

Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soya (*Glycine max* (L.) Merr.) inoculada con *Bradyrhizobium japonicum*

Hunaiber García¹ y María Ferrarotto^{2*}

¹Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Apdo. 4653. Maracay 2101. Aragua. Venezuela.

²Instituto de Botánica Agrícola. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101. Aragua. Venezuela.

RESUMEN

El déficit hídrico es una condición limitante para el desarrollo de la soya (*Glycine max* (L.) Merr.) y la inoculación con *Rhizobium* es una práctica común para incrementar su rendimiento. Por tal motivo se estudió el efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno foliar en plantas de soya en estadios vegetativos y el contenido de nitrógeno y biomasa en la semilla en estadios reproductivos, a los fines de determinar si la inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* representa una práctica que contrarresta el efecto del déficit hídrico a nivel del sistema radical, y el contenido de nitrógeno y biomasa en las semillas. De un total de 112 plantas del cv FP90-6103 establecidas en condiciones controladas, se inocularon 56 al momento de la siembra. A los 70 días después de la siembra (dds), al inicio del llenado de vainas, se sometieron a déficit hídrico 28 plantas inoculadas y 28 no inoculadas. Esto generó cuatro tratamientos: (T0) sin déficit hídrico e inoculado, (T1) sin déficit hídrico no inoculado, (T2) con déficit hídrico e inoculado y (T3) con déficit hídrico no inoculado a partir de 70 dds. En estadios vegetativos, la inoculación favoreció la acumulación de biomasa total por planta, y el área foliar hasta 23 dds de la siembra, sin embargo, no contribuyó con la disminución de los efectos negativos del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa en estadios reproductivos, el contenido de nitrógeno en hojas y la longitud del sistema radical. En los tratamientos sin déficit hídrico, las plantas en T1 presentaron una reducción de 23% en la biomasa de las semillas (9,86 g), en comparación con plantas en T0 (12,76 g), encontrándose que bajo condiciones de riego, la inoculación favoreció la acumulación de biomasa en semillas. En R7, las plantas sin déficit hídrico (T0 y T1) mostraron menor contenido de nitrógeno en las hojas, independientemente de la inoculación. A los 96 dds, la superficie radical en plantas inoculadas y sin déficit hídrico (24,38 m²), difirió de la de plantas no inoculadas sometidas a déficit hídrico (21,05m²). El déficit hídrico produjo un incremento en la longitud del sistema radical de las plantas, sin embargo, las raíces presentaron menor superficie.

Palabras clave: biomasa, *Bradyrhizobium japonicum*, déficit hídrico, *Glycine max*.

Water deficit effect on biomass and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) inoculated with *Bradyrhizobium japonicum*

ABSTRACT

Water deficit is a limiting factor for the development of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and *Rhizobium* inoculation is a common practice to improve soybean yield. Therefore, it was studied the effect of water deficit on biomass accumulation and leaf nitrogen in soybean plants in vegetative and reproductive stages, to determine whether inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* is a practice that counteracts the effect of water deficit at the level of the root system, nitrogen content and biomass of seeds. From a batch of 112 plants of soybean cv. FP90-6103 grown under controlled conditions, 56 plants were

*Autor de correspondencia: María Ferrarotto

E-mail: ferrarottom@agr.ucv.ve

Recibido: mayo 01, 2009

Aceptado: junio 18, 2009

inoculated. At the sowing moment and 70 days after sowing (das), 28 inoculated and 28 non-inoculated plants were induced water deficit. This led to the implementation of four treatments: inoculated without water deficit (T0), not inoculated without water deficit (T1), inoculated with water deficit (T2) and not inoculated with water deficit (T3). Under vegetative stages, inoculation enhanced the accumulation of total biomass per plant and leaf area until 23 d after sowing; however, it did not contribute to the decrease of the negative effects of water deficit on biomass accumulation on reproductive stages, nitrogen content in leaves and length of the root system. Moreover, water deficit affected the accumulation of biomass in seed nitrogen content leaves and surface of the root system. Water deficit affected seed biomass, leaf nitrogen content, and root system surface. T1 showed a 23% reduction in seed biomass (9.86 g), regarding plants in T0 (12.76 g), indicating that under water supply, inoculation promoted biomass accumulation in seeds. In R7, plants under water deficit (T0 y T1) showed less nitrogen content in leaves, independently from inoculation. At 96 das, root surface of inoculated plants without water deficit (24.38 m²), differed from not inoculated plants with water deficit (21.05 m²). Plants under water deficit showed a longer root system, but had less root surface.

