

CAPACIDAD DE CRECIMIENTO DE *Crotalaria juncea* L. EN CONDICIONES DE DEFICIENCIA DE FÓSFORO

CAPACITY OF GROWTH OF *Crotalaria juncea* L. IN CONDITIONS PHOSPHORUS DEFICIENCY

Giovanna F. Santana M.* y Jocelyne Ascencio*

*Profesoras. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía.
Instituto de Botánica Agrícola. Maracay, Aragua. Venezuela.2101.

Correo electrónico: santanagiovanna@gmail.com; jocelyneascencio@hotmail.com

RESUMEN

Crotalaria juncea L. es un importante cultivo de cobertura en condiciones de suelos marginales, especialmente en los países tropicales, la especie ha sido reportada como una planta con capacidad de crecer en suelos deficientes en P. Con el objetivo de investigar algunas respuestas de crecimiento bajo la deficiencia de P, las plantas se cultivaron en macetas de 900 ml llenas de solución nutritiva de Hoagland 2, con aireación artificial. El experimento se llevó a cabo en diseño completamente al azar, con dos tratamientos de fósforo (+P = 0,86 + mMPy -P = 0,004 mMP) con 48 repeticiones. Las plantas se cosecharon a los 15, 20, 25 y 30 días de edad para determinar la biomasa seca, relación tallo / raíz, área foliar (ÁF) total, longitud de la raíz (total y específica), P inorgánico soluble (hoja), P total (P_{total}), también se determinó la absorción de P (PAE), el índice de distribución de P y el uso eficiente P (PUE). Los resultados, indican una reducción de 61,3% ÁF, 61,74% en la biomasa aérea seca y 50,19% de la biomasa de raíz seca después de la reducción de P_i soluble hoja y P_{total} bajo -P. Por otra parte, a los 20 días de edad de la longitud de la raíz aumentó en -P, y eran más grandes (2,44 veces) en comparación con las plantas +P. En condiciones deficientes de P, las plantas mostraron una alta absorción de P y el uso eficiente de los P. Estos resultados sugieren que esta especie combina estrategias morfológicas y fisiológicas que contribuyen a la tolerancia por deficiencia de P.

Palabras Clave: *Crotalaria juncea* L.; eficiencia de fósforo; soluciones nutritivas; tolerancia.

SUMMARY

Crotalaria juncea L. is an important cover crop under marginal soils conditions particularly in tropical countries, the species has been reported as a plant with ability of growing with deficient P soils. With the objective of investigating some growth responses under P deficiency, plants were cultivated in pots 900 ml filled with nutrient solution Hoagland 2, with aeration artificial. The experiment was conducted in desing completely randomized, with two phosphorus treatments (+P = 0,86 mMP and -P = 0,004 mMP) with 48 repeats. Plants were harvested at 15, 20, 25 and 30 days of age for determine dry biomass, relation shoot/root, total leaf area, root length (total and specific), soluble P inorganic (leaf), total P, also were determined the absorption of P (PAE), distribution index of P and use efficiency P (PUE). According to the results, were observed a reductions 61,3% leaf area, 61,74% in dry shoot biomass, and 50,19% in dry root biomass following reductions in leaf soluble P_i and total P under -P. On the other hand, at 20 days of age the root length increased in -P, and were larger (2,44 times) as compared to the +P plants. Under deficient phosphorus conditions, the plants showed high P absorption and use efficient P. These results suggest that this species combines morphological and physiological strategies that contribute to the tolerance to phosphorus deficiency.

Key Words: *Crotalaria juncea* L.; nutrient solution; P-efficiency; tolerance.

INTRODUCCIÓN

Resulta ampliamente documentado que el fósforo (P) es uno de los macro nutrientes más limitantes para el crecimiento de las plantas en el trópico, porque la concentración de la fracción soluble (P_i) en la solución del suelo es baja (cerca a los $10 \mu\text{M}$), según lo descrito por Navarro y Navarro, 2000 y Casanova, 2005; razón por la cual la producción de cultivos agrícolas está asociada al uso de fertilizantes fosfatados que son costosos, provienen de fuentes agotables y en su mayoría (entre el 70 y 90%) terminan asociados a compuestos orgánicos e inorgánicos en el suelo (Casanova, 2005).

La *Crotalaria juncea* L. es una planta anual de la familia Fabaceae, originaria de la India y considerada como la más importante de su género, abarca alrededor de 350 especies entre trópico y subtropico (Cook y White, 1996). La incorporación de los residuos de esta especie al suelo no sólo mejora las condiciones físicas, sino también las condiciones químicas, por medio de la fijación biológica de nitrógeno (Rivero, 1995; Bravo y Florentino, 1999; Fernández y Ortega, 2002; López *et al.*, 2006).

