

EFFECTO DE LA SEQUÍA SOBRE ALGUNAS VARIABLES HÍDRICAS Y MORFOMÉTRICAS EN CINCO GENOTIPOS DE AMARANTHUS

EFFECT OF THE DROUGHT ON SOME WATER AND MORPHOMETRIC VARIABLES IN FIVE AMARANTH GENOTYPES

*Gumerciendo H. De la Cruz-Guzmán¹; Alberto Arriaga-Frías¹;
Manuel Mandujano-Piña; Sergio González Moreno*

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la sequía sobre variables hídricas y morfométricas en *Amaranthus caudatus*, *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* razas Azteca, Mercado y Nepal durante la floración de estos genotipos cultivados en invernadero. Se determinó el contenido hídrico relativo (CHR), concentración de prolina en raíz y hoja, área foliar, número de hojas y partición de biomasa. Se observó que la sequía indujo incrementos significativos en la concentración de prolina en raíz en todos los genotipos, mientras que en hoja sólo en Azteca y Nepal. La sequía también indujo una disminución significativa de CHR en *A. Cruentus* y *A. hypochondriacus* raza Azteca, así como en el área foliar de todos los genotipos con excepción de *A. Caudatus*, y en el número de hojas en Azteca y Nepal. Considerando la partición de biomasa, *A. caudatus* fue la especie menos sensible a la sequía. El análisis integrado de las variables estudiadas indicó que *A. caudatus* y *A. hypochondriacus*, raza Nepal, fueron las especies con menor y mayor susceptibilidad a la sequía respectivamente.

Palabras clave: Prolina; contenido hídrico relativo; partición de biomasa, área foliar.

ABSTRACT

The effect of the drought was evaluated on water and morphometric variables in Amaranthus caudatus, A. cruentus and A. hypochondriacus, races Azteca, Mercado and Nepal during the flowering state grown in greenhouse. It was determined relative water content (RWC), concentration of proline in leaf and root, leaf area, number of leaves and partition of biomass. It was observed that A. cruentus and A. hypochondriacus race Azteca cultivated in drought, showed a significant diminution at the 14:00 hours in RWC. All the genotypes worked in drought showed significant increases in the concentration of proline in root; in leaves, only races Azteca and Nepal denoted a significant increase. The foliar area except A. caudatus, showed a significant diminution in all the genotypes worked in drought. In the number of leaves, only races Azteca and Nepal showed a significant reduction. Considering the partition of biomass A. caudatus was the less sensible specie to the drought. The integrated analysis of the studied variables indicated that A. caudatus and A. hypochondriacus, race Nepal were the species with minor and major susceptibility to the drought respectively.

Key words: Proline, relative water content, biomass partition, leaf area.

INTRODUCCIÓN

La sequía es el estrés ambiental que más limita el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas. En México, más del 80% de la superficie sembrada depende exclusivamente de la precipitación pluvial

(Boyer, 1982; Muñoz, 1980). El estrés hídrico tiene efecto sobre la biomasa y rendimiento total de la planta, además de reducir tanto el crecimiento del tallo como el de las raíces (Turner, 1997).

Las plantas cultivadas en estrés hídrico acumulan osmolitos compatibles como prolina, glicina betaina

¹ UNAM, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Avenida de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México. C.P. 54090. Tel. 01 (55) 56231257, Fax. 01 (55) 56231155.

E-mail: moashi@servidor.unam.mx (Gumerciendo H. de la Cruz Guzmán); E-mail: ixbe@servidor.unam.mx (Alberto Arriaga Frías); E-mail: manuelm@servidor.unam.mx (Manuel Mandujano Piña); E-mail: sergon_9@yahoo.com (Sergio González Moreno).

y azúcares. La prolina actúa como un osmoprotector de enzimas citosólicas y mantiene la integridad de la membrana durante el estrés sin interferir con las reacciones bioquímicas o la estructura celular (Girousse *et al.*, 1996; Yoshu Yoshiba, 1997). Szente *et al.* (1993) señala que la concentración de prolina en *A. hypochondriacus* se incrementa cuando el contenido hídrico relativo (CHR) disminuye a un 65%. Ferrarotto (2003) encontró a los 20 días de aplicado un tratamiento de sequía una mayor acumulación de prolina en *Amaranthus cruentus* (0,66 g pf^{-1}) que en *Amaranthus dubius* (0,38 g pf^{-1}); dicho autor menciona que las plantas que acumulan más prolina en periodos cortos de tiempo tienen una mayor capacidad de recuperación ante condiciones de estrés que aquellas que lo hacen en periodos más prolongados.

Durante una condición de estrés hídrico también se limita el intercambio de gases con implicaciones sobre parámetros morfológicos como el área foliar, el crecimiento, la distribución de biomasa y la relación vástago/raíz. La reducción del área foliar puede causar pérdida de biomasa y rendimiento a través de la disminución de la fotosíntesis; el aumento en la relación raíz/vástago puede ser consecuencia de una mayor reducción del vástago respecto a la raíz, o a un aumento del sistema radical asociado a una reducción del vástago; esto último se puede relacionar con una incorporación activa de agua a la planta, mientras que el primero podría relacionarse con un efecto diferencial de la tasa de crecimiento (Bohnert y Sheveleva, 1998; Hong-B.S. *et al.*, 2008).