Key words: biomass, *Bradyrhizobium japonicum*, *Glycine max*, water deficit.

INTRODUCCIÓN

En países productores de soya (*Glycine max*. (L.) Merr.) como Estados Unidos y Argentina, el déficit hídrico ha sido reconocido como un factor que reduce los rendimientos (Toresani *et al.*, 2007). En Venezuela, Solórzano (2000) señala al sector maicero de los llanos occidentales, como una zona de gran potencial para la producción de soya, con un régimen de lluvias estacional distribuidas en 180 días al año, siendo ésta la principal fuente de agua para la mayor parte de los cultivos.

El cultivo de soya, en lo que respecta a sus requerimientos hídricos, presenta dos períodos críticos bien definidos, el primero entre la siembra y la emergencia y el segundo durante el llenado de las vainas (Farías, 1995). Este último período generalmente coincide con los meses de sequía (febrero-marzo), donde en las zonas mencionadas ya se han agotado las reservas de agua en el suelo, o la poca humedad que existe no está disponible para las plantas.

El déficit hídrico afecta el crecimiento de la soya y la formación temprana de la vaina, causando reducciones significativas del número y peso de las semillas y hace más temprana la maduración de las vainas (Sionit y Kramer, 1977), lo cual disminuye el rendimiento del grano por unidad de superficie hasta en 50%. Además, el área foliar se reduce y la biomasa en la semilla disminuye a consecuencia de bajas tasas fotosintéticas, reducción en la suplencia de asimilados e inhibición del metabolismo de la semilla (Westgate *et al.*, 1989), siendo más sensibles al déficit hídrico las vainas situadas en ramas que las del tallo principal (Doss *et al.*, 1974).

La soya es altamente sensible al déficit hídrico, con umbral crítico de desarrollo durante el llenado de la semilla, por lo que cuando el agua del suelo disminuye por debajo de 60%, se compromete la fijación de nitrógeno la cual debe

ser maximizada en esta etapa, disminuyendo el rendimiento potencial (González, 2006). Masyhudi y Patterson (1991) concluyen que cuando el déficit hídrico ocurre durante el estadio de crecimiento vegetativo y reproductivo, el rendimiento del grano se reduce, debido a la alta sensibilidad de la fijación de nitrógeno al suministro limitado de agua.

Cabe destacar que la fijación biológica de nitrógeno y la práctica de inoculación de semillas con productos de alta calidad comercial permiten aumentar los rendimientos hasta en 60% (Toresani *et al.*, 2007). No obstante, la evaluación cuantitativa de absorción de nitrógeno por la planta no es sencilla, debido a que varía con la especie vegetal, profundidad y distribución de las raíces, tipo y cantidad de fertilizante aplicado, cantidad relativa y distribución de formas orgánicas e inorgánicas de nitrógeno en el perfil del suelo, además de los factores climáticos. Respecto a la evaluación cuantitativa de compuestos nitrogenados formados a partir de la fijación de N₂, se ha encontrado que pueden ser transportados hacia el vástago de la planta como amidas o ureidos (Todd *et al.*, 2006). La acumulación de ureidos está relacionada con la respuesta del cultivar de soya a la fijación de nitrógeno y su sensibilidad al déficit hídrico, así como a la dependencia del manganeso de la ruta de degradación (Valdez y Sinclair, 2001).

Bajo condiciones de déficit hídrico, las raíces de algunos genotipos de soya pueden exhibir diversidad genética en el desarrollo de plasticidad, mostrando cambios en la superficie absorbente de agua que se presentan como un incremento en la profundidad y proliferación de raíces laterales (Yong *et al.*, 2008). Por lo antes expuesto, la presente investigación tuvo como objetivo estudiar el efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno foliar en plantas de soya del cultivar FP90-6103 en estadios vegetativos, y determinar si la inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* representa una práctica que contrarresta el efecto negativo del déficit hídrico asociado a respuestas expresadas

a nivel del sistema radical, contenido de nitrógeno y biomasa en semillas en estadios reproductivos

