



Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Effect of the water deficit on the transplant of tomato seedlings
(*Solanum lycopersicum* L.)

Helber Enrique Balaguera¹, Javier Giovanni Álvarez-Herrera² y Jorge Daniel Rodríguez³

RESUMEN

La inducción de la mayor cantidad de raíces en plántulas de tomate es fundamental en la etapa postrasplante, ya que de éstas depende la adecuada absorción de agua y nutrientes para su posterior desarrollo. El estrés hídrico puede generar un crecimiento radicular, ya que la raíz debe buscar agua. Con el fin de lograr este crecimiento, se sometieron plántulas de tomate a un déficit hídrico. El diseño fue completamente al azar con 10 tratamientos y 5 repeticiones; los tratamientos consistieron en la aplicación de 10 láminas de riego (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 y 2,0 de la evaporación medida en un tanque evaporímetro instalado dentro del invernadero) durante los 5 días previos al trasplante. Se trasplantaron 40 d después de la siembra y se evaluaron un mes después. No se presentaron diferencias significativas en el peso seco de hojas, tallos y raíces. Las diferentes láminas de agua no afectaron el peso fresco de hojas y tallos, el área foliar, la distribución de fitomasa seca, la relación raíz/parte aérea ni la altura final de las plantas. Se obtuvieron diferencias significativas en la longitud y en el peso fresco de la raíz; en ambos casos el mejor tratamiento fue el coeficiente 1,6 de la evaporación. La lámina con menor respuesta fue la de 0,2. Una lámina de riego de 1,6 de la evaporación genera plántulas con sistemas radiculares adecuados.

Palabras clave: evaporación, riego, raíces, larga vida, sustratos.

ABSTRACT

Inducing the highest quantity of roots in tomato seedlings is fundamental at the post-seedling stage, since the appropriate absorption of water and nutrients for their later development depends upon this. The water stress can generate roots growth because the root should search water. In order to achieve this growth, the tomato seedling was placed under a water deficit. The design was totally randomized with 10 treatments and 5 replicates, the treatments consisted in application of 10 levels of water application (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, and 2.0 of evaporation measured in evaporimeter tank installed inside the greenhouse) during the 5 previous days to the transplant. After 40 days, seedlings were transplanted and during one month they were evaluated. Significant differences were not found among the dry weight of leaves, stems and roots. The different levels of water didn't affect the fresh weight of leaves and stems, foliar area, distribution of dry biomass, root/shoot relationship and final plant height. Significant differences were obtained in the length and fresh weight of the root, in both cases the best treatment was the coefficient 1.6 of the evaporation. The level of water with smaller response was that of 0.2. The level of water of 1.6 of the evaporation generates seedlings with appropriate root systems.

Key words: evaporation, irrigation, roots, long life, substrates.

Introducción

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) como principal hortaliza tiene determinada su calidad en gran medida por la forma como son obtenidas las plántulas en la fase de vivero, por lo que a nivel comercial uno de los grandes retos es la obtención de plántulas vigorosas que garanticen un óptimo desarrollo del cultivo. Para esto existen diversas técnicas que se derivan de la manipulación de procesos fisiológicos. Una de ellas es el déficit hídrico,

que puede activar o incrementar los mecanismos de resistencia de las plantas a situaciones de sequía, sin reducir la concentración de nutrientes en la planta (Villar-Salvador *et al.*, 1999); por el contrario, induce la formación de raíces, factor que incrementa la absorción de agua y nutrientes, así como el contenido y la utilización de los carbohidratos por parte de la planta (Ramírez-Palma *et al.*, 2005).

Según Marschner (2002), el sistema radicular de plantas con déficit hídrico continúa creciendo por elongación de

Fecha de recepción: Agosto 23 de 2007. Aceptado para publicación: julio 10 de 2008

Trabajo realizado por el Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.

¹ Ingeniero agrónomo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. enrique_balaguera@yahoo.com

² Profesor asistente, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. jgalvarezh@gmail.com

³ Ingeniero agrónomo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. jdr141@4yahoo.com

Agronomía Colombiana 26(2), 246-255, 2008



las raíces existentes y por la formación de nuevas raíces. La zona apical de las raíces y de la estela permanecen vivas, a pesar de estar sometidas a colapsos del córtex en las zonas basales gracias al estrés hídrico. Una vez se rehidrata el sistema radicular de la plantas sometidas a estrés, éste crece por la elongación de las raíces ya existentes (Stasovski y Peterson, 1991). En suelos secos el contacto raíz-suelo es menor tanto por la disminución del volumen de las raíces como por la de la fase coloidal misma (Faiz y Weatherby, 1982); parte de esta pérdida de contacto es probablemente compensada por el incremento en longitud y densidad de las raicillas (Mackay y Barber, 1987).

Del mismo modo, en la zona apical de las raíces la síntesis de ácido absícico (ABA) aumenta bajo déficit hídrico y se transmite como un signo no hidráulico hacia la parte aérea, que tiene una sensibilidad más alta al ABA que las raíces, en términos de inhibición del crecimiento (Creelman *et al.*, 1990). Éste es un primer mecanismo de la planta para conservar el agua cuando los suelos presentan bajos contenidos de humedad, antes de la ocurrencia de un déficit hídrico en la parte aérea (Saab y Sharp, 1989).