Lo anterior refleja que esta planta podría ser utilizada bajo condiciones de manejo de agricultura integral sustentable. Dado que un gran porcentaje de los suelos venezolanos son ácidos, incluyendo las zonas de producción agrícola y zonas naturales donde crece esta especie. Es importante estudiar las respuestas fisiológicas de estas plantas bajo condiciones de suplencia limitada de P.

La deficiencia de P se manifiesta como un síndrome de estrés, donde se activan diversas estrategias de carácter morfológico, fisiológico y metabólico, que permiten a las plantas sobrevivir por un período de tiempo determinado, hasta alcanzar la floración. En el laboratorio se realizaron estudios sobre las estrategias de crecimiento bajo condiciones de deficiencia de P, tanto en plantas cultivadas como potencialmente cultivables (Ascencio y Lazo, 1997; Briceño, 2001; Ferrarotto, 2009), igualmente, en la bibliografía existen muchos trabajos donde se demuestra que en efecto el síndrome del estrés por deficiencia de P lo presentan un gran número de especies. En este sentido, cabe mencionar los trabajos de Hammond *et al.*, 2004; Lambers *et al.* 2006; Bernal *et al.*, 2007; Oosterhuis *et al.*, 2008; Lynch, 2011.

Sin embargo, aunque la *Crotalaria* se ha venido utilizando en la agricultura durante los últimos años, son muy pocos los estudios que permiten determinar el efecto del estrés por deficiencia de P sobre la fisiología de esta planta, entre

ellos se puede citar a Cordero *et al.*, 2005; Ferrarotto y Ascencio, 2007; Ferrarotto, 2009.

Basado en estos antecedentes, el objetivo del presente trabajo fue investigar algunas respuestas de crecimiento que podrían explicar la sobrevivencia de *Crotalaria juncea* L. bajo condiciones de suplencia limitada de P en soluciones nutritivas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo entre agosto y diciembre del año 2010, en el Laboratorio de Metabolismo, Fisiología de Malezas y Cultivos Tropicales, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Botánica Agrícola, Maracay, estado Aragua.

Manejo del ensayo

Se utilizaron semillas de *Crotalaria juncea* L., provenientes del estado Cojedes (donde crece en forma silvestre y cultivada en suelos ácidos y oligotróficos), desinfectadas con Vitavax® y germinadas en envases de 480 ml con arena lavada, descarboxada con HCl a 2% y desinfectada con calor. El riego se realizó tres veces por semana con agua destilada, hasta lograr plantas homogéneas con dos hojas completamente expandidas, posteriormente se transfirieron individualmente a envases de 900 ml con las soluciones nutritivas deficientes y suficientes en P, conectados a bombas de acuario por medio de una red de manguerillas de plástico flexible.

La composición química de la solución nutritiva, base empleada en el ensayo fue la siguiente: 15 mM de N; 6,0 mM de K; 5 mM de Ca; 2 mM de Mg; 2 mM de S; 0,11 mM de Fe; 0,05 mM de B; 0,01 mM de Mn; 0,0003 mM de Cu; 0,0007 mM de Zn; 0,0001 mM de Mo, existiendo una única variación en la concentración de P proveniente de KH_2PO_4 , de 0,004 mM para deficiencia (-P) y 0,86 mM de P para suficiencia (+P), las soluciones se reemplazaron cada 5 d.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado, con dos tratamientos en la solución nutritiva: +P = 0,86 mMP (suficiencia) y -P = 0,004 mMP (deficiencia), con 48 repeticiones. El nivel de referencia -P se estableció tomando como base un ensayo preliminar y a lo propuesto por Ferrarotto y Ascencio (2007). Se realizaron muestreos de 12 plantas por tratamiento a los 15, 20, 25 y 30 d de

edad, la unidad experimental estuvo conformada por una planta en un envase.

Determinaciones de área foliar, pesos secos y longitud radical

De las 12 plantas cosechadas por tratamiento en cada muestreo, se tomaron nueve para determinaciones de área foliar (ÁF) y pesos secos. En las determinaciones de ÁF se utilizó un medidor fotoeléctrico Hayashi Denkott modelo AAM-7 y el peso de hojas, raíces y tallos obtenidos después del secado en estufa a 70 °C por 48 h, fue determinado en balanza analítica marca Satorius, modelo 2462.

