetivo se sembraron en invernadero 21 introducciones Etiópicas y 11 genotipos comerciales de la Colección Colombiana de Café (CCC), bajo un diseño factorial en parcelas divididas, dos niveles de disponibilidad de agua: control y déficit, con cuatro repeticiones. Se midieron las variables: altura de la planta, número de hojas, área foliar, resistencia estomática, longitud de la raíz, peso seco de la raíz y la parte aérea, biomasa total y eficiencia en el uso de agua. Se encontró que en déficit hídrico la altura de las accesiones E.480, E.566, E.570, E.177, E.017, ET.42 y E.577 fue igual al control ($p > 0,05$). Las accesiones ET.56, E.177, ET.42 y E.480 tuvieron un número de hojas similar a los controles y no disminuyeron su área foliar con relación al control. Las accesiones E.177, E.480 y ET.56 mostraron un peso seco de la parte aérea y una biomasa total igual a las plantas con riego normal. Las accesiones ET.56, E.177, E.570 y E.577 mostraron la mayor eficiencia en el uso de agua, es decir, la disminución del volumen de agua aplicado no afectó su biomasa. Puede concluirse que las introducciones E.480, ET.56 y E.177 son promisorias como progenitores para el desarrollo de una variedad tolerante a déficit hídrico.

Palabras clave: Café, biomasa total, tolerancia, estrés abiótico, mejoramiento fisiológico.

PERFORMANCE OF *Coffea arabica* ACCESSIONS UNDER SOIL HUMIDITY DEFICIT

An alternative to mitigate the effect of El Niño is the production of resistant varieties, which requires assessment of coffee germplasm for drought tolerance. In order to reach that goal, 21 Ethiopian introductions and 11 commercial genotypes of the Colombian Coffee Collection (CCC) were planted in greenhouse under a split-plot factorial design, two levels of water availability: control and deficit, with four repetitions. The following variables were measured: plant height, number of leaves, leaf area, stomatal resistance, root length, dry weight of root and aerial part, total biomass and efficient use of water. Under water deficit conditions the height of accessions E.480, E.566, E.570, E.177, E.017, ET.42 and E.577 was the same as the control ($p > 0.05$). Accessions ET.56, E.177, ET.42 and E.480 had a similar number of leaves to the controls and their leaf area did not decrease compared to that of the control. Accessions E.177, E.480 and ET.56 showed dry weight of the aerial part and total biomass equal to that of plants with normal watering. Accessions ET.56, E.177, E.570 and E.577 showed greater efficiency in water use, *i.e.*, the decrease in the water volume did not affect their biomass. Accessions E.480, E.177 and ET.56 are promising as parents for the development of a variety tolerant to water deficit.

Keywords: Coffee, total biomass, tolerance, abiotic stress, physiological improvement.

* Investigador Científico I e Investigador Asociado, respectivamente, Disciplina de Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia.

** Investigador Científico II (hasta junio de 2014), Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia.

El café es una de las materias primas agrícolas de exportación más importantes; *Coffea arabica* representa cerca del 70% de la producción global y *Coffea canephora* el 30% restante. El impacto de la variación climática en la producción de café presagia efectos económicos y sociales que no pueden ser subestimados, debido al aumento de la temperatura y eventos climáticos impredecibles que están jugando un papel importante en la dinámica del mercado de café (3, 9). Por ejemplo, en Colombia el promedio de la producción de café suave disminuyó drásticamente de 11,3 millones de sacos de 60 kg de grano verde, a 7,1 millones de sacos, entre 2008 y 2012, lo que equivale a una disminución de 35% para el segundo país productor de café arábica en el mundo. Además, Brasil el primer productor de café en el mundo, experimentó en el año 2014 una sequía sin precedentes y un incremento de la temperatura, que afectó la producción de café (9).

En Colombia la variación climática se debe en gran parte a la ocurrencia de fases cálidas y frías en la cuenca del océano Pacífico Tropical y a las oscilaciones climáticas conocidas como Oscilación del Sur (15). Cuando la fase fría se intensifica da origen al fenómeno de La Niña, que se caracteriza principalmente por lluvias intensas y abundantes, el incremento del caudal de los ríos y las inundaciones subsiguientes (5,13). Este evento se intercala con el fenómeno de El Niño, el cual se asocia con el aumento en el promedio de la temperatura del aire y las disminuciones en la humedad del suelo, de la evapotranspiración y de las lluvias, con la consecuente reducción en el promedio del caudal de los ríos en las regiones occidental, central y norte de Colombia (13, 15).

Para contrarrestar el efecto del fenómeno de El Niño en la caficultura colombiana es

necesario identificar accesiones tolerantes, que no disminuyan su producción en períodos de déficit hídrico extremo. En café se ha encontrado que las variedades tolerantes a sequía difieren fisiológicamente de las susceptibles, debido a que utilizan mecanismos que involucran una mayor eficiencia en la extracción de agua del suelo, mediante sistemas de raíces densos y profundos (2, 11, 16), y mayor eficiencia del uso del agua a través de una menor pérdida de agua por cierre estomático (11). Además, algunas características morfológicas de las plantas, que también aportan a una mejor adaptación en suelos con reducción del suministro hídrico, se relacionan con plantas pequeñas con coronas densas, las cuales presentan condiciones para posponer la deshidratación que las plantas con coronas abiertas (2, 3, 18), así como una mayor biomasa en las raíces que en la parte aérea (12, 17), y la reducción del área y el número de las hojas (2).