Bajo condiciones severas de sequía, las plantas ralentizan su crecimiento y acumulan solutos en las células para mantener el volumen de la célula y el turgor. Este fenómeno es conocido como ajuste osmótico, observado en tallos, hojas, raíces y frutos (Nomani, 1998; Patakas *et al.*, 2002). Normalmente las plantas reaccionan al posible estrés hídrico al que puedan estar sometidas, aumentando la relación raíz/parte aérea, ya que la parte radicular es la zona donde puede captar los nutrientes. Por el contrario, Gil (2007) afirma que a mayores potenciales de agua en el suelo se produce un mayor crecimiento radicular, ya sea por provocar una menor resistencia a la penetración, como por generar un gradiente de potencial de agua que ocasiona un flujo más rápido hacia las células radiculares. De esta manera las raíces tienden a proliferar en las zonas más húmedas del perfil del suelo.

A medida que un suelo pierde humedad se produce una disminución significativa en su capacidad para transmitir o conducir agua hacia las raíces, debida a una caída súbita de su conductividad hidráulica; por lo tanto, la distancia desde donde las raíces pueden extraer agua de un suelo relativamente seco se reduce a unos pocos milímetros y es por ello que la extracción de agua a bajos contenidos de humedad depende de la presencia de sistemas densos de raíces (Gil, 2007).

Adicionalmente, algunos autores han observado que el precondicionamiento de las plántulas por estrés hídrico en la última fase de cultivo puede incrementar también el potencial de formación de raíces (Rook, 1973; Ali-Abod y Sandi, 1983), factor que se ha relacionado frecuentemente con el desarrollo (supervivencia y crecimiento) de las plántulas en campo (Ritchie y Dunlap, 1980; Burdett, 1987).

En concordancia, el riego deficitario controlado (RDC) es una forma de causar déficit hídrico en las plantas. Éste consiste en aportar menos agua de la que demandan los requerimientos evapotranspirativos de una planta durante alguna etapa fenológica (Gurovich y Páez, 2004); por lo tanto, el déficit hídrico se produce cuando la tasa de pérdida de agua por transpiración es mayor que la de absorción de agua por las raíces. Las estrategias de RDC se utilizan para causar déficits hídricos programados en periodos de tiempos específicos y con intensidades variables (Bravdo *et al.*, 1997; Dry *et al.*, 2001).

Las plantas sometidas a un déficit hídrico presentan cambios en el contenido de sus carbohidratos solubles, así como en la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo del carbono (Foyer, 1988). Debido al cierre estomático parcial, la tasa fotosintética neta disminuye al igual que la transpiración, causando un cambio en el contenido de carbohidratos. En hojas de tomate el contenido de azúcares aumenta hasta en un 47% (Ramírez-Palma *et al.*, 2005); este aumento constituye un indicador del déficit hídrico al que se ha sometido una planta (Wagner *et al.*, 1998). Adicionalmente, el contenido de prolina como consecuencia del estrés hídrico también se incrementa, con el fin de aumentar la retención de agua por parte de la planta (Laborem, 1995). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el vigor de plántulas de tomate sometidas en pretrasplante a diferentes niveles de estrés hídrico.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el invernadero de vidrio de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en Tunja (Boyacá), que se encuentra a 2.782 msnm, a 73° 23' de longitud oeste y 5° 32' de latitud norte. La temperatura interior promedio fue de 16 °C y la humedad relativa, de 65%.

Se utilizaron plántulas de tomate larga vida híbrido Daniela. El sustrato empleado para la germinación fue turba rubia canadiense; sus propiedades físico-químicas se presentan en la tabla 1. Las semillas de tomate se sembraron en bandejas plásticas de 128 alvéolos o cavidades (A-BA128), y se trasplantaron en bolsas plásticas de polietileno con capaci-

dad de 4,5 L de sustrato, con suelo negro de páramo (tabla 1). El suministro de agua se hizo con un sistema de riego por goteo. La evaporación se midió con un tanque plástico elaborado a escala del tanque tipo A, con diámetro de 29 cm y altura de 6,1 cm, e instalado dentro del invernadero.

Se utilizó un diseño completamente al azar con 10 tratamientos y 5 repeticiones. Los tratamientos correspondieron a 10 láminas de riego determinadas por 10 coeficientes (C): 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 y 2,0 de la evaporación medida en el evaporímetro; para un total de 50 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por una plántula de tomate.

En las bandejas de germinación se sembraron 150 semillas de tomate larga vida híbrido Daniela y se cubrieron con plástico negro durante 8 d. De las plántulas emergidas se seleccionaron al azar 50 de aquéllas que presentaron el mismo porte en altura. Las plántulas seleccionadas se sometieron a diferentes láminas de riego aplicadas durante los últimos 5 d previos al trasplante. Finalizada la aplicación de los tratamientos, se procedió al trasplante. Las láminas se determinaron mediante la fórmula:

$$\text{Lámina} = \frac{Etp \cdot C \cdot A}{\eta}$$

En donde, *Etp* es la evapotranspiración en milímetros medida en el tanque evaporímetro; *C*, los diferentes coeficientes; *A*, el área de una cavidad de la bandeja de germinación (0,0009 m²); η , la eficiencia del riego (0,9). Las plantas se trasplantaron en bolsas de polietileno con el suelo negro de páramo a los 40 d después de la siembra

TABLA 1. Propiedades físicas y químicas de la turba y el suelo negro.

Propiedad	Suelo negro	Turba canadiense	Unidades
Densidad real	2,3	-	g·cm ⁻³
Densidad aparente	1,2	0,08	g·cm ⁻³
Porosidad	48	90-95	%
pH	4,8	6,7	
Materia orgánica (MO)	4,80	85	%
Ca	1,58	6,4	cmol·kg ⁻¹
Mg	0,27	4,3	cmol·kg ⁻¹
K	0,16	3,5	cmol·kg ⁻¹
Na	0,88	11	cmol·kg ⁻¹
P	9,25	-	mg·kg ⁻¹

(dds). Se aplicó semanalmente 1 g por planta de N, P, K (grado 15-15-15).