El amaranto puede cultivarse con éxito en zonas donde la precipitación pluvial es baja; su capacidad para adaptarse a condiciones desfavorables de crecimiento le da cierta potencialidad para cultivarse en zonas áridas de nuestro país (Espitia, 1991; Piha, 1995). Como resultado de la deficiencia de humedad, las plantas desarrollan una amplia variedad de mecanismos de tolerancia a la sequía que se manifiestan tanto a nivel fisiológico como morfológico (Blum, 1997). La diversidad de razas de amarantos existentes en nuestro país asociada a la gran variación de condiciones ambientales hace pensar en la existencia de una amplia gama de respuestas morfológicas y fisiológicas. Dado que la floración es la fase más sensible a la sequía en las plantas anuales cultivadas con una alta correlación con productividad (Muñoz, 1980) el objetivo del presente trabajo fue: Evaluar el efecto de la sequía, sobre las variables hídricas y morfométricas, durante la fase

de floración en *Amaranthus*, *A. hypochondriacus* raza Azteca, *A. hypochondriacus* raza Mercado, *A. hypochondriacus* raza Nepal, *A. caudatus* y *A. cruentus* cultivados en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron bolsas negras de polietileno donde se depositaron 3.500 gramos de suelo seco con textura arenosa. El peso de las macetas ajustadas a un 100% de humedad aprovechable (HA) fue de 4.200 gramos y en sequía (20% de HA) de 3.895 gramos; los cálculos de ajuste de humedad se realizaron de acuerdo a Aguilera (1996).

Las semillas de cada genotipo se sembraron en 10 macetas previamente ajustadas a 100% de HA, se mantuvieron así durante 30 días, tiempo en que se realizó el aclareo dejando sólo tres plantas por cada maceta, mismas que fueron fertilizadas con N P K (17-17-17). A partir de este momento, los tratamientos en riego se mantuvieron con un peso constante de 4.200 gramos; las macetas destinadas a tratamientos de sequía se obtuvieron una vez que se dejaron de regar y estas alcanzaron un 20% de humedad aprovechable. Ambos niveles de humedad se mantuvieron así hasta la floración que fue cuando se evaluaron variables hídricas y morfométricas.

Cada unidad experimental estuvo conformada por una maceta y tres plantas que se distribuyeron en base a un diseño completamente al azar con un arreglo factorial de 2×5 tomando como factores dos niveles de humedad del suelo (riego-sequía) y cinco genotipos (*A. hypochondriacus* razas Azteca, Mercado y Nepal, *A. caudatus* y *A. cruentus*) con cinco repeticiones por tratamiento dispuestos dentro de un invernadero de 3×4 m.

VARIABLES EVALUADAS

VARIABLES HÍDRICAS

- a) Contenido hídrico relativo (CHR). Se evaluó en ciclo diurno en las hojas de la parte media del tallo de cada planta, para lo cual se obtuvo el peso fresco (Pf) de 10 discos foliares de 5 mm de diámetro que se colocaron en agua destilada durante cuatro horas, al cabo de las cuales se pesaron nuevamente constituyendo el denominado peso turgente (Pt). Realizado

lo anterior, se secaron en un horno durante 24 horas a 70 °C obteniendo el peso seco (Ps). El CHR se calculó con la fórmula siguiente:

$$CHR = \frac{Pf - Ps}{Pt - Ps} \times 100$$

- b) Concentración de prolina. Se determinó en raíz y hoja de acuerdo a la metodología descrita por Bates *et al.* (1973).

VARIABLES MORFOMÉTRICAS

- a) Se cuantificó el número de hojas y se evaluó el área foliar mediante el uso de un integrador de área foliar (LI-COR, LI-3000A).
- b) Mediante secado al horno a 96 °C durante 24 horas de hojas, tallos y raíces se obtuvo la partición de biomasa.

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico SAS[®], con el cual se aplicó un análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de Tukey, en ambos casos con un $\alpha \leq 0,05$.

RESULTADOS

Para el análisis del efecto de la sequía sobre los genotipos estudiados, se realizaron tres comparativos: riego vs sequía (R-S), sequía vs sequía (S-S) y riego vs riego (R-R). La nomenclatura utilizada en el cuerpo del texto para la descripción de las especies evaluadas fue la siguiente: *A. hypochondriacus* raza Azteca: Azt; *A. hypochondriacus* raza Mercado: Mer; *A. hypochondriacus* raza Nepal: Nep; *A. cruentus*: cru; *A. caudatus*: cau.

En general, en los genotipos evaluados se observó un incremento en la concentración de prolina y una disminución del contenido hídrico relativo (CHR), área foliar, número de hojas y partición de biomasa por efecto de la sequía. La sensibilidad o tolerancia de cada genotipo dependió de la variable de respuesta en cuestión. A continuación describimos los resultados por grupos de variables evaluadas.