Con las tres plantas restantes se realizaron las mediciones de longitud radical total (LR_{total}), siguiendo el método de las intersecciones de Tennant (1975), y con los valores obtenidos de LR_{total} se calculó la longitud radical específica (LRE), como la relación LR_{total} /peso seco de raíces.

Determinaciones de Pi soluble foliar y fósforo total

El contenido de Pi soluble (metabólico) foliar, se determinó por triplicado para todas las edades de muestreo, en discos frescos de hojas macerados en ácido acético al 2%. Después de incubar el macerado por 30 min, se centrifugó a 10 000 rpm a 4 °C durante 10 min, el sobrenadante se utilizó para la determinación de Pi, según metodología de Fiske Subarrow (1925) modificado por Cooper (1979). La concentración de P inorgánico soluble se expresó en $\mu\text{g Pi g}^{-1}$ de peso fresco de hojas.

Para el P total (P_{total}) se utilizaron tres muestras compuestas del biomasa seca de órganos de tres plantas de 35 d de edad que fue molido en malla 40. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y el contenido de P_{total} se expresó en mg P en la materia seca.

Eficiencia de fósforo

La eficiencia de absorción y de uso del P se calcularon en base al criterio de Ascencio y Lazo (2001), con modificaciones empleando las relaciones siguientes:

- Eficiencia de absorción de P (EAP) como los miligramos de P_{total} en la biomasa aérea (hojas + tallo) por metro de longitud radical y miligramos de P contenido en la solución nutritiva.

- Eficiencia de uso de P (EUP) como los gramos de biomasa seca aérea por miligramo de P_{total} en la planta completa.
- Índice de distribución de P (IDP) como la relación entre miligramos de P_{total} en hojas y los miligramos de P_{total} en raíces.

Análisis estadísticos de los resultados

Se empleó la prueba de t-Student ($\alpha = 0,05$) para determinar diferencias debidas a los tratamientos y la estadística descriptiva, para poder observar la variabilidad dentro de un mismo tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa el aspecto general de las plantas de *Crotalaria juncea* L. de 30 d de edad, obtenidas bajo deficiencia y suficiencia de P. El efecto de la deficiencia sobre *Crotalaria* se manifestó por una baja acumulación del biomasa seca total de las plantas, pero el parámetro más afectado fue el ÁF, con reducciones de 60,5% y 61,3% a los 25 y 30 d de edad (Cuadro 1). Grandes reducciones para el ÁF fueron encontradas por Cordero *et al.* (2005) y Oosterhuis *et al.* (2008) en *C. spectabilis* y *Gossypium hirsutum*, así como en plantas como *Ruellia Tuberosa*, *Euphorbia heterophylla* (Ascencio y Lazo, 1997), *Lycopersicum esculentum* (Briceño, 2001) y *Phaseolus vulgaris* (Bernal *et al.*, 2007).



FIGURA 1. Plantas de *Crotalaria juncea* L. de 30 d de edad, obtenidas bajo suficiencia (izquierda) y deficiencia de fósforo (derecha).

CUADRO 1. Valores promedio del número de hojas y área foliar (cm²) de plantas de *Crotalaria juncea* L., a cuatro edades de muestreo, bajo condiciones de deficiencia y suficiencia de fósforo.

Edad (días)	Tratamiento	Nº hojas	P _{α=0,05}	AF _{total} (cm ²)	P _{α=0,05}
15	(-P)	3,0 ± 1,0	0,3129	7,65 ± 2,76	0,1451
	(+P)	3,0 ± 1,0		9,41 ± 4,08	
20	(-P)	8,0 ± 1,0	0,0491*	39,21 ± 12,10	0,3049
	(+P)	9,0 ± 1,1		49,2 ± 14,6	
25	(-P)	13,0 ± 2,0	0,3234	90,46 ± 23,74	0,0353*
	(+P)	17,0 ± 2,0		228,92 ± 46,99	
30	(-P)	16,0 ± 1,0	0,0004***	111,40 ± 19,33	0,0000***
	(+P)	22,0 ± 5,0		288,22 ± 102,63	

(-P) = 0,004 mMP; (+P) = 0,86 mMP; P_{α=0,05} = probabilidad a 5%; n = 9. Prueba de t; *-*** = Diferencias significativas.

Esta respuesta bajo deficiencia, podría ser el resultado de una alteración de la división y elongación celular (Kavanová *et al.*, 2006), lo cual afecta la expansión foliar y el número de hojas (Ascencio, 1996; Ascencio y Lazo, 1997). Sin embargo, aunque en -P se reportaron los valores más pequeños de AF, las disminuciones en el número de hojas fueron de 23,50% y 27,3% a los 25 y 30 d de edad, sin obtener diferencias significativas (Cuadro 1).