En *Coffea canephora* con el objetivo de identificar las características fisiológicas y morfológicas asociadas con la tolerancia a la sequía se encontró que el clon tolerante pospone la deshidratación, debido a su capacidad para mantener el potencial de presión del xilema (Ψ_x) (1, 4), a su habilidad para retener el número y el tamaño de las hojas, junto con la conservación de la tasa de asimilación neta de carbono (A) por unidad de área de la hoja, lo cual es consecuencia de una conductancia estomática reducida (g_s) (1); estos rasgos evitan un déficit de agua interno y permiten que los clones presenten un uso eficiente de agua mayor que los clones susceptibles (1, 4, 7, 12).

Además, el incremento de la actividad de las enzimas antioxidativas puede estar asociado con la resistencia, debido a que los clones tolerantes presentan una mayor protección contra el estrés oxidativo (6).

En contraste, el clon sensible muestra una disminución significativa del Ψ_x , junto con una fuerte reducción del área total de la hoja (1) y una menor actividad de las enzimas antioxidativas (6); mientras que la g_s es similar a la del clon irrigado (1). Los clones tolerantes a sequía presentan un sistema de raíces más profundo, con una conductancia hidráulica (K_L) relativamente alta, que les permite extraer más agua de la parte inferior de las materas y al mismo tiempo mantener un estado de agua interno más favorable durante períodos secos más prolongados, que los clones sensibles (11, 12). Así mismo, el clon tolerante mantiene la actividad de la sacarosa fosfato sintasa a pesar de la disminución del potencial de agua de la hoja antes del amanecer (Ψ_{pd}), contrario al clon sensible; en consecuencia, la conservación de la capacidad para la síntesis de sacarosa le permite al clon tolerante un crecimiento adicional de la raíz (14).

Recientemente, se encontró que la vía de señalización de ácido abscísico (ABA) y de óxido nítrico son los principales determinantes moleculares que pueden explicar la eficiencia para controlar el cierre de estomas y la disminución de la transpiración de los clones de *C. canephora* tolerantes a sequía (7). El incremento de los niveles de ABA induce a un rápido cierre de estomas, con el fin de reducir la pérdida de agua por transpiración y la activación de las defensas antioxidantes para combatir el estrés oxidativo (7). Hasta la fecha, en Cenicafé solo una investigación exploró el potencial de 17 introducciones de *C. canephora*, dos de *C. congensis* y seis de *C. arabica* por tolerancia a déficit hídrico, encontrando que las variables que reflejaron el déficit hídrico fueron el grado de marchitez, la tasa de crecimiento y la pérdida de hojas. Además, los genotipos menos afectados por el déficit hídrico fueron Uganda T-3696 de *C. canephora* y Catuaí de *C. arabica* (10).

Teniendo en cuenta que en los próximos años es posible que la variación climática asociada a los fenómenos de El Niño y La Niña sea cada vez más severa en diversas regiones cafeteras del país, es importante la selección de accesiones de *C. arabica* tolerantes a déficit hídrico con rendimientos aceptables, para mantener la producción del café sin afectar los ingresos de los caficultores y de las 563 mil familias que derivan su sustento del cultivo. Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo identificar accesiones Etiópicas de *C. arabica* tolerantes a déficit hídrico, las cuales podrían utilizarse como progenitores para el desarrollo de variedades tolerantes a déficit hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas) a 4°59' latitud Norte, 75°35' longitud Oeste, a 1.310 m de altitud.

Se utilizaron plántulas uniformes, de 21 accesiones Etiópicas y 11 genotipos comerciales de *C. arabica* obtenidos por semilla (Tabla 1), para un total de 352 plantas. Las chapolas se sembraron en bolsas de 14 kg, de 22 cm de ancho por 30 cm de alto, las cuales contenían una mezcla de suelo y pulpa descompuesta en relación 3:1; las plántulas se trasladaron a casa de malla donde permanecieron durante 2 meses en etapa de adaptación, bajo riego normal.

Cuando las plántulas tenían 6 meses se midió la capacidad de campo del sustrato y se definieron los tratamientos de déficit hídrico y el control con riego normal; a las plantas con déficit hídrico se les suspendió el riego hasta un 30% de la capacidad de campo, correspondiente a una humedad del suelo de 24%, determinado

Tabla 1. Identificación de los materiales de *Coffea arabica* evaluados.

Número	Material	CCC	Altitud	Origen*	Accesiones Etiopes	Genotipos comerciales
1	E. 017	143	1760	Sidamo	E.017	
2	E. 020	146	1550	Sidamo	E.020	
3	E. 021	147	1600	Sidamo	E.021	
4	E. 557	536	1780	Gojjam	E.557	
5	E. 561	540	1780	Gojjam	E.561	
6	E. 566	544	1780	Gojjam	E.566	
7	E. 568	546	1780	Gojjam	E.568	
8	E. 570	548	1780	Gojjam	E.570	
9	E. 573	549	1780	Gojjam	E.573	
10	E. 577	553	1780	Gojjam	E.577	
11	E. 575		1780	Gojjam	E.575	
12	E. 177		1710	Kaffa	E.177	
13	E. 037	152	1950	Shoa	E.037	
14	E. 012	142	1800	Harrar	E.012	
15	E. 405		1800	Kaffa	E. 405	
16	ET. 26			Kaffa	ET. 26	
17	ET. 56			Kaffa	ET.56	
18	ET. 42		1610	Kaffa	E.42	
19	AR. 15			Kaffa	Ar.15	
20	E. 141		1900	Kaffa	E.141	
21	E. 480		1710	Kaffa	E.480	
22	A.221					A.221
23	A.137					A.137
24	ACL. 403					A.403
25	Iapar 59					Iapar.59
26	CU. 1812					CU.1812
27	CX. 2848					CX.2848
28	CU. 1850					CU.1850
29	NR. 287					NR.287
30	BH. 1247					BH.1247
31	Típica					Típica
32	Caturra					Caturra

* Provincias con períodos largos de sequía

experimentalmente, y en el cual las plantas mostraron síntomas de déficit hídrico, mientras que en las plántulas control se mantuvo la humedad del suelo en 80%, de acuerdo con su capacidad de campo, que corresponde a una humedad del suelo de 48%. Para mantener la humedad del suelo

en los valores establecidos, ésta se midió diariamente en cada una de las plantas de los 32 materiales evaluados, con un medidor de humedad (ThetaProbe).