CONTENIDO HÍDRICO RELATIVO

En la Tabla 1 se observa que a las 9:00 horas sólo Nep registró diferencias significativas en R-S. En S-S, Nep registró el menor valor de CHR, siendo significativamente diferente del resto de los genotipos. En R-R, cru registró el mayor CHR

pero sin diferencias entre especies. A las 12:00, exclusivamente cru fue diferente en R-S. En S-S, Nep registró el menor CHR aunque sin diferencias entre especies; en R-R, cru obtuvo los mayores valores, también sin diferencias estadísticas. A las horas de mayor demanda hídrica (14 y 16 hrs) a las 14:00 horas, en R-S, Azt y cru registraron diferencias; el resto de los genotipos estudiados resultaron estadísticamente iguales. En S-S, cru y Nep registraron los valores de CHR más bajos siendo diferentes de acuerdo a la prueba de Tukey, de cau. En R-R, Azt registró el mayor CHR siendo diferente de cau y Nep. A las 16:00 horas, con R-S, Azt, cau, Nep y cru fueron diferentes. En S-S, Azt exhibió el menor valor, siendo diferente de cau, Mer y Nep. En R-R, Nep mostró el mayor valor y fue igual que cau pero diferente a Azt, cru y Mer. A las 18:00 horas, en el comparativo R-S, excepto azt, en todos los genotipos hubo diferencias. En S-S, cau y cru, registraron los menores valores de CHR, siendo diferentes con Mer. En R-R no hubo diferencias entre las especies de amaranto evaluadas.

Cuando los genotipos presentan diferencias en el control de su grado de hidratación, se interpreta como la ausencia de mecanismos de evasión de la sequía. Masinde *et al.* (2006) al trabajar con *Solanum villosum* y *S. sarrachoides* en macetas limitadas de humedad encontraron que el CHR evaluado durante dos años disminuyó de 75 a 60% y de 78 a 56% respectivamente. Siddique (2000) observó que en los cultivares de trigo Kanchan, Sonalika y Kalyansona sometidos a sequía el contenido hídrico relativo disminuyó de 88 a 45%. Ferrarotto (2003), al estudiar el CHR en *Amaranthus dubius* y *Amaranthus cruentus* cultivados bajo condiciones de estrés hídrico determinó que el CRH en *A. dubius* disminuyó hasta 43% cuando el potencial hídrico fue de -5,53 MPa y el contenido de humedad del suelo de 3,4%. En *A. cruentus*, a un CHR de 65% correspondió un potencial hídrico -2,17 MPa y una humedad del suelo de 4,8%. Como los valores de CHR indicaron una menor deshidratación en *A. cruentus*, ello sugirió que esta especie es menos sensible al estrés hídrico. Para el caso que nos ocupa, el rango de valores de CHR obtenidos a las 14 y 16 horas en los genotipos estresados varió entre 54,89 a 84,66% donde solo Mer no registró diferencias significativas entre R-S en dichas horas de evaluación, sugiriendo a este genotipo como menos susceptible a la sequía respecto a esta variable (Tabla 1).

Tabla 1

Efecto del estrés hídrico sobre el CHR en cinco genotipos de amaranto evaluados en ciclo diurno durante la fase de floración. Cada dato es el promedio de cinco repeticiones.

| Genotipos | Humedad | Contenido hídrico relativo (%) | | | | |
|-----------|---------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| | | 9:00 h | 12:00 h | 14:00 h | 16:00 h | 18:00 h |
| Azt | R | 85.04 ab ^Z | 72.84 ab | 78.33 a | 75.43 b | 86.83 ab |
| | S | 78.70 b | 69.78 ab | 56.45 cd | 59.07 f | 76.67 bc |
| cau | R | 87.17 ab | 73.01 ab | 67.09 b | 84.00 a | 81.82 ab |
| | S | 83.95 ab | 69.87 ab | 66.42 bc | 67.91 cde | 61.55 d |
| cru | R | 91.37 a | 82.67 a | 71.08 ab | 73.45 cb | 89.50 a |
| | S | 88.98 ab | 64.36 b | 54.98 d | 61.75 ef | 61.75 d |
| Mer | R | 88.00 ab | 72.44 ab | 69.86 ab | 72.51 bcd | 88.52 a |
| | S | 85.31 ab | 69.16 ab | 64.29 bcd | 66.51 de | 77.48 bc |
| Nep | R | 84.55 ab | 68.80 ab | 64.62 bcd | 84.66 a | 85.86 ab |
| | S | 66.08 c | 62.00 b | 54.89 d | 69.63 bcd | 69.72 cd |
| DMS | | 10.84 | 15.64 | 10.49 | 6.84 | 10.95 |

^Z: Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

DMS: Diferencia mínima significativa.