Mediante la condición -P se observaron reducciones en la acumulación de la biomasa, lo que se refleja en los valores de PS_{total} tal como se demuestra en el Cuadro 2. Lo anterior es una respuesta muy común en plantas cultivadas y no cultivadas, como *Desmodium tortuosum* y *Cajanus cajan* (Ascencio, 1996; Ascencio y Lazo, 2001); *Ruellia tuberosa* y *Euphorbia heterophylla* (Ascencio y Lazo, 1997); *L. esculentum* (Briceño, 2001); *P. vulgaris* (Ascencio y Lazo, 2001; Bernal *et al.*, 2007); *G. hirsutum* L. (Oosterhuis *et al.*, 2008) y podría estar asociada con las disminuciones del AF, que a su vez generan diferencias en las tasas fotosintéticas (Ascencio, 1996).

En un ensayo preliminar realizado para el presente trabajo, se cuantificaron tasas de fotosíntesis de 41 y 30 μmol CO₂ m⁻² AF h⁻¹ en +P y -P, respectivamente.

Los porcentajes de reducción de biomasa seca en el vástago, al comparar -P con +P fueron de 13,29% a los 15 d, 33,85% a los 20 d; 52,67% a los 25 d y 61,74% a los 30 d. A excepción de lo observado en el muestreo a los 15 d, los valores de PS_{vástago} se redujeron más que el

de PS_{RAÍCES} (Cuadro 2), lo cual concuerda con lo reportado por Ascencio y Lazo (1997); Briceño (2001); López-Bucio (2003); Fragoso *et al.* (2005); Bernal *et al.* (2007) en las plantas de nabo, yuquilla, Euphorbia, tomate, soya y caraota.

La deficiencia de P limita el desarrollo de la parte aérea de las plantas para favorecer el desarrollo de las raíces (Fragoso *et al.*, 2005). Sin embargo, aunque en el presente estudio no se observaron aumentos en biomasa seca de raíces bajo condiciones de deficiencia (-P), sí se detectaron disminuciones de la relación vástago/raíz (Cuadro 2), siendo considerado como parte de una estrategia morfológica que le permite a las plantas escapar a la deficiencia de P, tal como ocurre en otras leguminosas *Arachis pintoi* (Watanabe *et al.*, 2006); *P. vulgaris* (Parra *et al.*, 2004; Bernal *et al.*, 2007); *C. cajan* y *D. tortosum* (Ascencio, 1996). Aunque los resultados obtenidos indican que no siempre existe aumento de la biomasa radical en -P, las raíces de *C. juncea* L. parecieron haber continuado su crecimiento a expensas del vástago.

En cuanto a la longitud total de raíces en -P fueron más largas que en +P durante los dos primeros muestreos, a los 15 y 20 d (Cuadro 3), siendo más acentuada la diferencia a los 20 d, con un incremento en más del doble (2,44 veces) y con valores más elevados de LRE (19 861 cm mg⁻¹ en -P y 12 016 cm mg⁻¹ en +P). Por lo tanto, es un indicio de que en ese momento las raíces de *Crotalaria* fueron más largas y delgadas en -P que en +P (Cuadro 3), representando una estrategia importante para acceder el P del sustrato.

CUADRO 2. Pesos secos (PS) (mg) de plantas de *Crotalaria juncea* L. bajo tratamiento suficiente y deficiente de fósforo a cuatro edades de muestreo. Valores promedios y coeficiente de variación.

Edad (días)	Trat.	PS _{hojas}	P _{α=0,05}	PS _{tallo}	P _{α=0,05}	PS _{raíz}	P _{α=0,05}	PS _{total}	P _{α=0,05}	Vástago/raíz	P _{α=0,05}
15	(-P)	13,2 ± 3,2	0,0728	10,4 ± 2,0	0,1077	7,4 ± 2,1	0,0069**	31,0 ± 4,6	0,0921	3,4 ± 0,9	0,4111
	(+P)	14,5 ± 5,5		12,7 ± 3,3		14,5 ± 5,5		41,74 ± 12,88		1,9 ± 0,3	
20	(-P)	57,1 ± 19,4	0,0823	26,5 ± 8,9	0,0741	26,6 ± 10,6	0,3442	110,3 ± 35,5	0,1841	3,4 ± 0,9	0,0074**
	(+P)	86,9 ± 32,5		39,5 ± 15,2		30,2 ± 9,1		156,7 ± 49,5		4,3 ± 0,9	
25	(-P)	232,5 ± 69,6	0,2064	131,0 ± 38,7	0,0792	144,8 ± 45,3	0,3980	508,3 ± 147,5	0,2504	2,6 ± 0,5	0,4377
	(+P)	486,9 ± 94,1		259,4 ± 65,5		185,3 ± 41,2		931,5 ± 188,8		4,1 ± 0,5	
30	(-P)	280,5 ± 43,9	0,0004***	164,6 ± 34,4	0,0000***	193,5 ± 36,9	0,0004***	638,6 ± 104,7	0,0001***	2,3 ± 0,35	0,0520
	(+P)	671,1 ± 172,1		422,6 ± 188,8		388,5 ± 145,7		1 482,2 ± 474,0		2,9 ± 0,6	