Durante los primeros 5 meses, se realizaron dos aplicaciones de DAP (2 g/planta). Cuando

se aplicaron los tratamientos hídricos las plantas no se fertilizaron, porque cuando se someten a déficit hídrico no absorben el fertilizante. Se realizaron prácticas de control de plagas y de arvenses durante todo el desarrollo del experimento.

Variables evaluadas. Para la identificación de las accesiones Etiópicas tolerantes a déficit hídrico las plantas se sometieron a los tratamientos de déficit hídrico y control con riego normal durante 10 meses, se presentan los resultados para las variables altura, área foliar, resistencia estomática, número de hojas, longitud de la raíz primaria y secundaria, peso seco de la raíz, peso seco de la parte aérea, biomasa total y el uso eficiente de agua (UEA).

Diseño experimental. Se utilizó un diseño experimental bifactorial, donde el primer factor es el estrés hídrico con dos niveles: déficit y control con riego normal, y el segundo factor es el genotipo con 32 niveles. El diseño de tratamientos se realizó en parcelas divididas, donde la parcela principal fue el tratamiento hídrico y la subparcela los genotipos. La unidad experimental fue la planta, con cuatro repeticiones por tratamiento; cada tratamiento fue una combinación de genotipo x estrés hídrico.

Análisis de la información. Se realizó un análisis de estadística descriptiva y una prueba de Bartlett de la homogeneidad de varianza. Las variables evaluadas fueron el promedio de la resistencia estomática, la altura de la planta, el área foliar, la longitud de la raíz primaria y raíces secundarias, el peso seco de la raíz, el peso seco de la parte aérea, la biomasa total, el número de hojas y el uso eficiente de agua. Una vez comprobada la homogeneidad de varianza se realizó el análisis de varianza (ANAVA); las fuentes de variación fueron el estrés hídrico (déficit y control con riego adecuado), los genotipos

y las repeticiones. Por último, se realizó la comparación de medias utilizando la prueba de Dunnett. Se hizo análisis de correlación entre variables. La información se analizó mediante el programa SAS 9.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas entre estrés hídrico, genotipos y la interacción estrés por genotipo para las variables peso seco de la parte aérea y la raíz, biomasa total, resistencia estomática, área foliar y el uso eficiente de agua; también hubo diferencias entre genotipos y la interacción estrés por genotipo para las variables número de hojas y altura. Mientras que la interacción estrés por genotipo para las variables longitud de raíz primaria y secundaria no fue significativa (Tabla 2).

En déficit hídrico las accesiones E.017, E.480, ET.42, E.577, E.566, E.570 y E.177 presentaron una altura similar al control con riego adecuado (Figura 1), mientras que la variedad Típica presentó una reducción en altura de 17% (Tabla 3). Cuatro de estas accesiones (E.177, ET.42, E.480 y E.577) junto con la accesión ET.56 tuvieron un área foliar igual a las plantas con riego normal (Figura 2). En contraste, las variedades comerciales Típica, Caturra y la línea de Variedad Castillo® CX.2848 redujeron su área foliar en 27%, 62% y 35%, respectivamente (Tabla 3). Seis accesiones (E.177, ET.56, E.480, ET.42, E.012 y ET.26), presentaron un número de hojas igual a las plantas con riego normal (Figura 2). Los genotipos comerciales de las variedades Típica, Caturra y CX.2848 presentaron una defoliación de 36%, 40% y 3%, respectivamente (Tabla 3).

En la literatura se ha encontrado que el principal modo de adaptación de las plantas de café a déficit hídrico es mantener constante

Tabla 2. Cuadrados medios de las variables altura (Alt), área foliar (AF), resistencia estomática (RE), longitud de raíz primaria (LRP) y secundaria (LRS), peso seco de la parte aérea (PSA), biomasa total (BT), número de hojas (NH) y uso eficiente de agua (UEA), para los 32 genotipos de *C. arabica* sometidos a déficit hídrico y el control con riego normal.

Fuente	GL	Alt (cm)	AF (cm ²)	RE (s/m)	LRP (cm)	LRS (cm)	PSA (g)	PSR (g)	NH	BT (g)	UEA (g.L ⁻¹)
Repetición	3	1.144,41*	5.831,718,8	1.368.207,9**	276,8 ns	246,5 ns	1.772,3ns	275,3 ns	6.587,0*	3.330,7ns	4,11 ns
Estrés	1	85,69 ns	9.546.637,6**	1.259.991,8**	7,0 ns	911,5**	10.628,8**	4.299,2**	1.993,3 ns	28.447,9**	414,5**
Estrés x Repetición	3	765,83*	1554678,6ns	104.248,7 ns	173,9 ns	542,6 ns	862,4ns	408,0*	4.166,1 ns	2.186,6ns	1,54 ns
Adcesión	31	38.515,23**	251.046.676,8**	8.825.680,9**	1.836,4*	3.082,9 ns	88.512,8**	11.644,0**	173.129,5**	16.1504,3**	277,3**
Estrés x Adcesión	31	4.400,04*	59.302.404,5**	998.095,4*	1.071,5 ns	328,5 ns	16.222,7**	3.067,6**	34807,1*	3.1477,3**	162,0**

Tabla 3. Promedios de las variables altura (Alt), área foliar (AF), resistencia estomática (RE), número de hojas (NH), biomasa total (BT) y Uso Eficiente de agua (UEA).