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el invernadero de docencia de la Cátedra de Fisiología Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, ubicada en Maracay estado Aragua, y en el Laboratorio Auxiliar de Docencia de Fisiología Vegetal de la misma institución. Los valores de las variables climáticas registradas fueron: Radiación solar ($171,98 \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), temperatura máxima y mínima ($43,1$ y $20,3^{\circ}\text{C}$; respectivamente) y humedad relativa ($61,4\%$ HR). Estos se determinaron *in situ* con un piranómetro de cúpula marca Weathertronic[®] y un higrómetrografo de la misma marca comercial, cada uno con bandas de registro semanal.

Se utilizaron semillas de soya, cultivar FP90-6103, cuyas características se muestran en el Cuadro 1. Las plántulas se sembraron directamente en un volumen de 12 kg de suelo franco-arcilloso contenido en bolsas plásticas negras, proveniente de la Hacienda Tierra Nueva, ubicada en el kilómetro 50 de la carretera El Sombrero-Chaguaramas, municipio Urdaneta, estado Aragua y clasificado como un *Typic Haplusterts*, finas, mixta, isohipertérmica, de textura franco arcillosa, con $0,012\%$ de N, $2,13\%$ materia orgánica, 28 ppm P y pH de $5,61$.

Se sembraron 140 semillas sobre un substrato de arena esterilizada, las cuales se introdujeron en una cámara de germinación con ambiente controlado a 25°C y 65% de HR. A las 72 h luego de la siembra se procedió al transplante, seleccionando un material morfológicamente homogéneo de 112 plántulas en total. Al momento del transplante se realizó

Cuadro 1. Características agronómicas de plantas de soya (cv. FP90-6103).

Característica	Valor
Ciclo de la planta (d)	120
Altura de la planta (m)	0,82
Altura de la 1 ^{ra} vaina (m)	0,14
Floración (dds) ¹	43
Color de la flor	Blanco
Hábito de crecimiento	Determinado
Peso de 100 semillas (g)	16
Rendimiento (kg/ha)	
Experimental	3 855
Comercial	2 800

¹Días después de la siembra
Fuente: DANAC (2006).

la inoculación, impregnando las radículas con la solución inoculante.

Las cepas de *B. japonicum* fueron SEMIA 587 y SEMIA 5919, a una dosis de 250 g por 100 kg de semilla. La solución se preparó a razón de 50 mL de inóculo comercial y 5 g azúcar por litro de agua destilada. A las 24 h se procedió a repetir la inoculación de las plantas con la misma solución, y 5 d después del transplante se realizó una fertilización básica con abono foliar (18-18-18/3+ micronutrientes) aplicando $0,25 \text{ g}$ a la superficie del suelo en cada bolsa.

Los criterios para identificar los estadios de muestreo se basaron en el crecimiento exponencial de las plantas durante la fase vegetativa y en la estabilización de ésta al inicio de la floración, utilizando el sistema de Fehr y Caviness (1977, 1988). El estadio R1 fue definido como el estadio reproductivo caracterizado por presencia de una flor abierta en cualquiera de los nudos del tallo principal. La humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo (CC) desde la siembra, aplicando a cada unidad experimental un volumen de agua conocido (500 mL) cada 2 d hasta 70 dds (R5: semilla de 3 mm de largo en una vaina en cualquiera de los cuatro nudos del tallo principal con una hoja completamente desarrollada), momento en el cual se aplicó el déficit hídrico. Para determinar el volumen de agua requerido para llevar el suelo a capacidad de campo, previamente se tomaron 10 bolsas al azar y se regó el suelo hasta saturarlo. Durante una semana, a intervalos de 48 h se tomaron muestras de suelo de las bolsas para obtener valores promedio de humedad por el método gravimétrico y determinar el contenido de humedad al momento del inicio del déficit hídrico. A nivel de la planta, el indicativo del déficit hídrico fue la falta de turgor en el vástago, momento en el cual se determinó el contenido de humedad en el suelo con un registro de $21,56\%$ (-21 kPa).