-P = 0,004 mM P; +P = 0,86 mM P; P: α = 0,05 = probabilidad al 5%, n = 9. Prueba de t; ** - *** = Diferencias significativas.

CUADRO 3. Valores promedios y coeficiente de variación de la longitud radical total y longitud radical específica de plantas de *Crotalaria juncea* a diferentes edades bajo condiciones de deficiencia y suficiencia de fósforo.

Edad (días)	Trat.	LR _{total} (cm)	P _{$\alpha=0,05$}	LRE (cm/mg)	P _{$\alpha=0,05$}
15	(-P)	133,5 ± 38,9	0,4353	26 191 ± 3 406,5	0,3598
	(+P)	117,6 ± 34,2		20 478 ± 4 544,4	
20	(-P)	335,7 ± 12,3	0,0275*	19 861 ± 4 582,9	0,1698
	(+P)	137,5 ± 73,1		12 016 ± 2 072,4	
25	(-P)	1 153,4 ± 177,73	0,1801	13 844 ± 3 565,6	0,4775
	(+P)	1 434,5 ± 379,24		15 680 ± 3 730,0	
30	(-P)	1 648,2 ± 55,837	0,2801	14 496 ± 2 570,3	0,2901
	(+P)	1 787,8 ± 401,95		15 278 ± 4 020,8	

(-P)= 0,004 mMP; (+P)= 0,86 mMP; P _{$\alpha=0,05$} = probabilidad al 5 %; n= 3. Prueba de t; *Diferencia significativa.

Shen *et al.* (2003) reportaron resultados similares en *Lupinus albus* donde LRE se incrementó rápidamente desde 17 m g⁻¹ a 28 m g⁻¹ a los 40 d bajo condición -P. Además, las observaciones realizadas en este trabajo permitieron conocer que bajo deficiencia de P parece ocurrir un alargamiento de las raíces secundarias superficiales (Figura 2), tal como reportaron Friesen *et al.* (1997) para algunas leguminosas de 38 a 42% de las raíces, se encontraron en los primeros 10 cm en un suelo oxisol con deficiencia de P.

A los 25 y 30 d de edad, la reducciones de la LR_{total} en -P fueron 19% (de 1 434,5 en +P a 1 153,4 cm en -P) y 7,81% (1 787,8 en +P a 1 648,2 en -P), las cuales no pueden ser consideradas como reducciones mayores (Cuadro 3). Esta respuesta difiere con lo observado en *L. esculentum* a 21 d bajo estrés -P (García y Ascencio, 1992), *D. tortuosum* (Ascencio, 1996) y otras plantas silvestres, como *Euphorbia heterophylla* y *Ruellia tuberosa* (Ascencio y lazo, 1997), donde la deficiencia de P redujo significativamente la LR_{total}.