CONCENTRACIÓN DE PROLINA

En la concentración de prolina en hojas, al comparar R-S se observaron diferencias sólo entre los genotipos Azt y Nep. En S-S, Nep registró la mayor concentración, siendo diferente del resto de las especies. En el comparativo R-R no hubo

diferencias. A su vez, la concentración de prolina en raíces al comparar R-S, todos los genotipos mostraron diferencias significativas. Tanto en S-S como en R-R no se observaron diferencias entre especies (Figura 1). Una respuesta común de las plantas cultivadas en déficit hídrico es la acumulación de prolina (Bogges, 1976; Huang, 1979). A este

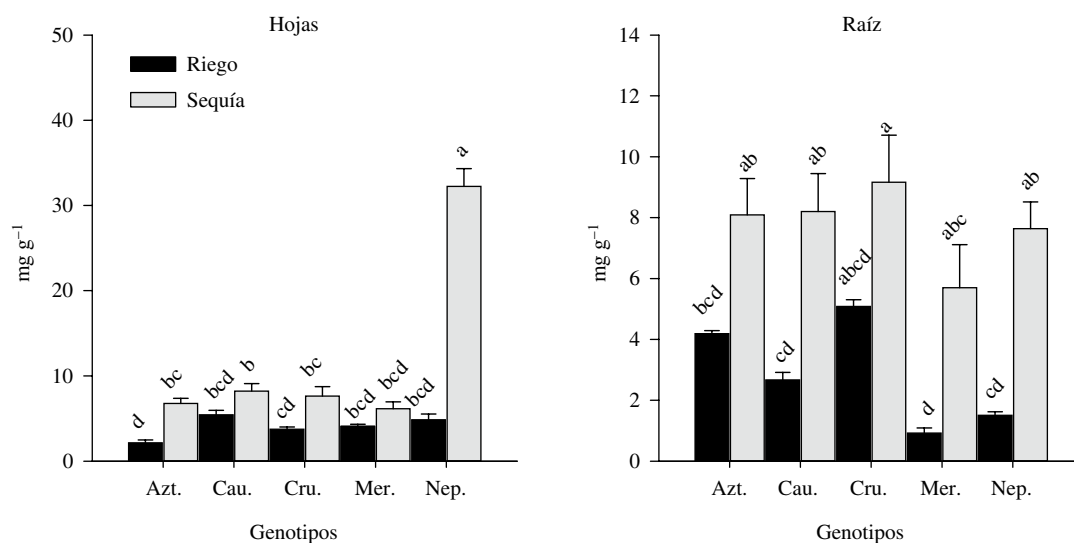


Figura 1. Efecto de la sequía sobre la distribución y acumulación de prolina durante la fase de floración en cinco genotipos de amaranto. Cada barra representa el promedio de cinco repeticiones \pm error estándar.

respecto, Moradshahi *et al.* (2004) encontraron un incremento significativo de la concentración de prolina en raíz de dos cultivares (sensible y resistente) de canola (*Brassica napus* L.). Con -0.29 y -0.48 MPa de tensión hídrica el contenido de prolina en el cultivar sensible se incrementó de 90 a 160%, mientras que en el resistente se incrementó de 184 a 270%.

Considerando que la acumulación de prolina podría estar relacionada con la disminución del potencial hídrico y, por consiguiente, la absorción de agua, en la Tabla 3 se muestra en orden ascendente la acumulación de este osmolito en raíces y hojas. El gradiente de acumulación de prolina en raíces no registró diferencias significativas en cru y Azt. Los genotipos cau, Nep y Mer cultivados en sequía acumularon significativamente más prolina que los de riego. En hojas, Mer, cau y cru fueron estadísticamente iguales en cuanto a la acumulación de prolina; por su parte, Azt y Nep registraron significativamente mayor concentración de prolina en sequía. En general, Mer (raíz) y Nep (hoja) fueron los genotipos con mayor acumulación de prolina.

A. hypochondriacus, raza Nepal cultivada en sequía, fue la especie que registró el mayor incremento en la concentración de prolina en hoja y la segunda posición en raíz (Tabla 2), lo cual hace pensar que este genotipo es menos sensible a la sequía si consideramos que la concentración de este aminoácido tiene que ver con el ajuste osmótico y la absorción de agua.

Ferrarotto (2003) encontró a los 20 días de aplicada la sequía una mayor acumulación de prolina en *Amaranthus cruentus* (0.66 g pf^{-1}) que en *Amaranthus dubius* (0.38 g pf^{-1}). A los 40 días, ambas especies mostraron un incremento en la concentración de este osmolito. *A. cruentus* fue la especie menos sensible a la sequía por acumular más prolina. En este experimento todos los genotipos cultivados en sequía registraron concentraciones mayores de prolina con respecto a los no estresados. Por su grado de acumulación en condiciones de deficiencia de humedad, este es un parámetro confiable para la construcción de perfiles de grado de susceptibilidad a la sequía. Considerando este criterio, en raíz, cru y Azt fueron los más sensibles, mientras que Nep y Mer resultaron los menos sensibles a la sequía quedando cau intermedio. Sin embargo, en hoja Mer y cau fueron los más sensibles a la sequía, mientras que Azt y Nep resultaron menos sensibles a la sequía. Al parecer, el genotipo más estable fue

Tabla 2

Porcentaje de incremento en la concentración de prolina de los tratamientos en sequía comparados con los de riego.

| Raíz | (-) sensibilidad a la sequía de los genotipos evaluados (+) | | | | |
|----------------|---|---------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | Mercado | Nepal | Caudatus | Azteca | cruentus |
| Incremento (%) | 519.56* | 405.96* | 207.12* | 93.07 ^{NS} | 79.96 ^{NS} |
| Hoja | Nepal | Azteca | cruentus | caudatus | Mercado |
| Incremento (%) | 565.30* | 214.42* | 103.47 ^{NS} | 50.82 ^{NS} | 50.61 ^{NS} |

^{NS}, *: No significativos y significativo con una $P \leq 0,05$ respectivamente.