A los 30 d de realizado el trasplante se evaluaron las variables de respuesta: longitud de raíz principal; área foliar, mediante el analizador Li-Cor® 3000A (Li-Cor, USA); fitomasa fresca de raíz, tallo y hojas; fitomasa seca de raíz, tallo y hojas, después de someter las plantas a 70 °C durante 48 h; distribución de fitomasa seca; relación raíz/parte aérea, mediante el cociente entre el peso seco de la raíz y el de la parte aérea y, por último, área foliar específica, resultante del cociente entre el área foliar y el peso seco de hojas. La curva de crecimiento se construyó con las alturas de las plantas medidas semanalmente.

Se hizo un análisis de varianza (Anova) para poder determinar si existían diferencias estadísticas entre tratamientos. La prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey se aplicó con el fin de determinar los mejores tratamientos con una confiabilidad de 95%. Para el procesamiento de los datos se utilizó el paquete estadístico SAS v. 8.1.

Resultados y discusión

El peso fresco de raíces presentó diferencias significativas entre la lámina con C=1,6 (2,028 g) y las demás láminas (tabla 2). Todas las láminas, excepto las de 1,8 y 2,0, presentaron una relación directa entre la lámina suministrada y el peso fresco, siendo la menor lámina (0,2) la que arrojó el peso fresco más bajo (0,774 g).

El peso fresco de hojas y tallos no presentó diferencias significativas (tabla 2). La mejor respuesta en el peso fresco de hojas se debió a la misma lámina (1,61 g), mientras que para tallo fue la lámina 2,0 (0,70 g); los pesos frescos fueron disminuyendo de forma simultánea con el contenido de agua aplicada. Se encontró que la lámina con 0,2 indujo la respuesta menos favorable para peso fresco de hojas y tallos (0,95 y 0,398 g, respectivamente).

Es indispensable la presencia de agua en la rizosfera para que la planta la pueda tomar a través de su sistema radical y almacenarla en todas sus células. Cuando el suministro de agua es demasiado bajo, la planta almacena contenidos mínimos y, a pesar del proceso de osmorregulación efectuado para evitar pérdidas por transpiración, su peso fresco se ve afectado, aunque no necesariamente en forma significativa. La existencia de diferencias en el peso fresco de las raíces y no en la parte aérea (tallo y hojas) probablemente se debe al ajuste osmótico efectuado, que permite regular las pérdidas en el follaje (Davies, 2004).

TABLA 2. Peso fresco y seco de plantas de tomate bajo diferentes láminas de riego en pretrasplante.

Coeficientes de la evaporación	Peso fresco (g)			Peso seco (g)		
	Hojas	Tallo	Raíz	Hojas	Tallo	Raíz
0,2	0,95a	0,398a	0,77b	0,112a	0,036a	0,06 a
0,4	1,082a	0,484a	1,15ab	0,134a	0,046a	0,072a
0,6	1,126a	0,536a	1,44ab	0,146a	0,068a	0,104a
0,8	1,384a	0,586a	1,82ab	0,176a	0,054a	0,104a
1,0	1,296a	0,762a	1,50ab	0,18 a	0,054a	0,106a
1,2	1,324a	0,442a	1,80ab	0,154a	0,042a	0,09 a
1,4	1,504a	0,552a	1,77ab	0,194a	0,056a	0,098a
1,6	1,616a	0,696a	2,03a	0,174a	0,058a	0,114a
1,8	1,422a	0,632a	1,68ab	0,164a	0,052a	0,082a
2,0	1,458a	0,70a	1,66ab	0,166a	0,058a	0,084a
Significancia	ns	ns	*	ns	ns	ns

* Diferencias significativas
 ns, no se presentan diferencias significativas, de acuerdo al Anova
 Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$), según la prueba de Tukey.

El agua captada por las raíces debe ser transportada al tallo y a las hojas, por lo que, si el contenido de humedad disponible es muy bajo, la raíz no tiene la suficiente cantidad de agua para almacenar; por otro lado, el peso fresco se ve afectado por un contenido excesivo de humedad en el suelo, que causa condiciones de anoxia y detiene tanto la división como el crecimiento celular, razón por la cual también se disminuye la captación de agua. Camacho y Caraballo (1994) también encontraron diferencias en el peso fresco de raíces de *Zea mays* de diferentes genotipos sometidos a sequía.

Como lo indica Hsiao (1973), uno de los procesos más sensibles al déficit de agua es el crecimiento celular, de manera que la suspensión del riego reduce la expansión foliar y el crecimiento del tallo y de las raíces.

El peso seco de las plantas de tomate no se vio afectado con las diferentes láminas aplicadas. No obstante, se destacan los menores valores de peso seco con los tratamientos de menor lámina (tabla 2). La menor respuesta se obtuvo con la lámina de $C=0,2$, donde el peso para hojas fue 0,112 g; para tallo, 0,036 g y para raíz, 0,114 g. El mayor peso seco en hojas se obtuvo con la lámina de $C=1,4$ (0,194 g); en tallo, con la lámina de $C=0,6$ (0,068 g) y en raíz, con la lámina de $C=1,6$ (0,114 g). En genotipos de *Zea mays*, Camacho y Caraballo (1994) encontraron diferencias en el peso seco de raíces, concluyendo que los genotipos de maíz con menor peso seco de raíces son menos tolerantes a la sequía.