Este contenido de humedad se mantuvo hasta los 96 dds (R7: una vaina en el tallo principal que ha alcanzado su color típico de vaina madura), generando el déficit hídrico en los tratamientos correspondientes. De este modo, el déficit hídrico consistió en reducir en 60% el volumen de agua aplicada para llevar al suelo a CC (Brevedan y Egli, 2003), condición que ocurrió 48 h luego de haberlo saturado. Para la determinación de biomasa en cada muestreo, los órganos vegetativos fueron separados y llevados a estufa a 70°C por 48 h. La determinación del área foliar en cada muestreo, se realizó con un medidor de área foliar de banda transportadora, mientras la longitud y superficie del sistema radical se registraron mediante el método de Tennant (1975).

No se realizó suplencia externa de nitrógeno y al momento de cada muestreo, el contenido de nitrógeno (en

forma de amonio) se determinó por el método de Kjeldahl (AOAC, 1980) en hojas y semillas tomadas de los tres primeros nudos superiores de la planta.

Diseño del experimento

El ensayo se realizó distribuyendo 112 unidades experimentales (correspondiendo cada una a una planta por bolsa), bajo un diseño completamente al azar, con un arreglo de tratamientos factorial 2 x 2 con dos niveles para el factor inoculación y dos niveles para suministro de agua. Desde el inicio de la investigación, las 112 plantas se dividieron en cuatro grupos de 28 plantas cada uno, dos de los cuales fueron inoculados.

Durante los estadios vegetativos se evaluó la acumulación de biomasa, área foliar, nitrógeno foliar, longitud y superficie del sistema radical de las plantas en respuesta a la inoculación. La respuesta al déficit hídrico se evaluó en estadios reproductivos, para lo cual se sometió a condiciones de déficit hídrico un grupo de 28 plantas inoculadas y 28 plantas no inoculadas en R₅ y R₇, en un período considerado de alta susceptibilidad de las plantas a esta condición (Farías, 1995).

Lo anterior generó cuatro tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3). Se consideraron cuatro estadios vegetativos (V) definidos a los 15 (V2), 23 (V4), 30 (V6) y 35 dds (V8); así como tres estadios reproductivos (R) a los 41 (R1), 70 (R5) y 96 (R7) dds.

Después de la verificación del cumplimiento de los supuestos, se aplicó el análisis de la varianza para cada variable estudiada. Las comparaciones de media se hicieron por pruebas de Tukey, usando para ello el programa Statistix versión 7.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acumulación de biomasa

Los resultados del Cuadro 2 muestran que en estadios vegetativos no existieron diferencias significativas en la biomasa de hojas. En el peso seco de raíces se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre plantas inoculadas y no inoculadas sólo en V2. Esto posiblemente fue debido a que la inoculación pareció retardar el crecimiento de la raíz durante la fase de emergencia y establecimiento de las plántulas hasta cuando las plantas presentaron una hoja trifoliolada completamente desarrollada en el nudo por encima del nudo unifoliolado. Así mismo, un incremento de 93,5 cm² en el área foliar se evidenció en V4, estadio en el cual las plantas presentaron más de tres nudos en el tallo principal; sin embargo, en estadios posteriores no se observaron diferencias en esta variable debidas a la inoculación.

Cuadro 2. Acumulación de biomasa (g) en raíces, tallos, hojas y área foliar (cm²) de plantas de soya inoculadas y no inoculadas con *B. japonicum* en cuatro estadios vegetativos (V).

Tratamiento		Estadio ¹			
		V2	V4	V6	V8
Raíz	Inoculada	0,03b	0,23a	0,43	0,76a
	No inoculada	0,19a	0,19a	0,50	0,52a
Tallo	Inoculadas	0,09a	0,32a	0,48	1,09a
	No inoculadas	0,06a	0,21b	0,55	0,66b
Hojas	Inoculadas	0,14a	0,47a	1,58	2,74a
	No inoculadas	0,17a	0,50a	1,67	2,09a
Área foliar	Inoculadas	41,79a	237,90a	76,77	752,11a
	No inoculadas	40,60a	144,31b	17,57	697,37a

¹Estadios vegetativos evaluados a los 15 (V2), 23 (V4), 30 (V6) y 35 (V8) dds. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en las semillas

Tal como se muestra en el Cuadro 3, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos en la acumulación de biomasa en las semillas al momento de inicio del déficit hídrico, las cuales podrían ser atribuidas a la inoculación. En este sentido 3,48 g fue el mayor valor de peso seco de semillas en T0, seguido de T1 con 3,38 g, y los menores valores en T2 y T3 con 3,05 y 3,03 g, respectivamente.