Tabla 3

Porcentaje de disminución del área foliar y número de hojas de los tratamientos en sequía con respecto a los de riego

| Variables | (-) sensibilidad a la sequía de los genotipos evaluados (+) | | | | |
|----------------|---|--------------------|--------------------|---------|----------|
| | caudatus | Azteca | Nepal | Mercado | cruentus |
| Área foliar | caudatus | Azteca | Nepal | Mercado | cruentus |
| Incremento (%) | 29 ^{NS} | 35,2* | 36,3* | 37,4* | 46,2* |
| Nº de hojas | caudatus | Mercado | cruentus | Azteca | Nepal |
| Incremento (%) | 11,3 ^{NS} | 13,7 ^{NS} | 16,4 ^{NS} | 20,8* | 23,6* |

^{NS}, *: No significativos y significativo con una $P \leq 0,05$ respectivamente.

cau ya que tanto en raíces como en hojas permaneció con valores intermedios (Tabla 2).

ÁREA FOLIAR Y NÚMERO DE HOJAS

Al comparar el área foliar en R-S (Figura 2A), con excepción de cau, la totalidad de los genotipos mostraron diferencias significativas. En S-S, Mer mostró la menor área foliar, sin diferencias entre especies, mientras que en R-R, cru mostró la mayor área foliar, siendo únicamente diferente de cau y Mer.

En cuanto al número de hojas (Figura, 2B) en el comparativo R-S, solo Azt y Nep resultaron diferentes. En S-S, cru registró el menor número de hojas, siendo solamente diferente de Azt. En R-R, Azt registró el mayor número de hojas, siendo diferente con cru y Mer, mostrando este último el menor número de hojas.

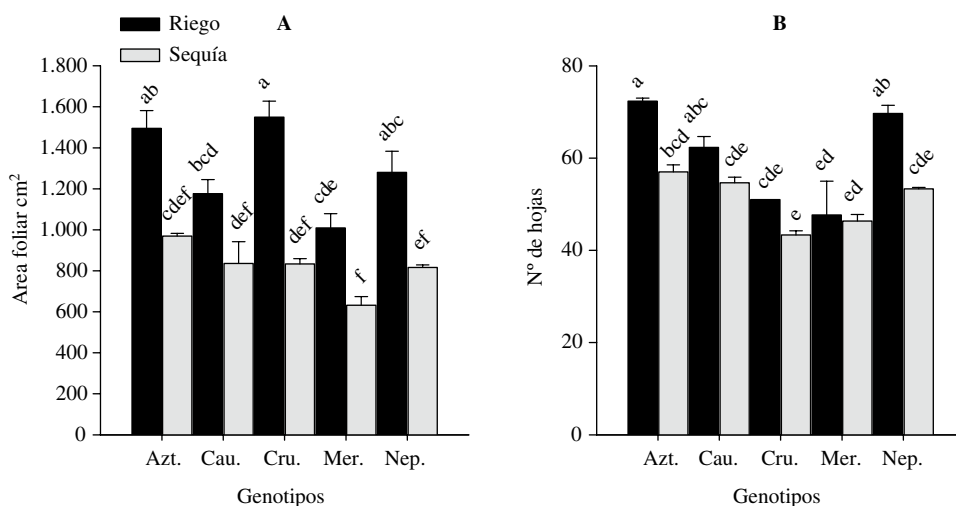


Figura 2. Efecto de la sequía sobre el área foliar y número de hojas durante la fase de floración en cinco genotipos de amaranto. Azt, azteca, cau, A. caudatus, cru, A. cruentus, Mer, Mercado y Nep, Nepal. R, riego; S, sequía. Cada barra representa el promedio de cinco repeticiones \pm error estándar.

En la Tabla 3 se observa que tanto en el área foliar como en el número de hojas cau no registró diferencias por efecto de la sequía, lo cual indicó que esta especie mantuvo equiparable su área fotosintética en condiciones de estrés hídrico. En Mer y cru, la menor área foliar se debió más a la caída de hojas, mientras que en Azt y Nep dicha disminución se obtuvo por un menor crecimiento de estas.