Johnson y Davis (1973) también encontraron que el crecimiento de raíces es más sensible al déficit hídrico que el crecimiento de las hojas. Clover *et al.* (1999), en experimentos en campo y en invernadero, mostraron que los efectos del estrés por sequía en el peso seco de hojas y raíces de remolacha azucarera fueron de 20% y 29%, respectivamente. Estos efectos podrían causar 29% de pérdidas en el total del peso seco.

El área foliar (AF) no fue afectada significativamente por las diferentes láminas de riego aplicadas en el pretrasplante de plantas de tomate (tabla 3). No se observó una relación clara entre la humedad suministrada y el valor del AF; sin embargo, las tres láminas con menor aporte de humedad sí presentaron los valores más bajos. La lámina más baja (0,2) arrojó la menor AF (35,72 cm²) y, aunque la lámina con $C=1,0$ presentó la mayor AF (49,82 cm²), la lámina con $C=1,6$ presentó un valor muy similar (49,59 cm²).

La expansión de las hojas disminuyó con el estrés por sequía debido al ajuste osmótico inherente y más lento y a la baja extensibilidad de la membrana de las células de las hojas (Frensch, 1997; Hsiao y Xu, 2000). La presión de turgor es muy importante para la elongación de las células, ya que ésta provee el manejo de la fuerza para un crecimiento irreversible de las células (Hsiao y Xu, 2000); es así como las diferencias en la presión de turgor resultan en un AF menor para plantas cultivadas bajo sequía, comparadas con aquéllas bien irrigadas, por lo que una disminución en el

AF y un cierre de estomas originan un menor crecimiento en la altura de las plantas. Ribas *et al.* (2000) encontraron en *Cucumis melo* que, después de la segunda mitad de la fase de llenado de frutos, el AF fue inferior en tratamientos con riego deficitario, lo que a su vez originó una producción menor.

Un estrés por sequía durante la etapa vegetativa del maíz provoca disminución en el crecimiento de las hojas (Vianello y Sobrado, 1991). El crecimiento y la fotosíntesis en hojas jóvenes no alcanzan frecuentemente las tasas originales por varios días respecto a plantas normales; así mismo, las células son más pequeñas y las hojas se desarrollan menos durante el déficit hídrico, lo que resulta en menor área para fotosíntesis (Salisbury y Ross, 1992).

La cantidad de AF por unidad de peso no arrojó diferencias significativas (tabla 3); sin embargo, hubo una relación inversamente proporcional entre el agua suministrada y el valor del área foliar específica (AFE). El valor más alto se obtuvo con la lámina de C=0,4 (0,37 cm²·mg⁻¹), mientras que la menor respuesta fue dada por la lámina con C=1,4 (0,23 cm²·mg⁻¹). El aumento de peso seco en relación al AF se da por acumulación de metabolitos encargados de la osmorregulación, es decir, que hay un aumento de metabolitos para aumentar la retención de agua en las células.

Las plantas que se han sometido a un déficit hídrico presentan cambios en el contenido de los carbohidratos solubles, así como en la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo del carbono (Foyer, 1988). Esta acumulación de azúcares se ha asociado al ajuste osmótico que se necesita para contrarrestar la deshidratación. A causa de la menor apertura estomatal, la tasa fotosintética neta disminuye al igual que la transpiración, causando un cambio en el contenido de carbohidratos; caso que se refleja en plantas de tomate, que aumentan en 47% el contenido de glucosa, sacarosa y fructuosa en las hojas (Ramírez-Palma *et al.*, 2005). Adicionalmente, se incrementa el contenido en las hojas del aminoácido prolina, que constituye un indicador del déficit hídrico al que se ha sometido una planta (Wagner *et al.*, 1998).

Laborem (1995) indica que la acumulación de prolina en hojas de las plantas sometidas a estrés por sequía está asociada a una pérdida constante de la capacidad de transporte del nitrógeno, lo que pone de manifiesto que la acumulación del aminoácido es un síntoma claro de la respuesta al deterioro por el déficit hídrico y no a una característica adaptativa del valor de supervivencia.

Una elevada AFE incrementa la succulencia y fragilidad de las hojas, al tiempo que se incrementa el riesgo de pérdidas prematuras de tejido; en tanto que en las hojas más densas y con menor AFE tienen correlaciones altas con una mayor

TABLA 3. Longitud de raíz principal, área foliar, área foliar específica y relación raíz/parte aérea de plantas de tomate bajo diferentes láminas de riego en pretrasplante.

Coefficientes de la evaporación	Longitud raíz principal (cm)	Área foliar (cm ²)	Área foliar específica (cm ² ·mg ⁻¹)	Relación raíz/parte aérea
0,2	21,84b	35,72a	0,32a	0,41a
0,4	25,34ab	40,47a	0,37a	0,41a
0,6	33,30ab	41,15a	0,29a	0,51a
0,8	32,98ab	47,18a	0,27a	0,45a
1,0	43,76ab	49,83a	0,29a	0,46a
1,2	29,32ab	44,51a	0,29a	0,45a
1,4	41,70ab	44,81a	0,23a	0,39a
1,6	46,70a	49,60a	0,30a	0,49a
1,8	38,52ab	42,39a	0,28a	0,43a
2,0	42,92ab	48,26a	0,30a	0,38a
Significancia	*	ns	ns	ns

* Diferencias altamente significativas
ns, no se presentan diferencias significativas, de acuerdo al Anova
Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$), según la prueba de Tukey.

lignificación, menor tamaño celular, bajo contenido de humedad y baja concentración de nitrógeno. No obstante, el AFE disminuye a medida que la planta madura, ya que se va adquiriendo mayor peso por hoja (Pérez *et al.*, 2004).