Al final del déficit hídrico, los mayores valores ($p < 0,05$) de biomasa en semillas se presentaron en plantas de T0 y T1 con 12,76 y 9,86 g; respectivamente. En los tratamientos sin déficit hídrico, las plantas no inoculadas (T1) presentaron una reducción de 23% en la biomasa de las semillas en comparación con las plantas inoculadas (T0), encontrándose

Cuadro 3. Acumulación de biomasa y nitrógeno en semillas de plantas de soya inoculadas y no inoculadas con *B. japonicum* en dos estadios reproductivos (R).

Tratamiento ¹	Estadio ²			
	R5		R7	
	Peso seco (g)	N (%)	Peso seco (g)	N (%)
T0	3,48a	5,31	12,76a	6,69a
T1	3,38b	5,25	9,86b	5,97a
T2	3,05c	5,54	7,58d	5,27b
T3	3,03c	5,25	7,92c	5,65ab

¹Tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3).

²Estadios reproductivo identificados como R5 (semilla de 3 mm de largo en una vaina en cualquiera de los cuatro nudos del tallo principal con una hoja completamente desarrollada) y R7 (una vaina en el tallo principal que ha alcanzado su color típico de vaina madura).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

que bajo condiciones de riego, la inoculación favoreció la acumulación de biomasa en semillas.

Una reducción de 40% en la biomasa de semillas se presentó en T2 (7,58 g) y T3 (7,92 g), lo que indica que el déficit hídrico afectó la acumulación de materia seca en las semillas, independientemente de la inoculación (Cuadro 3). Resultados similares fueron reportados por Vieira *et al.* (1992) y Kisman y Sudarmawan (2002).

La inoculación no contribuyó con la disminución de los efectos negativos del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa en las semillas, lo cual se evidenció en la disminución de ésta independientemente de la inoculación. Así mismo, la inoculación tampoco pareció tener efecto sobre el contenido de nitrógeno en hojas, aunque sí la suplencia de agua (Cuadro 3).

Los resultados indican que el suministro de agua es fundamental para una óptima acumulación de biomasa en las semillas de soya y que la absorción de nitrógeno por las raíces y la actividad eficiente de las bacterias fijadoras de nitrógeno, posiblemente sean afectadas por el déficit hídrico, entre otros factores.

El contenido inicial de nitrógeno, al momento de inicio del período de déficit hídrico (R5), no difirió entre plantas inoculadas y no inoculadas, con valores de 5,31% en T0 (Cuadro 3). En R7 no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre plantas inoculadas y no inoculadas en ausencia de déficit hídrico. Un menor contenido de nitrógeno en semillas se obtuvo en plantas sometidas a déficit hídrico en comparación con las irrigadas. El menor valor relativo de nitrógeno en semillas se obtuvo en plantas inoculadas y sometidas a déficit hídrico (5,27%).

En este sentido, Patterson y Hudak (1996) atribuyeron la mayor asimilación de nitrógeno y rendimiento en biomasa de semillas de un cultivar de soya a su favorable balance hídrico interno, mayor tasa fotosintética en condiciones de óptima suplencia de agua y actividad de nódulos.

Cuando se comparó el contenido de nitrógeno en las semillas de los distintos tratamientos se pudo observar que éste fue directamente proporcional a la acumulación de biomasa contenida en la misma, correspondiendo con lo señalado por Fehr y Caviness (1977, 1988).

Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de nitrógeno en hojas

El Cuadro 4 muestra que el contenido de nitrógeno total en hojas fue mayor en V2 en plantas inoculadas (T0 y T2), que en las no inoculadas (T1 y T3), existiendo diferencias significativas entre ellos, independientemente del

Cuadro 4. Acumulación de nitrógeno (%) en hojas de plantas de soya inoculadas y no inoculadas con *B. japonicum* en dos estadios vegetativos (V) y dos estadios reproductivos (R).

Tratamiento ¹	Estadio ²			
	V2	V6	R1	R5
T0	5,75a	5,43	4,73	3,19ab
T1	5,45b	4,98	4,84	3,00b
T2	5,72a	5,36	4,76	3,57a
T3	5,44b	5,88	4,81	2,98b

¹Tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3).