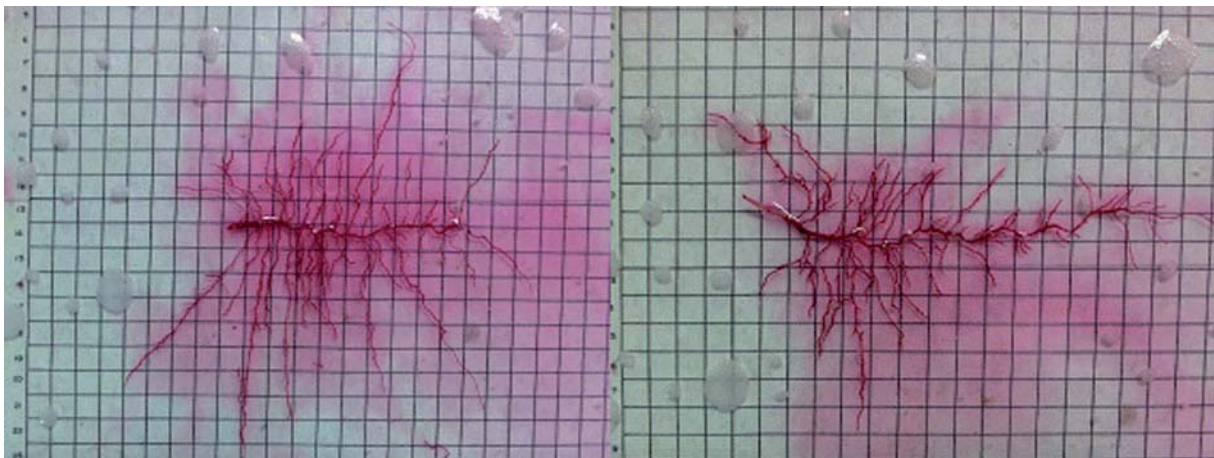


FIGURA 2. Aspecto general de algunas raíces de *Crotalaria* de 15 días de edad. A: raíces obtenidas en +P; B: raíces obtenidas de -P.

Estos resultados parecen indicar que las raíces de *Crotalaria* podrían alargarse en las etapas tempranas del crecimiento vegetativo de la planta, esto podría formar parte del desarrollo de una estrategia para sobrevivir a la deficiencia de P, favoreciendo los medios de acceso a este nutrimento, además se estaría confirmando que las respuestas al estrés dependen de la edad de las plantas.

Por consiguiente, esta estrategia podría contribuir a mejorar la eficiencia de absorción de los nutrimentos desde la rizósfera en sustratos con suplencia limitada. También, Watanabe *et al.* (2006) encontraron que bajo condiciones de deficiencia de P, los contenidos de P_{total} en hojas y raíces de plantas forrajeras disminuyeron drásticamente, pero la estimulación del alargamiento de raíces hizo posible el mantenimiento de un estatus mínimo de P dentro de la planta para el cumplimiento de sus funciones vitales.

Por otra parte, se observaron los valores más bajos de P_{total} en todos los órganos cuando las plantas crecieron bajo deficiencia, con reducciones significativas en el vástago (Cuadro 4), así como del Pi soluble en las hojas. Para este último se encontraron valores inconsistentes a los 20 d de edad, pero la tendencia fue a disminuir a medida que transcurrió el tiempo en deficiencia (Cuadro 5). El Pi soluble está involucrado en las reacciones metabólicas de las plantas, por lo que la respuesta anterior permite suponer que bajo estas condiciones estresantes ocurre una redistribución del P desde el vástago hacia las raíces, disminuyendo la cantidad relativa de biomasa seca del vástago.

CUADRO 4. Contenido de fósforo total en plantas de *Crotalaria* de 30 días de edad, bajo condiciones de deficiencia (-P) y suficiencia (+P) de fósforo.

Trat.	(mg P en MS)			
	Hojas	Tallos	Raíces	Planta completa
(-P)	0,22 ± 0,03	0,11 ± 0,004	0,23 ± 0,02	0,56 ± 0,05
(+P)	5,52 ± 1,14	2,52 ± 0,62	4,48 ± 2,97	12,52 ± 4,26

(-P) = 0,004 mMP; (+P) = 0,86 Mmp; n = 9 plantas.

CUADRO 5. Variación de la concentración foliar de Pi ($\mu\text{g Pi/cm}^2$) en *Crotalaria juncea* L. en función a la edad de las plantas bajo condiciones de deficiencia y suficiencia de fósforo.

Edad (días)	$\mu\text{g Pi/cm}^2$ de área foliar	
	(-P)	(+P)
15	14,011 ± 1,70	23,665 ± 5,824
20	25,588 ± 1,842	38,808 ± 4,826
25	11,100 ± 0,855	19,307 ± 1,895
30	9,089 ± 0,104	18,548 ± 3,615

(-P) = 0,004 mMP; (+P) = 0,86 Mmp. n = 3 plantas.

La capacidad que muestran las plantas para crecer en un medio con bajo contenido de P depende tanto de la eficiencia del uso como de la eficiencia de absorción de dicho elemento (Marschner, 1995). En este sentido, aunque en este trabajo las raíces de *C. juncea* de 30 d no mostraron diferencias significativas en LR_{total}, la EAP aumentó en gran medida (9,4 veces) bajo la condición -P (Cuadro 6), indicando que las plantas estresadas lograron absorber más P por longitud de raíces a partir de la solución nutritiva -P.