Los resultados de este trabajo mostraron que con excepción de cau en todos los genotipos cultivados en sequía se registró una disminución significativa del área foliar. Esta respuesta sugiere que cau podría tener posibilidades de selección, respecto a esta variable, para atribuirle una menor susceptibilidad a la sequía. En cuanto a la disminución del número de hojas, sólo en Azt y Nep se registró una disminución significativa. La reducción del área foliar por reducción del crecimiento de las hojas con relación a la pérdida de hojas por desprendimiento podría interpretarse como un efecto de compensación; en el primer caso, se mantienen *in situ* las hojas, con lo que una menor área foliar podría significar una estrategia de reducción de la pérdida de agua; por otro lado, la disminución del número de hojas implica una reducción del área transpiratoria. En ambos casos la acumulación de materia seca se ve afectada porque la actividad fotosintética también lo es en estos dos escenarios de menor área foliar efectiva. Con respecto a esto último, y a manera de analogía con los resultados obtenidos en un estudio donde Liu y Stützel (2004) investigaron los efectos

de la sequía sobre la producción y distribución de la materia seca sobre cuatro fenotipos de amaranto (Hin Choi, WS80-192, Co-2 y RRC 1027) se encontró que WS80-192 no fue afectado en la producción de biomasa foliar a diferencia del resto de los genotipos estudiados.

PARTICIÓN DE BIOMASA

Al evaluar la biomasa total (PSTo) y la partición de la misma en raíz (PSR), tallo (PST) y hojas (PSH) con excepción de cau para PSR y en Mer para PSH se observaron diferencias significativas en el resto de las variables y genotipos estudiados (Tabla, 4). Respecto a cau este resultado es coincidente en el comparativo R-S con el número de hojas y área foliar de este genotipo que tampoco registró diferencias significativas (Tabla 4).

En el comparativo de R-R para PSR, cru con un valor mayor resultó diferente de Mer, cau y Nep. Respecto a S-S, Nep fue diferente de cru Azt y cau (Tabla 4).

En el comparativo de PST, en R-R, Azt fue el mayor observando diferencias estadísticas del resto de los genotipos. Respecto a S-S, Nep resultó diferente de Azt y cau.

Al evaluar el PSH, se observó que en R-R, Azt resultó diferente de cau y Mer. Para S-S todos fueron iguales y para PSTo, en R-R resultaron diferentes entre sí tanto Azt y cau como Nep y Mer. Con respecto a S-S solo Nep fue diferente de Azt y cau.

Tabla 4

Efecto de la sequía sobre la distribución de biomasa seca (gramos) en cinco genotipos de amaranto. Cada dato es el promedio de cinco repeticiones

| Genotipo | Edo hídrico | Peso seco (g) | | | |
|----------|-------------|---------------------|--------|--------|----------|
| | | PSR | PST | PSH | PSTo |
| Azt | R | 4,18 a ^Z | 6,40 a | 5,30 a | 15,88 a |
| | S | 1,82 c | 3,20 c | 3,20 c | 8,22 de |
| cau | R | 3,30 b | 5,10 b | 4,10 b | 12,50 bc |
| | S | 3,00 b | 3,40 c | 2,80 c | 9,20 cd |
| cru | R | 4,70 a | 5,00 b | 5,30 a | 15,00 ab |
| | S | 1,50 cd | 2,00 d | 2,90 c | 6,40 de |
| Mer | R | 3,50 b | 2,80 c | 3,30 c | 9,60 cd |
| | S | 1,10 de | 1,50 d | 3,00 c | 5,60 e |
| Nep | R | 3,30 b | 3,30 c | 5,10 a | 11,70 bc |
| | S | 0,80 e | 1,40 d | 3,00 c | 5,20 e |
| DMS | | 0,63 | 0,61 | 0,53 | 3,34 |

Z: Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

DMS: Diferencia mínima significativa.

En cuanto al porcentaje de disminución de biomasa, con excepción de Mer en peso seco de hojas y cau tanto en peso seco de raíces como en peso seco total, todos los genotipos registraron una disminución de la biomasa seca de los tratamientos cultivados en sequía con respecto a los de riego. En la Tabla 5 se observa en orden de susceptibilidad el efecto de la sequía sobre los cinco genotipos de amarantos evaluados en la cual se determinó que cau mostró ser menos susceptible a la sequía, quedando en primer lugar sin diferencias estadísticas en peso seco de raíces, tallo y peso seco total y en segundo lugar en peso seco de hojas con diferencias entre riego y sequía. Liu y Stützel (2002) estudiaron los efectos de la sequía sobre cuatro genotipos de amaranto (Hin Choi, Co .2, WS80-192 y RRC 1027) y encontraron que, con excepción de Hin Choi, la reducción de la biomasa en los demás cultivares correlacionó negativamente con el ajuste osmótico, por lo que concluyeron que las relaciones hídricas del amaranto fueron caracterizadas por una elevada capacidad de ajuste osmótico que pudo mantener la turgencia y, por ende, la producción de materia seca durante el estrés hídrico. A este respecto, en otro

Tabla 5

Porcentaje de disminución de sequía con respecto a riego sobre la distribución de pesos secos en cinco genotipos de amaranto cultivados en estrés hídrico. En cada caso se ordenan de menor a mayor sensibilidad

| Variables evaluadas | (-) sensibilidad a la sequía de los genotipos (+) | | | | | |
|---------------------|---|----------|--------|----------|----------|-------|
| | PSR | caudatus | Azteca | cruentus | Mercado | Nepal |
| % disminución | 9,1 ^{NS} | 56,46* | 68,08* | 68,57* | 75,76* | |
| PST | caudatus | Mercado | Azteca | Nepal | cruentus | |
| % disminución | 33,3* | 46,4* | 50,00* | 57,57* | 60,00* | |
| PSH | Mercado | caudatus | Azteca | Nepal | cruentus | |
| % disminución | 9,09 ^{NS} | 31,7* | 39,62* | 41,18 | 45,3 | |
| PSTo | caudatus | Mercado | Azteca | Nepal | cruentus | |
| % disminución | 26,4 ^{NS} | 41,67 | 48,24 | 55,56 | 57,33 | |

NS: resultados no significativos, y*: significativos, con una $P \leq 0,05$.

estudio de Liu y Stützel (2004), con relación a la producción de biomasa de la raíz, otro cultivar, Hin Choi, no resultó afectado en su producción de biomasa radical respecto a los genotipos restantes.