Accesión	Alt (cm)		AF (cm ²)		RE (s/m)		NH		BT (g)		UEA (g.L ⁻¹)	
	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit
A.137	48,8	52,2	2.035,2	1.824,3	594,2	667,5	81,0	71,2	42,38	31,13	0,78	3,65
A.221	55,1	68,2	3.632,3	6.199,1	649,4	748,1	103,2	163,0	82,98	100,88	1,40	7,67
A.403	60,0	46,7	4.802,1	1.883,6	606,6	802,9	110,7	69,0	116,57	32,27	1,90	3,04
AR.15	76,8	66,6	3.924,3	2.886,5	622,6	868,3	105,0	90,0	117,84	51,18	1,96	5,13
BH.1247	44,6	38,8	2.160,1	1.713,2	622,1	608,9	73,7	60,5	46,68	32,00	1,30	3,29
CU.1812	41,1	48,0	1.449,1	2.550,3	753,0	819,6	56,7	92,0	32,57	49,74	0,61	5,20
CU.1850	60,4	61,9	3.307,4	3.520,6	510,7	635,4	105,5	100,0	88,14	59,72	1,45	6,64
CX.2848	40,3	41,7	2.023,2	1.313,0	688,6	1.153,2	66,3	64,2	46,81	27,34	0,89	2,84
Caturra	40,8	31,3	2.382,8	895,6	876,9	1.049,0	72,6	43,2	45,23	13,02	1,40	1,81
E.012	77,2	76,1	3.576,9	3.199,7	385,5	422,7	96,2	101,7	113,81	70,82	1,80	6,15
E.017	49,8	61,5	1.702,5	1.587,4	679,1	819,7	72,0	69,5	50,04	35,46	0,90	3,53
E.020	69,7	61,8	3.025,1	1.409,1	579,0	839,5	107,2	74,7	74,17	30,71	2,01	3,02
E.021	51,4	55,5	1.369,2	1.191,1	785,3	744,5	62,7	62,0	31,63	23,59	0,63	2,23
E.037	73,9	66,1	4.125,5	2.752,6	874,8	858,2	121,5	98,2	100,34	37,16	1,75	3,93
E.141	81,6	60,0	4.077,5	1.889,9	628,2	939,3	139,0	82,2	83,74	34,21	2,32	3,62
E.177	72,3	79,0	2.657,4	3.180,0	414,5	476,2	84,0	105,2	75,56	77,28	1,26	6,56

Continúa...

...continuacion

Accesión	Alt (cm)		AF (cm ³)		RE (s/m)		NH		BT (g)		UEA (g·L ⁻¹)	
	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit	Control	Déficit
E.405	58,3	56,3	2.010,8	1.634,7	627,6	945,8	69,7	63,0	43,44	30,68	0,83	3,25
E.480	52,0	63,5	1.342,4	1.756,6	1.136,9	1.210,8	43,2	65,0	30,94	33,98	0,97	3,10
E.557	41,2	41,4	1.030,4	615,6	803,6	874,3	38,5	23,5	22,22	12,62	0,47	1,63
E.561	48,2	43,3	1.319,6	1.228,6	874,0	913,8	54,7	45,7	29,33	18,32	0,60	2,10
E.566	58,7	65,4	2.663,5	1.977,9	755,2	981,3	99,0	75,2	65,95	42,05	1,24	3,71
E.568	50,9	38,9	1.592,7	941,3	371,6	805,2	69,7	33,5	37,80	15,98	1,15	2,28
E.570	48,4	53,4	1.139,8	1005,6	630,2	674,1	40,7	40,2	27,84	22,74	0,55	2,34
E.573	50,9	45,5	1.917,9	882,1	572,2	896,6	62,0	29,2	47,69	15,77	1,49	2,01
E.575	49,4	43,6	1.436,8	825,8	885,6	922,8	55,2	42,5	34,81	17,03	0,72	1,98
E.577	42,6	48,6	1.093,3	1.199,1	888,6	986,1	54,2	50,5	24,09	20,37	0,49	2,44
ET.26	85,8	77,7	4.100,2	3.602,5	334,4	420,2	129,0	144,2	136,97	91,72	2,20	7,98
ET.42	60,4	71,3	1.576,1	2.471,6	486,1	599,7	70,0	94,5	63,93	55,65	1,12	4,93
ET.56	72,9	71,9	3.649,6	3.719,8	444,1	519,5	105,0	122,5	85,74	85,97	1,45	6,52
Iapar.59	35,2	31,3	1.759,4	1.643,4	900,4	1.089,1	61,0	59,7	35,80	23,74	0,70	2,26
NR.287	46,2	41,7	2.733,2	2.240,5	825,1	984,7	72,0	72,0	57,27	10,84	1,13	3,21
Tipica	57,3	47,3	2.003,9	1.446,1	1.012,7	1.031,7	69,2	63,7	40,17	5,87	0,81	2,07