Lo anterior estaría sugiriendo la activación de otras estrategias fisiológicas que contribuirían a la absorción del P desde la rizósfera.

Del mismo modo, se observó un aumento de casi nueve veces en la EUP bajo la condición -P (Cuadro 6), lo cual indica que en comparación con las plantas en +P, las plantas bajo estrés producen mayor cantidad de materia seca aérea por cada miligramo de P_{total} presente en los tejidos, esta es otra de las estrategias para la sobrevivencia ante la deficiencia de P.

Lo anterior coincide con Briceño (2001) en tomate y Cordero *et al.* (2005) en *C. spectabilis*. Al mismo tiempo, Ascencio y Lazo (2001) demostraron en plantas de frijol cultivadas en soluciones nutritivas con una fuente de P poco soluble (Ca -P), una baja EAP y alta EUP combinación deseable en condiciones de suelos marginales.

CUADRO 6. Índices de eficiencia de fósforo en plantas de *Crotalaria* de 30 días de edad bajo condiciones de deficiencia (-P) y suficiencia (+P) de fósforo.

Tratamiento	EAP (mg P en PA. m ⁻¹ l raíces Mg P ⁻¹ en solución)	EUP (g de peso seco PA mg ⁻¹ P en la planta)	IDP (mg P hojas/mg P raíz)
(-P)	2 000,12	0,78	0,94
(+P)	212,51	0,09	1,32

(-P)= 0,004 mMP; (+P)= 0,86 mMP; PA: Parte aérea; L: longitud
n=9 plantas

Finalmente, las plantas de *C. juncea* L. bajo deficiencia de P muestran menor acumulación de biomasa seca y valores menores de la relación vástago/raíz. Las diferencias en LR_{total} debidas a la deficiencia fueron máximas hasta los 20 d de edad, asimismo, el contenido de P_{total} en los órganos y el P soluble foliar siempre fueron menores en plantas -P, por lo que la capacidad de *C. juncea* L. de sobrevivir en suelos marginales bajo condiciones de suplencia limitada de P está en gran parte asociada a la alta eficiencia en la absorción y en el uso interno del P.

CONCLUSIÓN

- La baja suplencia de P ocasionó reducciones en el contenido de P soluble foliar y P_{total} en los tejidos de las plantas, conllevando a disminuciones en la biomasa seca, ÁF y relación del peso seco vástago/raíz que se hacen más evidentes a partir de los 25 d de edad. Bajo estas condiciones se estimula del alargamiento de raíces cercanas a la superficie del suelo en todas las edades de muestreo, pero la mayor longitud radical total ocurrió solo en los estados más tempranos del crecimiento, haciéndose más acentuada a los 20 d.
- Bajo suplencia limitada, los valores de la EAP y la EUP estuvieron muy por encima que la obtenida en plantas +P.
- Las plantas de *C. juncea* L. bajo condiciones de este estudio, mostraron estrategias fisiológicas asociadas con el crecimiento de la planta y la morfología radical, lo que sugiere que esta especie posee mecanismos que le permiten sobrevivir bajo condiciones de deficiencia de P.

BIBLIOGRAFÍA

- Ascencio, J. 1996. Growth strategies and utilization of phosphorus in *Cajanus cajan* L. Millsp. and *Desmodium tortuosum* (Sw) DC under phosphorus deficiency. Commun. Soil SCI. Plant Anal. (27):1971-1993.
- Ascencio, J. y J. V. Lazo. 2001. Crecimiento y eficiencia de fósforo de algunas leguminosas cultivadas en arena regada con soluciones nutritivas con fosfatos inorgánicos de hierro y de calcio. Rev. Fac. Agron. (LUZ). (18):13-32.
- Ascencio J. and J. V. Lazo. 1997. Growth evaluation during the vegetative phase of dicotyledonous weeds and under phosphorus deficiency. J. Plant Nut. (20):27-45.
- Bernal, L., P. Coello, J. Acosta y E. Martínez. 2007. Efecto de la deficiencia de fósforo en el metabolismo de carbono de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris*). Agrociencia. (41):417-423.
- Bravo, C. y A. Florentino. 1999. Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia sobre el rendimiento del Algodón. Bioagro. (9):67-75.
- Briceño, Z. 2001. Estudio de algunas respuestas fisiológicas y Bioquímicas de *Lycopersicon esculentum* Mill var. Río Grande bajo condiciones de deficiencia y suficiencia de fósforo. Tesis de maestría. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía 117 p.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la Ciencia del Suelo. CDCH. Universidad Central de Venezuela 482 p.

