



Desempeño del *Phaseolus vulgaris* bajo riego parcial cultivado en un sistema de respuesta hidrogravitrópica

Performance of *Phaseolus vulgaris* under partial root-zone drying cultivated in a hydrogravitropic system response

Emil Cristhian Vega Ponce¹; Jesús Abel Mejía Marcacuzco²

¹ Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica De Manabí, Campus Lodana, Santa Ana, Manabí, Ecuador.

² Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Peru.

Received December 12, 2016. Accepted May 8, 2017.

Resumen

En el área experimental de la UNALM (Lima-Perú) se evaluó sobre tratamientos de riego parcial (RPR300 y RPR500, ml) y riego completo (RC300 y RC500, ml control), el impacto del potencial xilemático (Ψ_x) y la conductancia estomática (gs) en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en sistemas (maceteros) de respuesta hidrogravitrópica. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 12 plantas/maceteros por tratamiento en tres repeticiones. Para controlar la aplicación del riego y mantener el Ψ_x en condiciones no letales (<-15 bar), se generó una curva de retención agua-suelo. Los valores de gs antes del riego (entre 217,18 y 268,67 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mostraron que únicamente en RPR500 las plantas se mantenían en óptimas condiciones hídricas, a pesar de los bajos valores de Ψ_x (entre -9,92 y -7,33 bar); situación que pudo atribuirse a la capacidad de las raíces de sopesar los momentos en que la mitad de estas estructuras se encontraban en la sección del macetero donde la humedad del suelo estaba en un nivel bajo, mientras que la otra mitad se encontraba en la sección del macetero con un adecuado nivel hídrico del suelo.

Palabras clave: Conductancia estomática; *Phaseolus vulgaris* L.; potencial xilemático; potencial matricial del suelo.

Abstract

In the experimental area of the UNALM (Lima-Perú) was evaluated on partial root-zone drying irrigation treatments (RPR300 and RPR500, ml) and full irrigation (RC300 and RC500, ml control), the impact of xylem potential (Ψ_x) and stomatal conductance (gs) in common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated in systems (pots) of hydrogravitropic response. A randomized complete block design with 12 plants/pots per treatments was used in three replicates. To control the irrigation application and manage to maintain the Ψ_x nonlethal conditions (<-15 bars), a water-soil retention curve was generated. The values of gs before irrigation (between 217.18 and 268.67 $\text{mm}^{-2} \text{s}^{-1}$) showed that only RPR500 plants were maintained under optimal water conditions, despite low levels of Ψ_x (between -9.92 and -7.33 bar); situation that could be attributed to the ability of the roots to balance those moments when half of these structures were inside soil with low humidity, while the opposite half was favorable soil water level.

Keywords: Stomatal conductance; *Phaseolus vulgaris* L.; xylem water potential; soil water matric potential.

1. Introducción

La agricultura es la actividad humana que, junto con formar parte del paisaje, ha logrado moldear la economía y la sociedad de los países; sin embargo, su expansión desde el inicio de la revolución verde en la

década de los años '60, está relacionada con la generación de pasivos ambientales (Kamaljit, 2014).

Incluida esta última discrepancia, la agricultura también representa la actividad imprescindible para la producción de

* Corresponding author
E-mail: cristhianvegpo@gmail.com (E. Vega).

alimentos; y gracias a los continuos avances en técnicas agronómicas, la supervivencia de la especie humana puede extenderse hacia otras fronteras (Morrow *et al.*, 1994; Ferl *et al.*, 2002; Monje *et al.*, 2003; Hublitz *et al.*, 2004; Baratto *et al.*, 2005; Brinckmann, 2005; Guo *et al.*, 2008; Kiss *et al.*, 2009; Thomas, 2014; Dauzart *et al.*, 2016).

Por otro lado, la agricultura bajo riego representa la actividad más “sedienta” de nuestro planeta (York *et al.*, 2013); y en este sentido la FAO (2015) ha expresado que, si no se introducen cambios trascendentales en los patrones de producción, para el año 2050 la escasez de agua en varias zonas del mundo amenazará la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. De la misma forma, Behboudian y Singh (2001) indican que el déficit de agua presente en las zonas de producción agrícola genera fuertes necesidades para actualizar las estrategias orientadas a mejorar la aplicación del agua en las plantas; donde es necesario que las nuevas técnicas de riegos reducidos junto con ahorrar agua mantengan o mejoren la sostenibilidad de los cultivos (Zegbe *et al.*, 2006; Vega, 2017).