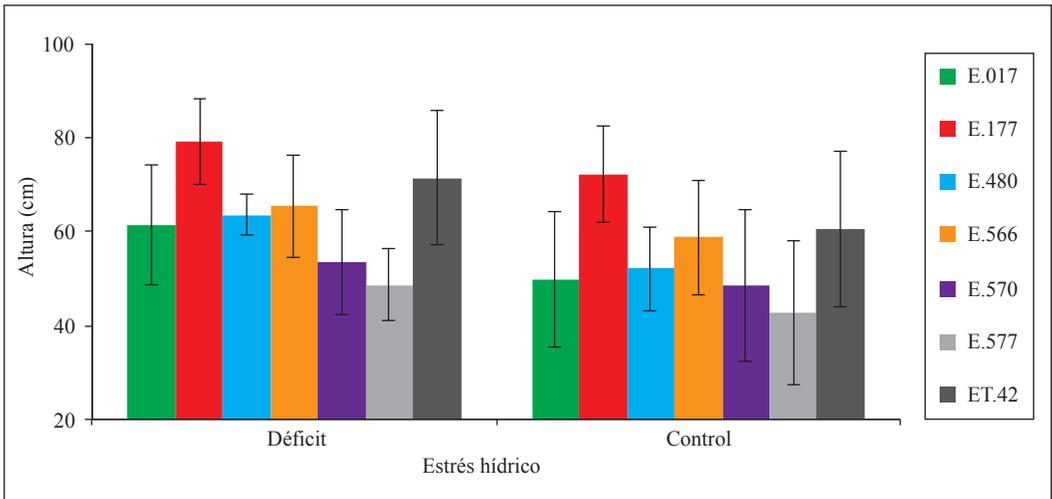


Figura 1. Accesiones etíopes que en déficit hídrico no disminuyeron su altura con relación al control con riego normal. Las barras indican la desviación estándar.

la tasa de asimilación neta de carbono (A) reduciendo el incremento del área total de la hoja por planta (8), es así como plantas de *C. arabica* sometidas en invernadero a irrigación diferencial, durante 120 días, mostraron que el área total de la hoja de los árboles irrigados dos veces por semana fue la mitad en relación con las plantas irrigadas dos veces por día, aunque la A con respecto al área de la hoja permaneció constante (8). Del mismo modo, las plantas de *C. arabica* irrigadas dos veces por semana produjeron menos hojas, las cuales fueron más pequeñas y mostraron mayores tasas de senescencia que las plantas irrigadas dos veces por día (8). De forma similar, en *C. canephora* cuando el clon 46, susceptible a sequía, se sometió a déficit hídrico redujo significativamente su área foliar, en contraste con el clon 120, tolerante a sequía, que no disminuyó su área foliar con relación al control con riego normal (1). Es decir, que para el clon 46, susceptible a sequía, la disminución del área de la hoja y de la fotosíntesis contribuyó a la reducción de su rendimiento. Mientras que para el clon 120, tolerante a sequía, la

retención de las hojas y el mantenimiento de la tasa de asimilación neta de carbono incrementó su rendimiento, a pesar de las fluctuaciones en la disponibilidad de agua del suelo (1). En consecuencia, el clon 120 está mejor adaptado para posponer la deshidratación y mantener la fotosíntesis, lo que contribuye a sostener su productividad en áreas propensas a déficit hídrico (1).

De igual manera, Siriema (Híbrido de *C. arabica* x *C. racemosa* Lour.) clasificado por observaciones empíricas como tolerante a sequía, mostró un área de la hoja mayor que Catucaí (Híbrido de *C. arabica* L. “Catucaí” y el híbrido Icatu (*C. arabica* x *C. canephora* Pierre)) sensible a sequía (4). Este comportamiento fue similar al observado para cinco de las accesiones de *C. arabica* evaluadas (E.177, ET.42, E.480, E.577 y ET.56), debido a que a pesar de un déficit hídrico prolongado estas introducciones no redujeron su área foliar, en contraste con el resto de las accesiones evaluadas que disminuyeron su área foliar (Tabla 3).