Pérez *et al.* (2004) afirman que la reducción en el AFE se atribuye a una alteración en la estructura de la hoja o bien, al incremento en su concentración de nutrimentos o carbohidratos no estructurales; tal reducción es el resultado de una incapacidad de la planta para asignar estos compuestos en crecimiento estructural. En experimentos realizados con remolacha sometida a déficit hídrico, el AFE fue más baja que en el testigo sin estrés (Mohammadian *et al.*, 2005).

La longitud de la raíz principal se vio afectada por las láminas aplicadas, encontrándose diferencias altamente significativas entre la lámina de C=1,6 y las demás láminas; su longitud fue de 46,7 cm, frente al valor más bajo de 21,8 cm (lámina de C=0,2) (figura 1). Este resultado pone de manifiesto que el crecimiento radicular depende de un buen contenido hídrico; sin embargo, este aporte no debe disminuir drásticamente la presencia de oxígeno disponible para el crecimiento de raíces, razón por la que las láminas más altas (1,8 y 2,0) empiezan a limitar el crecimiento de la raíz por exceso de humedad y falta de oxígeno.

Si el estrés hídrico que sufre una planta es muy intenso, puede quedar dañada y, en consecuencia, disminuir su capacidad de regeneración celular (Tinus, 1996; Villar-Salvador *et al.*, 1999). Al mismo tiempo, el crecimiento del sistema radicular está estrechamente ligado a la provisión de glúcidos de la parte aérea, por lo que todo factor que actúe sobre ésta también incidirá sobre el crecimiento y el funcionamiento de la parte subterránea (Gil, 2007).

Según Marschner (2002), los sistemas radiculares se caracterizan por una adaptabilidad muy alta. Su crecimiento

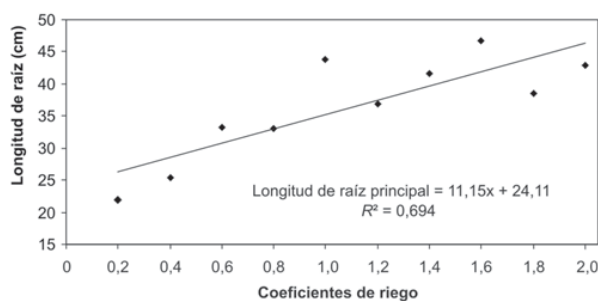


FIGURA 1. Longitud de raíz principal de plantas de tomate bajo diferentes láminas de riego en pretrasplante.

y desarrollo implican complejas interacciones entre el ambiente del suelo y la parte aérea y, dado que el ambiente en el que se desarrollan las raíces es muy heterogéneo en espacio y en tiempo, las raíces deben tener la habilidad para superar estas situaciones mediante la plasticidad fenotípica (Fitter *et al.*, 1991).

Los datos obtenidos por Villar-Salvador *et al.* (1997) en plantas de *Pinus halepensis* demuestran que las plantas sometidas a déficit hídrico desarrollan significativamente menos raíces por planta que las plantas con mayor suministro de humedad, y la longitud total media de raíces por planta sigue una tendencia lineal con el contenido de humedad.

En la curva de crecimiento, la lámina con C=0,6 presentó las mayores alturas hasta la semana 4 y, sólo en esta semana, se presentaron diferencias significativas entre esta lámina y las demás (figura 2). Al final del experimento (semana 5), no se observaron diferencias significativas; no obstante, la lámina con C=1,2 fue la que produjo finalmente la mayor altura y, en contraposición, la lámina más baja (0,2) presentó durante todo el ensayo la menor respuesta en altura, situación acorde a lo reportado por varios investigadores (Yang y Hsiang, 1992; Abrecht y Carberry, 1993).

Con un déficit hídrico la expansión de las hojas disminuye, pero es posible que la elongación del tallo pueda continuar en el mismo nivel de estrés hídrico. Debido a la resistencia más baja del movimiento del agua en los tejidos del xilema en tallos, comparada con el comportamiento del agua en las nervaduras de las hojas (Steudle, 2000), se puede dar el caso de que en un nivel determinado de estrés hídrico se mantenga una presión de turgor más alta para las células de los tallos que para las células de las hojas. Esta situación puede permitir el incremento de la elongación de células del tallo durante periodos de sequía, aunque no necesariamente con una eficiencia similar a la de plantas con buena humedad. Por tanto, la elongación de las células del tallo incrementa la altura de las plantas, en consecuencia, la altura puede ser menos sensible al déficit hídrico.

Por otra parte, Martínez-Trinidad *et al.* (2002) encontraron que en *P. leiophylla* en periodo de rehidratación las plantas sometidas a un déficit hídrico severo crecieron 6,35 cm, 94% más que en aquéllas que no se sometieron a sequía. Los resultados muestran un efecto compensatorio de las plantas sometidas a déficit hídrico. Kaufmann (1977) también reportó un comportamiento compensatorio en plantas de *P. radiata* después de ser sometidas a diferentes ciclos de sequía en el suelo; sin embargo, en este estudio

se muestra que el efecto de la sequía en el crecimiento de las plantas perdura aun después de que ésta ha terminado, lo mismo que sucede en otras especies (Macey y Arnott, 1986; Becker *et al.*, 1987).

Van Iersel y Nemali (2004) observaron en caléndula (*Tagetes erecta* L.) una disminución del crecimiento, incluyendo masa seca de parte aérea, área foliar, número de hojas y altura de la planta, de forma lineal con la disminución en el contenido de humedad. La reducción de la altura de las plantas a causa del estrés por sequía se ha reportado, además de en tomate, en caléndula (Brown *et al.*, 1992) y brócoli (*Brassica oleracea* L.) (Latimer y Steverson, 1997).