²Estadios vegetativos evaluados a los 15 (V2) y 30 (V6) dds

Estadios reproductivos identificados como R1 (presencia de una flor abierta en cualquiera de los nudos del tallo principal) y R5 (semilla de 3 mm de largo en una vaina en cualquiera de los cuatro nudos del tallo principal con una hoja completamente desarrollada)

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

suministro de agua. Estos resultados coinciden con los encontrados por Hunt *et al.* (1981), quienes indican que hojas de plantas inoculadas acumulan mayor contenido de nitrógeno por gramo de biomasa que las hojas de plantas no inoculadas. Esta respuesta cambió en V6, estadio vegetativo en el cual no existieron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de nitrógeno total en hojas debidas a la inoculación o al déficit hídrico.

Respecto, a la relación entre el contenido de nitrógeno en hojas y la sensibilidad de las plantas de soya al déficit hídrico, se ha encontrado que está asociado a la ruta de degradación del nitrógeno y las enzimas involucradas (Valdez y Sinclair, 2001), las cuales pueden variar con la edad de la planta y la demanda en los diferentes órganos.

Tal como se observa en el Cuadro 4, en el estadio reproductivo R7 las plantas sin déficit hídrico (T0 y T1), fueron las que mostraron menores valores de nitrógeno en las hojas, independientemente de la inoculación ($p < 0,05$), en comparación con el contenido de nitrógeno acumulado en hojas de plantas inoculadas y no inoculadas sometidas a déficit hídrico (T2 y T3), respectivamente. Esta respuesta coincide con lo señalado por Sall y Sinclair (1991) y Hunt *et al.* (1981), quienes lo atribuyen al efecto del suministro de agua para el desarrollo de raíces y del rizobium.

Por otra parte, el contenido de nitrógeno total en hojas, disminuyó con la edad, tanto en estadios vegetativos (V₂ hasta V6) como en los reproductivos (R1 hasta R5), independientemente de la inoculación. Esto posiblemente fue debido a que siendo el nitrógeno un elemento muy móvil y constituyente de aminoácidos, enzimas y ácidos nucleicos, pudo ser exportado hacia las vainas y posteriormente a las semillas.

Cuadro 5. Longitud total promedio (m) del sistema radical por planta en tres estadios vegetativos (V) con y sin inoculación con *B. japonicum*, y en un estadio reproductivo (R1).

Tratamiento ¹	Estadio ²			
	V2	V4	V6	R1
T0	2,47	3,56 ^a	4,56 ^a	11,24
T1	4,39	1,93 ^b	6,82 ^b	14,59
T2	1,99	3,05 ^a	4,26 ^a	14,43
T3	2,86	2,25 ^b	6,78 ^b	14,68

¹Tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3).

²Estadios vegetativos evaluados a los 15 (V2), 23 (V4) y 30 (V6) dds

Estadio reproductivo identificado como R1 (presencia de una flor abierta en cualquiera de los nudos del tallo principal)

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Longitud y superficie del sistema radical

El Cuadro 5 muestra que durante los estadios vegetativos sólo se observaron diferencias estadísticamente significativas en la longitud del sistema radical asociadas a la inoculación en V4 y V6, siendo de menor longitud las raíces de plantas inoculadas. Estos resultados coinciden con los mostrados por plantas de *Pisum sativum* inoculadas con *Rhizobium leguminosarum* (RC 1040), las cuales mostraron un acortamiento del sistema radical en respuesta a la inoculación (Deaene-Drummond y Chaffey, 1985).

Para el estadio R1, no se encontraron diferencias significativas en la longitud radical de las plantas debidas a la inoculación (Cuadros 5).

En R7 después de la aplicación del déficit hídrico, los resultados presentados en el Cuadro 6, revelan que la longitud del sistema radical de plantas inoculadas y no inoculadas mostró diferencias estadísticamente significativas asociadas al déficit hídrico. Bajo condiciones de déficit hídrico, el sistema radical de plantas inoculadas fue más

Cuadro 6. Acumulación de nitrógeno en hojas y características del sistema radical (longitud y superficie radical) de plantas de soya inoculadas y no inoculadas con *B. japonicum* a los 96 dds (R7).