Con el fin de observar todas las variables de respuesta integradas se construyó la Tabla 6.

En la Tabla 6 se observa que cau es el genotipo menos sensible a la sequía, considerando las variables morfométricas y el contenido hídrico relativo a las 14:00 horas manteniéndose en un punto intermedio en cuanto a la concentración de prolina en hoja y raíz. En el lado opuesto, cru y nep (siendo la excepción para este último la concentración de prolina foliar) fueron los genotipos más sensibles a la sequía considerando el total de las variables evaluadas.

Un aspecto común a las variables evaluadas en amaranto es su reconocida variabilidad, lo cual puede deberse a la heterogeneidad del material genético (Alejandre y Gómez, 1990). ¿Tiene sustento suficiente dicha afirmación sobre la variabilidad del amaranto? En un ensayo realizado por Mapes (2001) sobre asignación de biomasa en donde se compararon tres colectas de amaranto con distinto tipo de manejo (verdura, ruderal y grano) se encontró, por ejemplo, una variación de altura desde 255.9 cm para el tipo verdura (*A. hypochondriacus*; "Mixteco"), 148,6 cm

Tabla 6

VARIABLES DE RESPUESTA EVALUADAS DURANTE LA FASE DE FLORACIÓN EN CINCO GENOTIPOS DE AMARANTO. MIENTRAS MÁS A LA IZQUIERDA SE UBIQUE EL GENOTIPO, ES MENOS SENSIBLE A LA SEQUÍA, HACIA LA DERECHA ES MÁS SENSIBLE AL ESTRÉS HÍDRICO

| Variables Evaluadas | (-) sensibilidad a la sequía de los genotipos (+) | | | | |
|---------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| | cau | Mer | Nep | cru | azt |
| CHR, 14:00 hrs | | | | | |
| Prolina raíz | Mer | Nep | cau | Azt | cru |
| prolina hoja | Nep | Azt | cru | cau | Mer |
| AF | cau | Azt | Nep | Mer | cru |
| NH | cau | Mer | cru | Azt | Nep |
| PSR | cau | Azt | cru | Mer | Nep |
| PST | cau | Mer | Azt | Nep | cru |
| PSH | Mer | Cau | Azt | Nep | cru |
| PSTo | cau | Mer | Azt | Nep | cru |

para el ruderal (*A. hybridus*) y 141,1 cm para el productor de grano (*A. hypochondriacus*, “mercado” grano). Respecto al área foliar se obtuvo un intervalo entre 2,9 m² (verdura) hasta 0,405 m² (ruderal). La evaluación del peso seco total mostró un intervalo desde 549 g (verdura) hasta 334,58 (grano). Por su parte, Espitia (1991) demostró que el coeficiente de variación genética de amaranto dentro de los tipos productores de grano Azteca, Mercado, Mexicano y Nepal fluctuó desde valores porcentuales de medios a altos en los parámetros de altura de la planta (35,13%), número de hojas (39,18%), materia seca del tallo (66,32%), materia seca de la semilla (41,07%), biomasa total (31,36%) y materia seca foliar (28,15%). El efecto ambiental (sequía) puede modificar (amplificar o dejar inalterado) la expresión

fenotípica de los parámetros evaluados, dándole un significado a la selección de caracteres morfológicos o fisiológicos de tipos o razas susceptibles a la deficiencia de agua.

CONCLUSIONES

El mecanismo de evasión a la sequía de cada cultivar no puede estar condicionado por un solo parámetro, sino por varios factores interactuantes cuyo nivel de expresión fenotípica, bajo condiciones experimentales definidas, permite la identificación de su grado de susceptibilidad a condiciones de estrés.

Detallando las relaciones cultivar-variables evaluadas se obtuvo lo siguiente:

- Respecto a CHRA *A. caudatus*, *A. hypochondriacus* raza Mercado y *A. hypochondriacus* raza Nepal fueron los más tolerantes, mientras que *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* raza Azteca resultaron los genotipos más sensibles tomando como criterio la evaluación de las 14 y 16 horas.
- Con relación a la concentración de prolina en raíz, los genotipos más tolerantes fueron *A. hypochondriacus* razas Mercado y Nepal, mientras que los más sensibles resultaron ser *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* raza Azteca.
- Considerando la partición de biomasa, *A. caudatus* fue la especie más tolerante al no registrar una disminución significativa por efecto de la sequía en PSR, PST, PSTo y ocupando el segundo lugar respecto a PSH. Esta misma especie fue la que obtuvo la menor disminución tanto de área foliar como del número de hojas.