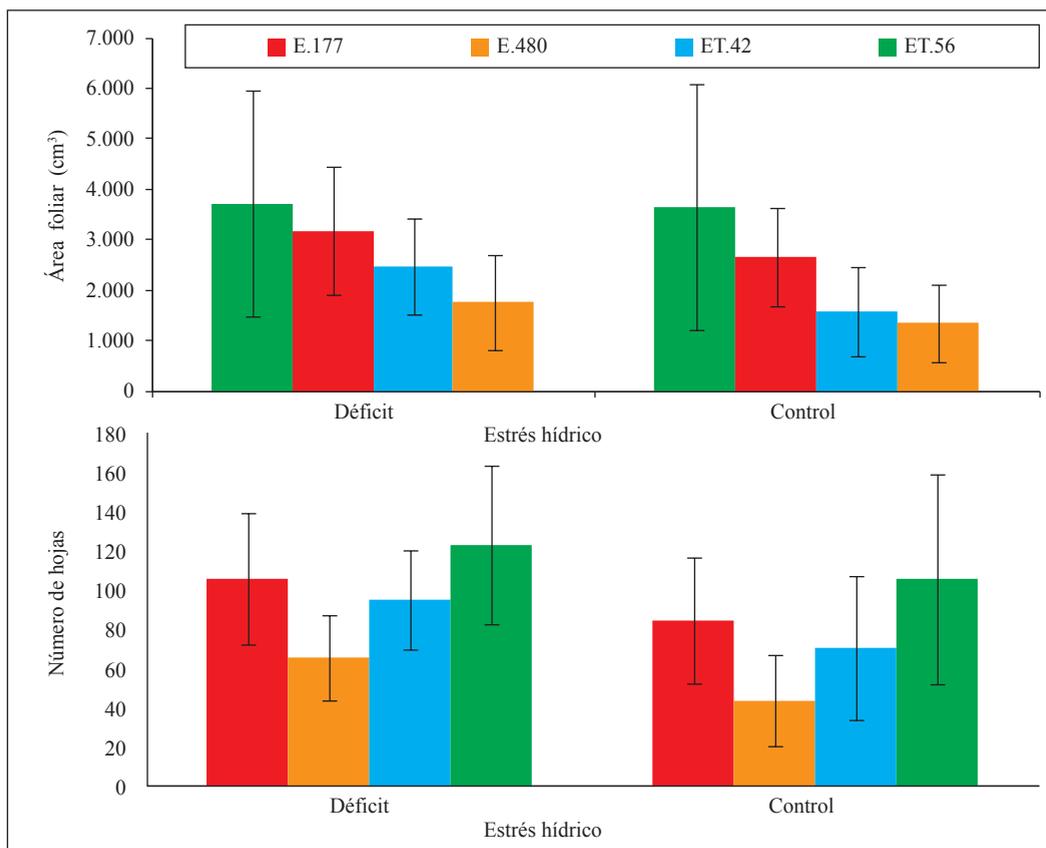


Figura 2. Accesiones etíopes con área foliar y número de hojas similar a las plantas control con riego normal. Las barras representan la desviación estándar.

Las accesiones E.568, E.405, E.020 y E.566 bajo déficit hídrico presentaron el mayor aumento de la resistencia estomática con relación a los controles con riego normal (Tabla 3). Esto sugiere que estas accesiones cerraron sus estomas más temprano que el resto de las introducciones probadas, lo cual les permitió posponer la deshidratación y mantener la fotosíntesis. Este mismo comportamiento lo presentaron en *Coffea canephora* el clon 120 (1) y en *C. arabica* el genotipo Siriema (4), ambos tolerantes a sequía. Este mecanismo de disminución de la conductancia estomática e hidráulica en sequía previene la excesiva

pérdida de agua y limita el daño de la hoja, causado por los bajos potenciales de agua. Sin embargo, esta reducción también restringe la asimilación de dióxido de carbono, y por lo tanto, la acumulación de biomasa y la productividad. Por esto, la adecuada coordinación de las propiedades hidráulicas y la capacidad fotosintética podría ser crucial para conseguir mayores ganancias de carbono bajo condiciones de déficit hídrico (2, 4).

En las cuatro accesiones que presentaron la mayor resistencia estomática en respuesta al déficit hídrico (E.568, E.405, E.020 y

E.566), se registró que el cierre estomático afectó su crecimiento, debido a que las accesiones E.568, E.405 y E.020 tuvieron una altura menor que el control con riego adecuado, y además, las cuatro accesiones redujeron su área foliar, el número de hojas y biomasa total, con respecto del control con riego normal (Tabla 3).

Bajo déficit hídrico, las accesiones E.177, E.480, E.570, ET.56, E.017, E.021, E.141 y E.566, mostraron una longitud de la raíz primaria y secundaria igual al control con riego normal. Además, las accesiones E.177, E.480, E.570, ET.42 y ET.56 presentaron la menor disminución del peso seco de la raíz con relación al control con riego normal; lo cual sugiere que estos genotipos podrían extraer más agua del suelo, esto podría explicar por qué las accesiones E.480, E.177, ET.56 presentaron una altura, área foliar, número de hojas y biomasa total similar a los controles con riego normal (Tabla 3). Por el contrario, los controles Típica y Caturra redujeron la longitud de la raíz primaria en 12% y 17%, respectivamente. Del mismo modo, en la evaluación realizada por Orozco y Jaramillo (10) las accesiones de *C. canephora*, *C. congensis* y *C. arabica* presentaron una reducción de 70% del peso fresco de la raíz con relación al testigo.

Se ha reportado que las plantas adaptadas a sequía se caracterizan por sistemas de raíces profundos y vigorosos, es así como en robusta un sistema de raíz profundo y una mayor biomasa en los clones tolerantes se asocia con un mejor escape a las limitaciones de agua del suelo (11, 16). Sin embargo, en robusta no se encontraron correlaciones significativas entre mayor biomasa de la raíz y producción, sugiriendo que estas características son independientes. Una limitación del trabajo realizado por Ramos y Carvalho (16) fue la evaluación

del sistema de raíz usando plántulas y la determinación de la producción en plantas adultas en el campo. En cualquier caso, las dificultades evaluando el sistema de raíz, la gran influencia ambiental y la compleja herencia de estas características impiden el uso de estos rasgos en los programas de selección a pesar de la relación positiva entre la profundidad de la raíz, su desarrollo y el rendimiento bajo condiciones de sequía (2). Además, en otros trabajos se ha observado que en *C. arabica* la conductancia hidráulica (K_L) se correlacionó positivamente con la transpiración diaria total. Así los genotipos de *C. arabica* con una K_L alta pueden disminuir el agua del suelo accesible más rápidamente y tener un sistema de raíz más profundo que los genotipos con baja conductancia hidráulica (19). Esto es ventajoso en un suelo sin limitaciones hídricas, pero desventajoso en suelos con déficit hídrico prolongado debido a que una K_L alta podría acelerar la severidad del déficit hídrico en la planta (2). Por esto el conocimiento de las condiciones ambientales para las cuales las variedades serán mejoradas es crucial para el éxito de los programas de mejoramiento.