La distribución de los fotoasimilados en la planta incide directamente sobre la relación raíz/parte aérea, estando influenciada esta distribución por las condiciones que ofrece el ambiente en un momento dado y por la capacidad que tenga la planta para ubicarlos en determinado órgano como respuesta a los estímulos ambientales a los que es sometida (Casierra-Posada y Rodríguez, 2006).

En consecuencia, condiciones de estrés, como salinidad, originan un déficit hídrico en la planta y obligan a que se sacrifique la acumulación de biomasa de la parte aérea y se deposite en la raíz, con el fin de que este órgano aumente su envergadura y pueda explorar el suelo para hallar condiciones favorables (Casierra-Posada y Rodríguez, 2006). En este caso, la relación raíz/parte aérea sufre un incremento.

Aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas, se observó que la mayor lámina ($C=2,0$) arrojó el valor más bajo de la relación raíz/parte aérea (0,38), mientras que el valor más alto (0,50) fue alcanzado por la lámina con $C=0,6$ (tabla 3). Una cantidad elevada de agua suministrada a la planta de tomate se traduce en una mayor parte aérea; no

obstante, la raíz no muestra un crecimiento muy marcado ya que no tiene que elongarse de forma significativa para buscar agua en el suelo.

Contrariamente, bajos suministros de agua obligan a la planta a dirigir gran parte de sus fotoasimilados al sistema radicular, con el fin de que éste aumente y explore el sustrato en busca de agua, de tal forma que el peso seco obtenido en este órgano aumenta considerablemente respecto al de la parte aérea (Marschner, 2002).

Una de las respuestas más sensibles en las plantas a la sequía es un incremento del ABA en raíces y parte aérea. Como regla general, la raíz continúa su crecimiento aunque el crecimiento de la parte aérea disminuya, incrementando la relación raíz/parte aérea. La diferencia en la respuesta al déficit hídrico del crecimiento entre la raíz y el follaje no es causada por diferencia en los niveles endógenos de ABA. Los niveles de ABA en las raíces se incrementan en mayor proporción que en la parte aérea en respuesta a las limitaciones de agua (Marschner, 2002).

En suelos secos, aun cuando aumenta la fuerza del suelo, el crecimiento de las raíces es por lo general más activo que el crecimiento de tallos, situación que se refleja en un incremento típico en la relación peso seco de raíz/parte aérea en respuesta al estrés por sequía. En plantas de maíz sin déficit hídrico, la relación del peso seco de raíz/tallo es 1,45, comparada con 5,79 bajo estrés por sequía (Sharp *et al.*, 1988); en árboles de manzana, la sequía prolongada disminuye el peso seco de frutos y tallos en 21% y 26%, respectivamente, pero no afecta el peso seco de raíces (Buwalda y Lenz, 1992).

Un ajuste osmótico más rápido de las raíces, comparado con el de la parte aérea, pudo estar implicado (Schildwacht,

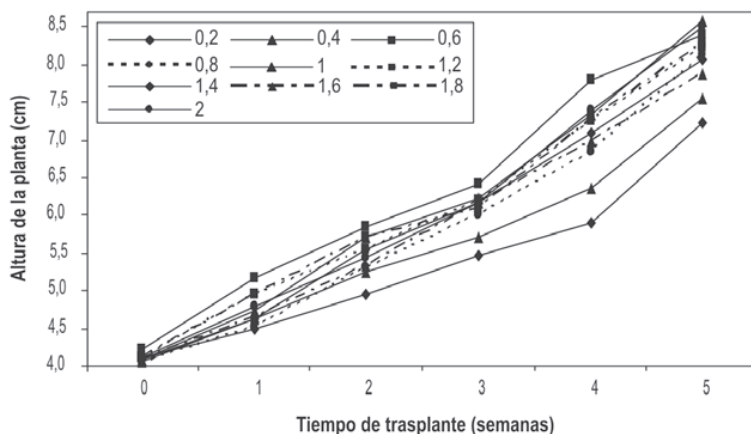


FIGURA 2. Curva de crecimiento de plantas de tomate bajo diferentes láminas de riego en pretrasplante.

1988); sin embargo, suelos secos inhiben la tasa de elongación de células sin una disminución medible en el potencial osmótico de las hojas (Saab y Sharp, 1989). En concordancia, en estudios con genotipos de *Z. mays*, la relación raíz/parte aérea fue más amplia bajo déficit hídrico (Camacho y Caraballo, 1994).

Parra *et al.* (1999) encontraron que el volumen de las raíces y el peso seco de tallo y raíz en zarzamora disminuyeron con la suspensión del riego, mientras que la relación raíz/tallo no fue afectada, lo que indica que el déficit hídrico redujo en proporciones similares la biomasa del tallo y raíz. Tales cambios sólo fueron estadísticamente significativos para volumen de raíces ($P < 0,01$), pero no para peso seco de tallo y raíz. En el comienzo de la estación de crecimiento la relación de brotes/raíz fue más baja en ambas condiciones de sequía; sin embargo, estas relaciones decrecieron a medida que transcurrió el tiempo.

La acumulación de fitomasa seca en hojas presentó diferencias significativas entre la lámina de C=1,4 y las láminas restantes. A nivel de tallo y raíz no se reportaron diferencias estadísticas. Se destaca el mayor porcentaje de acumulación de fitomasa seca en tallo y raíz con la lámina C=0,6; esta misma lámina presenta la menor acumulación de fitomasa seca a nivel de hoja. Se observa que algunas de las láminas menores acumularon más fitomasa seca en las raíces (figura 3).