LITERATURA CITADA

- AGUILERA, C.M. 1996.** Relaciones agua suelo planta atmósfera. 4ta ed. Universidad Autónoma de Chapingo. México, 256 p.
- ALEJANDRE, I.G.; GÓMEZ, L.F. 1990.** Variabilidad en tipos criollos de amaranto (*Amaranthus* spp) en la región central de México. En: Trinidad, S.A.; Gómez, L.F. y Suárez, R.G. (Eds.). El amaranto (*Amaranthus* spp): su cultivo y aprovechamiento. Montecillo, México, Colegio de Postgraduados. pp. 242-261.
- BATES, L.; WALDREN, R.; TEABE, O. 1973.** Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 39: 205-207.
- BLUM, A. 1997.** Constitutive traits affecting plant performance under stress. En: Edmeades, G.O.; Bänziger, M.; Mickelson, H.R.; Peña V.C.B. (eds). *Developing Drought –and Low N– Tolerant Maize*. Distrito Federal, México, Proc of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, 131-135.
- BOGGESS, S.F.; STEWART, C.R. 1976.** Effect of water stress on proline synthesis from radioactive precursors. *Plant Physiol*. 58: 398-401.
- BOHNERT, H.J.; SHEVELEVA, E. 1998.** Plant stress adaptation: making metabolism move. *Current Opinion Plant Biology* 1: 267-274.

- BOYER, J.S. 1982.** Plant productivity and environment. Science 218: 443-448.
- ESPITIA, R.E. 1991.** Variabilidad genética e interrelaciones del rendimiento y sus componentes en alegría (*Amaranthus spp.*). Tesis. Maestría, especialidad en Genética. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 104 p.
- FERRAROTTO, M.S. 2003.** Proline accumulation in pigweed plants (*Amaranthus dubius* Mart. and *Amaranthus cruentus* L.) growing under water stress conditions. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 20: 453-460.
- GIROUSSE, C.; BOURNOVILLE, R.; BONNEMAIN, J.L. 1996.** Water deficit-induced changes in concentrations of proline and some other amino acids in the phloem sap of alfalfa. Plant Physiol. 111: 109-113.
- HONG, B.S.; LI, Y.CH.; CHERUTH, A.J.; CHANG, X.Z. 2008.** Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. C. R. Biologies 331: 215-225.
- HUANG, A.H.C.; CAVALIERI, A.J. 1979.** Proline oxidase and water stress-induced proline accumulation in spinach leaves. Plant Physiol. 63: 531-535.
- LIU, F.; STÜTZEL, H. 2002.** Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to soil drying. European Journal of Agronomy 16(2): 137-150.
- LIU, F.; STÜTZEL, H. 2002. 2004.** Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to drought stress. Scientia horticulturae 102 (1): 15-27.
- MAPES, C. 2001.** Asignación de biomasa en tres colectas de amaranto (*amaranthus spp.*) con diferente grado de manejo. 159-189. en: Rendón A.B., Rebollar D.S., Caballero N.J., Martínez A.M.A. 2001. Plantas, Cultura y Sociedad. Estudio sobre la relación entre seres humanos y plantas en los albores del siglo XXI. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa, México. 317 pp.
- MASINDE, P.W.; STÜTZEL, H.; AGONG, S.G.; FRICKE, A. 2006.** Plant growth, water relations and transpiration of two species of African nightshade (*Solanum villosum* Mill. ssp. *Miniatum* (Bernh. ex Willd.) Edmonds and *S. sarrachoides* Sendtn.) under water-limited conditions. Scientia Horticulturae 110:7-15.
- MORADSHAHI, A.; SALEHI, E.B.; KHOLDEBARIN, B. 2004.** Some physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) to water deficit stress under laboratory conditions. Iranian Journal of Science & Technology 28(A1): 44-50.
- MUÑOZ, O.A. 1980.** Resistencia a la sequía y mejoramiento genético. Ciencia y Desarrollo. 33: 26-35.
- PIHA, M.I. 1995.** Yield potential, fertility requirements, and drought tolerance of grain amaranth compared with maize under Zimbabwean conditions. Trop. Agric (Trinidad) 72(1): 7-12.
- SIDDIQUE, M.R.B.; HAMID, M.S.I. 2000.** Drought stress effects on water relations of wheat. Bot. Bull. Acad. Sin. Sin 41: 35-90.
- SZENTE, K.; TUBA, Z.; NAGY, Z.; CSINTALAN, Z.S. 1993.** Ecophysiological approach to competition between *Amaranthus chlorostachys* and sunflower (*Helianthus annuus*) under drought stress. Weed Research 33: 121-129.
- TURNER, N.C. 1997.** Further progress in crop water relations. Adv. Agronom. 58: 293-338.
- YOSHU, Y.; TOMOHIRO, K.; KAZUO, N.; KAZUKO, Y.S.; KAZUO, S. 1997.** Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water stress. Plant Cell Physiol. 38(10): 1095-1102.