En déficit hídrico las accesiones E.177, E.480 y ET.56 mostraron un peso seco de la parte aérea y una biomasa total similar a las plantas con riego normal (Figura 3). En contraste, los controles Típica, Caturra y CX.2848 disminuyeron el peso seco de la parte aérea en 52%, 70% y 37%, respectivamente (Tabla 3). Del mismo modo, Orozco y Jaramillo (10), registraron en Caturra una reducción significativa del peso seco de la parte aérea cuando se suprimió el riego durante un mes, pero Típica no disminuyó significativamente el peso seco de su parte aérea bajo el mismo tratamiento. Además, las introducciones de *C. canephora*, *C. arabica*

y *C. congensis* sin riego durante mes y medio mostraron una reducción de 35% del peso seco de su parte aérea con respecto del testigo, y la reanudación del riego durante 15 días no favoreció la recuperación de su peso seco (10).

Las accesiones ET.56, E.177 y E.577 fueron más eficientes en el uso de agua, es decir, necesitaron un menor volumen de agua

para conseguir una biomasa mayor (Figura 4). Además, dos de estas accesiones, la ET.56 y E.177, presentaron una 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, lo cual podría sugerir que estas dos accesiones son promisorias como progenitores para el desarrollo de una variedad tolerante al déficit hídrico.

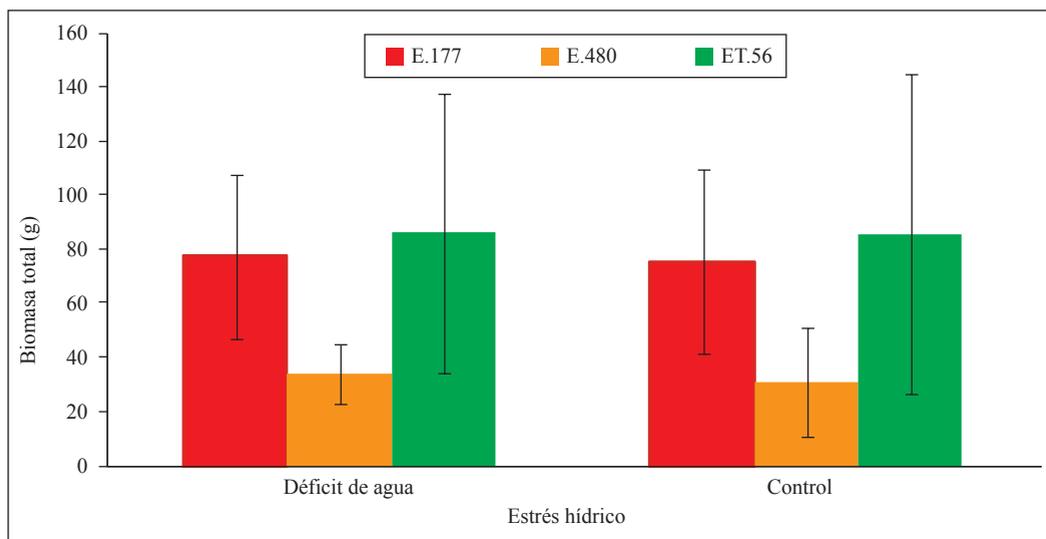


Figura 3. Accesiones etíopes con biomasa total igual al control con riego normal. Las barras representan la desviación estándar.

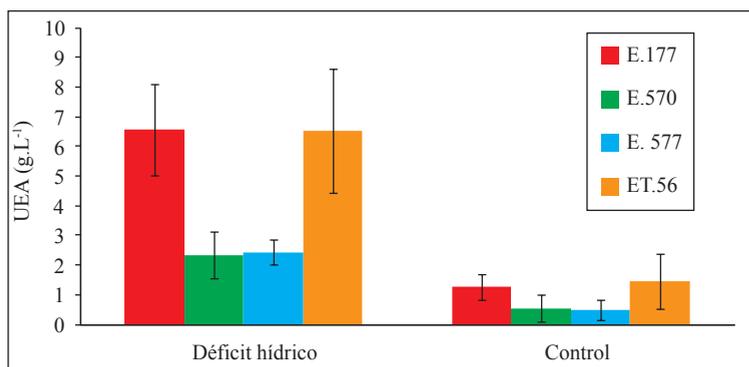


Figura 4. Accesiones etíopes que presentaron el mayor uso eficiente de agua. Las barras representan la desviación estándar.

Tabla 4. Correlación de las variables analizadas con los 32 genotipos de *C. arabica* sometidos a los estrés abióticos de déficit hídrico y el control con riego normal.

	Alt.	PSA	NH	AF	PSR	BT	UEA	LRS	LRP	RE
Alt.		0,81	0,75	0,70	0,66	0,77	0,49	0,40	0,39	-0,37
PSA			0,86	0,91	0,90	0,99	0,38	0,35	0,37	-0,45
NH				0,90	0,75	0,83	0,56	0,42	0,34	-0,37
AF					0,82	0,90	0,50	0,41	0,31	-0,35
PSR						0,94	0,24	0,32	0,36	-0,48
BT							0,33	0,35	0,37	-0,47
UEA								0,41	0,17	-0,05
LRS									0,16	-0,015
LRP										-0,05
RE										

Altura (Alt), área foliar (AF), resistencia estomática (RE), longitud de raíz primaria (LRP) y secundaria (LRS), peso seco de la parte aérea (PSA), biomasa total (BT), número de hojas (NH) y uso eficiente de agua (UEA).