En promedio, 25% a 50% de los fotosintatos producidos por día en el follaje son dirigidos a la raíz para su crecimiento, mantenimiento y otras funciones, como la asimilación de nutrientes. La mitad de los carbohidratos son usados en la respiración (Marschner, 2002). No obstante, sí se puede determinar que la mayor acumulación de fitomasa seca en raíces es un fenómeno que refleja la capacidad de la planta para adaptarse a medios con escasa humedad y que mayores aportes de agua se convierten en mayor desarrollo de la

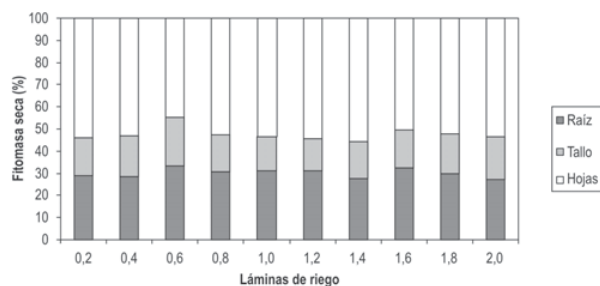


FIGURA 3. Distribución de la fitomasa seca en plantas de tomate bajo diferentes láminas de riego en pretrasplante.

parte aérea, aumento de la actividad fotosintética y mayor acumulación de fotoasimilados en tallo y hojas.

Conclusiones

El déficit hídrico pretrasplante no induce el crecimiento radicular, sino que, por el contrario, disminuye la elongación de las raíces, el área foliar y la altura de las plantas.

Las láminas de riego más bajas afectaron negativamente el crecimiento y desarrollo de las plántulas de tomate.

La lámina que indujo mayor respuesta en el crecimiento y desarrollo de las plántulas fue la de C=1,6.

El déficit hídrico ocasiona mayor acumulación de fotoasimilados en la raíz, respecto a la parte aérea.

Literatura citada

- Abrecht, D. y P. Carberry. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.* 31, 55-69.
- Ali Abod, S. y S. Sandi. 1983. Effect of restricted watering and its combination with root pruning on root growth capacity, water status and food reserves of *Pinus caribea* var. *hondurensis* seedlings. *Plant Soil* 71,123-120
- Becker, C., G. Mroz y L. Fuller. 1987. The effects of plant moisture stress on red pine (*Pinus resinosa*) seedling growth and establishment. *Can. J. For. Res.* 17, 813-820.
- Bravdo, B., A. Naor, S. Poni, E. Peterlunger, F. Iacono y C. Intrieri. 1997. Effect of water regime on productivity and quality of fruit and wine. *Acta Hort.* 427, 15-26.
- Brown, R., J. Eakes, B. Behe y C. Gilliam. 1992. Moisture stress: an alternative method of height control to B-nine (daminozide). *J. Environ. Hort.* 10, 232-235.
- Burdett, A. 1987. Understanding root growth capacity: theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests. *Can. J. For. Res.* 17, 768-775.
- Buwalda, J. y F. Lenz. 1992. Effects of cropping, nutrition and water supply on accumulation and distribution of biomass and nutrients for apple trees on 'Mg' root systems. *Physiol. Plantarum* 84, 21-28.
- Camacho, R. y D. Caraballo. 1994. Evaluation of morphological characteristics in Venezuelan maize (*Zea mays* L.) genotypes under drought stress. *Sci. Agric. (Piracicaba)* 51, 453-458.
- Casierra-Posada, F. y S. Rodríguez. 2006. Tolerancia de plantas de feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) a la salinidad por NaCl. *Agron. Colomb.* 24 (2), 258-265.
- Clover, G., H. Smith, S. Azam-Ali y K. Jaggard. 1999. The effects of drought on sugar beet growth in isolation and in combination with beet yellow virus infection. *J. Agr. Sci.* 133, 251-261.
- Creelman, R., H. Mason, R. Bensen, J. Boyer y J. Mullet. 1990. Water deficit and abscisic acid cause differential inhibition of shoot