- Cook, C. and G. White. 1996. *Crotalaria juncea*: A potential multi-purpose fiber crop. **In:** J. Janick (ed.), Progress in new crops. 389-394 pp. [Disponible en línea, 25/07/2009]: <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/proceedings1996/v3-389.html>
- Cooper, G. 1979. The tools of biochemistry. Chapter 2: Spectrophotometry. Determination of inorganic phosphate. Wiley. Interscience Publication. New York 423 p.
- Cordero, Y., Z. Briceño y J. Ascencio. 2005. Respuestas fisiológicas de *Crotalaria spectabilis* Roth cultivada en solución nutritiva deficiente y suficiente en fósforo. *Anales de Botánica Agrícola* (12):19-30.
- Fernandez, N. y L. Ortega. 2002. Efecto de la edad de incorporación de dos abonos verdes sobre algunas propiedades del suelo y el rendimiento del rábano (*Raphanus sativus*). *Venesuelos* (10):18-31.
- Ferrarotto, M. 2009. Morfología del sistema radical de *Crotalaria juncea* L. (Fabaceae) y su capacidad de solubilización de fósforo en condiciones de suplencia limitada en soluciones nutritivas. Tesis doctoral. Doctorado en Ciencias Agrícolas. Maracay, Ven. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía 225 p.
- Ferrarotto, M. y J. Ascencio. 2007. Determinación de niveles de referencia de fósforo en plantas de *Crotalaria juncea* L. XVII Con. Ven. Bot. 636-639 pp.
- Fragoso, S., E. Martínez, S. Vásquez, J. Acosta y P. Coello. 2005. Respuesta de la Soya (*Glyxine max*) a la deficiencia de fosfato. *Agrociencia* (39):303-310.
- Friesen, D., I. M Rao, R. Thomas, A. Oberson and J. Sanz. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture in low fertility tropical soils. T. Ando *et al.* (Edit), Plant nutrition-for sustainable food production and environment 493-498 pp.
- García, M. and J. Ascencio. 1992. Root morphology and acid phosphatase activity in Tomato plants during development of and recovery from phosphorus stress. *J. Plant Nut.* (15):2.491-2.503.
- Hammond, J., M. Broadley and P. White. 2004. Genetic Responses to Phosphorus Deficiency. *Annals of Botany* (94):323-32.
- Kavanová, M., F. Lattanzi, A. Grimoldi, and H. Schnyder. 2006. Phosphorus deficiency decreases cell division and elongation in grass leaves. *Plant Physiol* (141):766-775.
- Lambers, H., M. Shane, M. Cramer, S. Pearse and E. Veneklaas. 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching morphological and Physiological Traits. *An. Bot.* (98):693-713.
- Lynch, J. 2011. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops. *Plant physiol* (156):1 041-1 049.
- López, M., N. Alfonso, A. Florentino y M. Pérez. 2006. Dinámica del fósforo y reducción del aluminio intercambiable en un ultisol sometido a manejo conservacionista. *INCI.* (31):293-299.
- López-Bucio, J., A. Cruz and L. Herrera. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Curr. Op. Plant Biol.* (6):1-8 pp.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press. Second edition 889 p.
- Navarro, S. y G. Navarro. 2000. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ediciones Mundi-Prensa 488 p.
- Oosterhuis, D., A. Bibi, E. Gonias and M. Mozaffari. 2008. Cotton growth and physiological responses to phosphorus deficiency. Wayne E. Sabbe Arkansas Soil Fertility Studies.
- Parra, C., E. Martínez, J. Acosta y P. Coello. 2004. Respuesta a la deficiencia de fosfato de genotipos de frijol contrastantes en su capacidad de crecer en suelos con bajo contenido de fósforo. *Agrociencia* (38):131-139.
- Rivero, C. 1995. Efecto de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades de un alfisol degradado. *Venesuelos* (3):55-61.
- Shen, J., Z. Rengel, C. Tang and F. Zhang. 2003. Role of phosphorous nutrition in development of cluster roots and release of carboxylates in soil-grown *Lupinus albus*. *Plant and Soil* (248):199-206.

Tennant, D. 1975. A test of modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecology* (63):995-1.006.

Watanabe, O., M. Osaki, H. Yano and I. Rao. 2006. Internal Mechanisms of Plant Adaptation to Aluminum Toxicity and Phosphorus Starvation in Three Tropical Forages. *Journal of Plant Nutrition* (29):1 243-1 255.