Variable	Tratamiento ¹			
	T0	T1	T2	T3
Nitrógeno acumulado (%)	1,53bc	1,41c	1,73a	1,59a
Sistema radical/planta				
Longitud total (m)	18,53ab	17,63bc	16,41c	19,15a
Superficie total (m ²)	24,38a	21,05b	13,99c	12,76d

¹Tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

corto que el de las no inoculadas, con valores de 16,41 y 19,15 m en T2 y T3.

En tal sentido, la ausencia de diferencias significativas en la longitud del sistema radical de plantas inoculadas y no inoculadas en ausencia de déficit hídrico sugiere que el acortamiento de las raíces ocurrió en respuesta a la inoculación, y se manifestó aún más en condiciones de déficit hídrico. Del mismo modo, Benjamin y Nielsen (2006) indican que el déficit hídrico no afectó la distribución de raíces de 97% de plantas de soya.

Con respecto a la superficie radical (Cuadro 7), en R7, los valores determinados en plantas inoculadas y sin déficit hídrico (24,38 m²) difirieron estadísticamente ($p < 0,05$) de los de plantas no inoculadas sometidas a déficit hídrico (21,05 m²).

En comparación con las anteriores, las plantas sometidas a déficit hídrico presentaron menor superficie radical (13,99 m²) que las no sometidas a déficit hídrico (12,76 m²), difiriendo estadísticamente entre ellas debido a la inoculación y observándose la misma tendencia en los

Cuadro 7. Superficie radical total promedio por planta (m²) en estadios vegetativos (V) con y sin inoculación con *B. japonicum*, y en estadios reproductivos (R), antes y después del período de déficit hídrico.

Tratamiento ¹	Estadio ²			
	V2	V4	V6	R7
T0	0,42	4,26a	5,72a	15,69
T1	0,80	3,39b	8,78b	20,36
T2	0,43	4,45a	5,67a	19,04
T3	0,54	3,76b	9,23b	19,67

¹Tratamientos: sin déficit hídrico e inoculadas (T0), sin déficit hídrico no inoculadas (T1), con déficit hídrico e inoculadas (T2) y con déficit hídrico no inoculadas (T3).

²Estadios vegetativos evaluados a los 15 (V2), 23 (V4) y 30 (V6) dds

Estadio reproductivo identificado como R1 (presencia de una flor abierta en cualquiera de los nudos del tallo principal)

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

resultados obtenidos para longitud del sistema radical. Las diferencias estadísticas entre tratamientos, permiten afirmar que la superficie radical de las plantas estudiadas fue afectada tanto por la inoculación como por condiciones de déficit hídrico.

CONCLUSIONES

El cultivar de soya FP90-6103 requiere de la aplicación de riego suplementario en el período de llenado de las vainas, ya que una restricción del 60% del agua requerida en este período afectó significativamente la