- versus root growth in soybean seedlings. Analysis of growth, sugar accumulation, and gene expression. *Plant Physiol.* 92, 105-214.
- Davies, P. 2004. *Plants hormones*. 1st ed. Kluwer Academic Publishers, USA. 750 p.
- Dry, P., B. Loveys, M. McCarthy y M. Stoll. 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 35, 129-139.
- Faiz, S. y P. Weatherley. 1982. Root contraction in transpiring plants. *New Phytol.* 92, 333-344.
- Fitter, A. 1991. Characteristics and functions of roots systems. pp. 3-25. En: Waisel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). *Plant roots: the hidden half*. Marcel Dekker Inc., Nueva York, Basel.
- Foyer, C. 1988. Feedback inhibition of photosynthesis through source-sink regulation in leaves. *Plant Physiol. Biochem.* 26, 483-492.
- Frensch, J. 1997. Primary responses of root and leaf elongation to water deficits in the atmosphere and soil solution. *J. Expt. Bot.* 48, 985-999.
- Gil R. 2007. Información técnica de trigo y otros cultivos de invierno. Publicación miscelánea N° 107. Campaña 12-16. INTA, Estación experimental agropecuaria Rafaela.
- Gurovich, L. y C. Páez. 2004. Influencia del riego deficitario controlado sobre el desarrollo de las bayas y la composición química de los mostos y vinos. *Ciencia e Investigación Agraria* 31, 175-186.
- Hsiao, T. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 24, 519-570.
- Hsiao, T. y L. Xu. 2000. Sensivity of growth of roots versus leaves to weaterstress: biophysical analisis and relation to water transport. *J. Expt. Bot.* 51, 1595-1616.
- Johnson, W. y R. Davis.. 1973. Sugar beet response to irrigation as measured with growth sensors. *Agron. J.* 65, 789-794.
- Kaufmann, M. 1977. Soil temperature and drought effects on growth of Monterey pine. *Forest. Sci.* 23, 317-325.
- Laborem, G. 1995. Concentración de prolina como indicador del déficit hídrico en tres patrones cítricos. Trabajo de ascenso. Universidad Rómulo Gallegos (Unerg), San Juan de Los Morros (Venezuela). 30 p.
- Latimer, J. y R. Steverson. 1997. Effect of mechanical and moisture-stress conditioning on growth and cuticle composition of broccoli transplants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122, 788-791.
- Macey, D. y J. Arnott. 1986. The effect of moderate moisture and nutrient stress on bud formation and growth of container-grown white spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 16, 949-954.
- Mackay, A. y S. Barber. 1987. Effect of cycling wetting and drying of soil a soil on root hair growth of maize roots. *Plant and Soil* 104, 291-293.
- Marschner, H. 2002. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd ed. Academic Press, Londres. 889 p.
- Martínez-Trinidad, T., J. Vargas-Hernández, A. Muñoz-Orozco y J. López. 2002. Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* 36, 365-376.
- Mohammadian, R., M. Moghadda, V. Rahimian y S. Sadeghian. 2005. Effect of early season drought stress on growth characteristics of sugar beet genotypes. *Turk. J. Agr. For.* 29, 357-368.
- Nomani, H. 1998. Plant water relations and control of cell elongation t low water potentials. *J. Plant Res.* 111, 373-382.
- Parra, R., J. Rodríguez y V. González. 1999. Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. *Terra* 17, 126-130
- Patakas, A., N. Nikolaou, E. Zioziou, K. Radoglou y B. Noitsakis. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Sci.* 163, 361-367.
- Pérez, J., E. García, J. Enríquez, A. Quero, J. Pérez y A. Garay. 2004. Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto 'mulato' (*Brachiaria* híbrido, cv.). *Tec. Pecu. Mex.* 42(3), 447-458.
- Ramírez-Palma, T., I. Hernández-López, R. Cruz-Ortega y S. Sánchez-Nieto. 2005. Efecto del déficit hídrico en la expresión de los transportadores de sacarosa en plantas de jitomate. pp. 1-6. En: *Memorias del XIV Congreso de bioenergética y biomembranas*, 13 a 18 noviembre de 2005, Oaxaca. Sociedad Mexicana de Bioquímica.
- Ribas, F., M. Cabello, M. Moreno, A. Moreno y L. López-Bellido. 2000. Respuesta fisiológica de un cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) a distintas dosis de riego. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 15(3), 196-210.
- Ritchie, G. y J. Dunlap. 1980. Root growth potential: its development and expression in forest tree seedlings. *N. Z. J. For. Sci.* 10, 218-248.
- Rook, D. 1973. Conditioning radiata pine seedlings to transplanting by restricted watering. *N. Z. J. For. Sci.* 3, 54-69.
- Saab, I. y R. Sharp. 1989. Non-hydraulic signals from maize roots in drying soil: inhibition of leaf elongation but not stomatal conductance. *Planta* 179, 406- 474
- Salisbury, F. y C. Ross. 1992. *Plant physiology*. 4th ed. Wadsworth, Belmont. pp. 575-600.
- Schildwacht, G. 1988. Changes in the osmotic potential of the roots as factor in the decrease in the root-shot ratio of *Zea mays* plants under water stress. *Plant and Soil* 111(2), 271-275.
- Sharp, R.E., W.K. Silk y T.C. Hsiao. 1988. Growth of the maize primary root at low water potentials. I. Spatial distribution of expansive growth. *Plant Physiol* 87, 50-57.
- Smekens, S. 1998. Sugar regulation of gene expression in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 1, 230-234.
- Stasovski, E. y C. Peterson. 1991. The effects of drought and subsequent rehydration on the structure and vitality of *Zea mays* seedlings roots. *Can. J. Bot.* 69, 1170-1178.

- Steudle, E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *J. Expt. Bot.* 51(350), 1531-1542.
- Tinus, R. 1996. Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiol.* 795-799.
- Van Iersel, M. y K. Nemali. 2004. Drought stress can produce small but not compact marigolds. *HortScience* 36 (6), 1298-1301.
- Vianello, I. y M. Sobrado. 1991. Respuestas contrastantes del maíz tropical ante la sequía en el período vegetativo o reproductivo. *Turrialba* 41, 403-411.
- Villar-Salvador, P., L. Ocaña, J. Peñuelas e I. Carrasco. 1999. Effect of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. *Ann. For. Sci.* 56, 459-465.
- Villar-Salvador, P., L. Ocaña, J. Peñuela, I. Carrasco, S. Domínguez e I. Renilla. 1997. Relaciones hídricas y potencial de formación de raíces en plántulas de *Pinus halepensis* Mill. sometidas a diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 4, 81-92.
- Wagner, M., G. Laborem, G. Medina y L. Rangel. 1998. Efecto del patrón y la frecuencia de riego sobre el nivel foliar de prolina en el naranjo 'Valencia'. *Bioagro* 10, 76-79.
- Yang, C. y W. Hsiang. 1992. Growth and reproduction of maize (*Zea mays* L. cv. Tainung n° 1) response to soil water deficits. I. Changes of growth when stress and recovery occurring at the vegetative stage in the controlled environment. *J. Agr. Res. China* 41, 132-139.