Se realizaron las correlaciones de las variables evaluadas con las 21 accesiones Etiópicas y los 11 genotipos comerciales: altura (Alt), peso seco parte aérea (PSA), número hojas (NH), área foliar (AF), peso seco raíz (PSR), biomasa total (BT), uso eficiente de agua (UEA), longitud raíz primaria (LRP), longitud raíz secundaria (LRS) y resistencia estomática (RE) (Tabla 4). Las variables peso seco de la parte aérea, área foliar, peso seco de la raíz y la biomasa total tuvieron una correlación altamente significativa. La variable número de hojas presentó una correlación altamente significativa con el peso seco de la parte aérea, el área foliar y la biomasa total. La altura mostró una correlación altamente significativa con el peso seco de la parte aérea. Mientras que el uso eficiente de agua, la resistencia estomática, la longitud de raíz primaria y secundaria, no mostraron correlación significativa con las demás variables evaluadas (Tabla 4).

Puede concluirse que las introducciones E.480, ET.56 y E.177 presentaron una altura, área foliar, número de hojas, biomasa total, peso seco de la parte aérea, longitud de raíz secundaria y uso eficiente de agua,

mayores o iguales al control con riego normal, lo cual podría sugerir que estas tres accesiones son promisorias como progenitores para el desarrollo de una variedad tolerante a déficit hídrico. Estos resultados serán confirmados en el invernadero y en el campo con la finalidad de identificar accesiones tolerantes a déficit hídrico en la Colección Colombiana de Café, para el desarrollo de variedades tolerantes a déficit hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar sus más sinceros agradecimientos a la agrónoma Elsa Viviana Marín Montoya por su colaboración en el montaje y aplicación de los tratamientos de estrés hídrico, a los auxiliares Mónica Jiménez Murcia, Hernán Díaz, Omar Villarreal y Conrado Quintero, por su colaboración en la aplicación de los tratamientos de estrés hídrico y a los señores Carlos Augusto Vera y Enrique Chanchí por la recolección de las semillas y el establecimiento de los almácigos en la Estación Experimental Naranjal.

LITERATURA CITADA

1. DAMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; PINHEIRO, M.A.; DUCATTI, C.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance of two field grown clones of *Coffea canephora*. *Plant science* 164(1):111-117. 2003.
2. DAMATTA, F.M. Exploring drought tolerance in coffee: A physiological approach with some insights for plant breeding. *Brazilian journal of plant physiology* 16(1):1-6. 2004.
3. DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. *Brazilian journal of plant physiology* 18(1):55-81. 2006.
4. DIAS, P.C.; ARAUJO, W.L.; MORAES, G.A.; BARROS, R.S.; DAMATTA, F.M. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. *Journal of plant physiology* 164(12):1639-1647. 2007.
5. GUZMÁN, O.; BALDION, J.V. Influencia del evento frío del Pacífico en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 50(3):222-237. 1999.
6. LIMA, A.L.; DAMATTA, F.M.; PINHEIRO, H.A.; TOTOLA, M.R.; LOUREIRO, M.E. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. *Environmental and experimental botany* 47(3):239-247. 2002.
7. MARRACCINI, P.; VINECKY, F.; ALVES, G.; RAMOS, H.; ELBELT, S.; VIEIRA, N.; CARNEIRO, A.; SUJII, P.; ALEKCEVETCH, J.; SILVA, V.; DAMATTA, F.M.; FERRAO, M.; LEROY, T.; POT, D.; VIEIRA, L.; SILVA, F.; ANDRADE, A. Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of *Coffea canephora*. *Journal of experimental botany* 63(11):4191-4212. 2012.
8. MEINZER, F.C.; SALIENDRA, P.Z.; CRISOSTO, C.H. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea arabica* during adjustment in different soil moisture regimes. *Australian journal of plant physiology* 1982):171-184. 1992.
9. MINIUSSI, M.; TERRA, L. DEL; SAVI, T.; PALLAVICINI, A. Aquaporins in *Coffea arabica* L.: Identification, expression, and impacts on plant water relations and hydraulics. *Plant physiology and biochemistry* 95: 92-102. 2015.
10. OROZCO, F.J.; JARAMILLO, A. Comportamiento de introducciones de *Coffea* sometidas a condiciones de déficit de humedad del suelo. *Cenicafé* 29(3):61-93. 1978.
11. PINHEIRO, H.A.; DAMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; FONTES, E.P.B.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long term drought. *Plant science* 167(6):1307-1314. 2004.
12. PINHEIRO, H.A.; DAMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. *Annals of botany* 96(1):101-108. 2005.
13. POVEDA J., G.; JARAMILLO R., A.; GIL, M.M.; QUICENO, N.; MANTILLA, R. Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture and vegetation index (NDVI) in Colombia. *Water resources research* 37(8):2169-2178. 2001.
14. PRAXEDES, S.; DAMATTA, F.M.; LOUREIRO, M.; FERRAO, M.; CORDEIRO, A. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. *kouillou*) leaves. *Environmental and experimental botany* 56(3):263-273. 2006.
15. RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A. Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):161-172. 2009.
16. RAMOS, R.L.S.; CARVALHO, A. Shoot and root evaluations on seedlings from *Coffea* genotypes. *Bragantia* 56(1):59-68. 1997.
17. SILVA, P.; CAVATTE, P.; MORAIS, L.; MEDINA, E.; DAMATTA, F.M. The functional divergence of biomass partitioning, carbon gain and water use in *Coffea canephora* in response to the water supply: Implications for breeding aimed at improving drought tolerance. *Environmental and experimental botany* 87:49-57. 2013.
18. TAUSEND, P.C.; MEINZER, F.C.; GOLDSTEIN, G. Control of transpiration in three coffee cultivars: The role of hydraulic and crown architecture. *Trees structure and function* 14(4):181-190. 2000.
19. TAUSEND, P.C.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F.C. Water utilization, plant hydraulic properties and xylem vulnerability in three contrasting coffee (*Coffea arabica*) cultivars. *Tree physiology* 20(3):159-168. 2000.