acumulación de biomasa y el contenido de nitrógeno, lo cual indica que este período es crítico para este cultivar. Hubo un efecto claro de la inoculación en los estadios vegetativos V4 y V8, los cuales parecen ser momentos claves para evaluar la respuesta de plantas inoculadas, ya que mostraron mayor acumulación de biomasa en órganos vegetativos y mayor área foliar que en el resto de los estadios en comparación con las plantas no inoculadas. Sin embargo, en el período de llenado de vainas, la inoculación pareció incrementar la susceptibilidad de plantas de soja a condiciones de déficit hídrico. El déficit hídrico produjo un incremento en la longitud del sistema radical de las plantas, sin embargo, las raíces presentaron menor superficie.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de Universidad Central de Venezuela (Proyecto N° 01.184.2001), por el aporte económico y los recursos necesarios para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemist. 13 Ed. Washington, EUA.
- Benjamin, J.G.; D.C. Nielsen. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Res.* 97: 248-253.
- Brevedan, R.E.; D.B. Egli. 2003. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Sci.* 43: 1897-1898.
- DANAC. 2006. Día de campo en semilla de soja variedad SP-90-6103. Fundación para la Investigación Agrícola. La Revista N°484.
- Deaene-Drummond, C.E.; N.J. Chaffey. 1985. Characteristics of nitrate uptake into seedlings of pea (*Pisum sativum* L. cv. Feltham First). Changes in net NO_3^- uptake following inoculation with *Rhizobium* and growth in low nitrate concentrations. *Plant Cell Environ.* 8: 517-523.
- Doss, D.B.; R.W. Pearson; H.T. Rogers. 1974. Effect of soil water stress at various growth stages in soybean yield. *Agro. J.* 66: 297-299.
- Farias, J.R.B. 1995. Requisitos Climáticos. In: FAO (Ed). El Cultivo de la Soja en los Trópicos. Mejoramiento y Producción. Serie Producción y Protección Vegetal. FAO. Roma, Italia. N° 27. pp. 13 -17.
- Fehr, W.R.; C.E. Caviness. 1977. Stage of soybean development. Cooperative Extension Service. Agriculture and Home Economics Experiment Station. CODEN:IWSRBC 80: 1-12.
- Fehr, W.R.; C.E. Caviness. 1988. How a soybean develops. Cooperative Extension Service. Special Report N° 53. Iowa State University, Ames. EUA.
- González, N. 2006. Fijación de nitrógeno en soja. Taller de Fijación Biológica de Nitrógeno. 3° Congreso de Soja del MERCOSUR. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. Argentina.
- Hunt, P.G.; A.G. Wollum; T.A. Matheny. 1981. Effects of soil water on *Rhizobium japonicum* infection, nitrogen accumulation, and yield in Bragg soybeans. *Agron. J.* 73: 501-505.
- Kisman, M.; A.A. Sudarmawan. 2002. Effects of genotype, environment and their interactions on yield and yield components of soybean in South Lombok. *Agroteksos.* 12: 1-10.
- Masyhudi, M.F.; P. Patterson. 1991. The effect of water stress on nitrogen absorption of soybean. *Indonesian J. Crop Sci.* 6: 43-63.
- Patterson, R.P.; C.M. Hudak. 1996. Drought avoidant soybean germplasm maintains nitrogen fixation capacity under water stress. *Plant Soil.* 186: 39-43.
- Sall, K.; T.R. Sinclair. 1991. Soybean genotypic differences in sensitivity of symbiotic nitrogen fixation to soil dehydration. *Plant Soil.* 133: 31-37.
- Sionit, N.; P. J. Kramer. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* 69: 274-278.
- Solórzano, P.R. 1986. Efecto del riego sobre los rendimientos del sorgo granífero y la soja como segundo cultivo en los llanos occidentales. *Agronomía SVIA* 5-6: 4-10.
- Solórzano, P.R. 2000. Fertilización en ajonjolí y soja. I° Curso sobre Producción de Ajonjolí y Soja. ASOPORTUGUESA, UCLA, FONAIAP. Guanare, Venezuela. pp. 46-48.
- Tennant, D. 1975. Tests of a modified line intercept method estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1001.
- Todd, C.D.; P.A. Tipton; D.G. Blevins; P. Piedras; M. Pineda; J. C. Polacco. 2006. Update on ureide degradation in legumes. *J. Exp. Bot.* 57: 5-12.
- Toresani, S.; M. Bodrero; J.M. Enrico. 2007. Comportamiento de inoculantes para soja en la zona sur de la provincia de Santa Fe. *Rev. Inv. Fac. Cien. Agr.* 11: 1-7.
- Vadez, V.; T.R. Sinclair. 2001. Leaf ureide degradation and N_2 fixation tolerance to water deficit in soybean. *J. Exp. Bot.* 52: 153-159.
- Vieira, R.D.; D.M. Tekrony; D.B. Egli. 1992. Effect of drought and defoliation stress in the field of soybean seed germination and vigor. *Crop Sci.* 32: 471-475.
- Westgate, M.E.; J.R. Schussler; D.C. Reicosky; M.L. Brenner. 1989. Effect of water deficits on seed development in soybean. II. Conservation of seed growth rate. *Plant Physiol.* 91: 980-985.
- Yong, H.; J.S. Gamett; W.E. McClain; M.E. LeNoble; F.B. Fritsche; D.A. Sleper; J.G. Shannon; H.T. Nguyen; R.E. Sharp. 2008. Plasticity of soybean root system development under water deficits. Joint Annual Meeting Celebrating the international year of planet earth. GSA, SSSA, ASA, CSSA, GCAGS and HGS. Houston, EUA. pp. 637-638.