En el caso del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), que representa una de las leguminosas de mayor consumo humano, el 70% de la producción mundial se la obtiene bajo condiciones hídricas limitantes (Cuéllar y Covarrubias, 2005). En América Latina el 73% de la producción proviene de regiones con niveles de déficit hídrico desde moderado hasta severo (Jiménez y Acosta, 2013), donde el desempeño productivo también puede estar influenciado por el genotipo (Gomes *et al.*, 2016); en el mismo sentido, Pimentel (2004) expresa que a esta limitación se suma la alta sensibilidad del cultivo a la falta de agua, con un potencial hídrico letal en el xilema (-15 bares) similar al del tomate (*Lycopersicon esculentum*), en comparación con otras leguminosas como el frijol caupí (*Vigna unguiculata*, -25 bares) o el frijol de palo (*Cajanus cajan*, -35 bares). De esta forma,

varios estudios han puesto de manifiesto al potencial xilemático (Ψ_x) como el mejor indicador del estado hídrico de las plantas en varios cultivos (Abrisqueta *et al.*, 2015). Asimismo, se ha demostrado que, mediante reducciones controladas de volúmenes de agua de riego, junto con modificaciones en las técnicas de aplicación a los cultivos, es posible manipular la conductancia estomática (gs) para mejorar el control del estado hídrico de las plantas (Sepaskhah y Ahmadi, 2010), y permitir que se incremente su eficiencia en el uso del agua (De Pascale *et al.*, 2011). De esta forma, el riego deficitario controlado (RDC) y el riego parcial de raíces (RPR) podrían ser las estrategias de riegos reducidos más exitosas para conseguir este objetivo, tanto en cultivos perennes (Fernández *et al.*, 2006; Romero y Martínez-Cutilla, 2012) como en cultivos anuales (Yan *et al.*, 2012; Nunes *et al.*, 2015).

Por otro lado, la capacidad de las raíces de las plantas para reconocer pequeños cambios en los patrones de humedad del suelo (Robbins y Dinneny, 2015), les permite sopesar los riesgos de aversión y propensión para activar su crecimiento (Dener *et al.*, 2016).

En este sentido, el conjunto de experiencias que ha permitido comprender las respuestas de las raíces a las señales abióticas, donde estas orientan su crecimiento, principalmente, por la influencia del vector gravitatorio de la Tierra o gravitropismo (Tan *et al.*, 2011), y por la presencia de gradientes hídricos en el suelo o hidrotropismo (Moriwaki, *et al.*, 2013), constituyen fenómenos físicos que pueden ser considerados en el diseño y construcción de sistemas geométricos que aprovechen mejor la capacidad de las raíces para distribuirse tridimensionalmente en el suelo (Vega, 2017).

De esta forma, el macetero de respuesta hidrogravitropica es una solución física que permite perfeccionar el manejo del riego parcial de raíces, pues se obtiene un mayor control de la aplicación del agua, respecto a la configuración geométrica del

macetero, realizada por Puértolas *et al.* (2015) en las experiencias con similar técnica de riego. Estos beneficios son posibles debido a la incorporación de un elemento plástico de forma cilíndrica en el interior del macetero, que encapsula a la raíz principal y mantiene su crecimiento de forma vertical; así mismo, posiciona y orienta el desarrollo de las raíces laterales, a través, de pequeños conductos que apuntan hacia las dos secciones diseñadas para la aplicación del riego; efecto que finalmente puede mejorar el desempeño hídrico de las plantas (Vega, 2017).

En base a este conjunto de antecedentes el objetivo de este trabajo consistió en evaluar el impacto del riego parcial de raíces sobre el potencial xilemático (Ψ_x) y la conductancia estomática (gs) en frijol común, cultivado en maceteros de respuesta hidrogravitrópica.

2. Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el área experimental del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) en Lima-Perú (12°05'06" Latitud Sur, 76° 75'00" Longitud Oeste y 230 msnm); durante el periodo de la investigación la temperatura promedio mensual fue de 18,06 °C, humedad relativa 58,65%, evaporación 3,33 mm día⁻¹, precipitación total 0,95 mm y heliofanía 4,28 horas día⁻¹. Como material vegetal se utilizaron semillas de frijol común variedad Red Kloud, tipo determinado I; sembradas en sistemas de respuesta hidrogravitrópica (Figura 1). Las semillas germinaron en la parte superior del encapsulador de la raíz principal, que en todo el eje vertical de su sección interior contenía una turba comercial (Kekkilä Garden®, DMS-05) colocada con una densidad de 0,3 g.cm⁻³; mientras que en las dos secciones (A y B) donde se desarrollaron las raíces laterales se colocó un sustrato heterogéneo (MO: 5,93%, pH: 7,67, CE: 1,35 dS.m⁻¹) a una densidad de 1 g cm⁻³. El día de la siembra se saturó con agua el sustrato contenido en

ambas secciones del macetero, y una vez que aparecieron las primeras hojas verdaderas (12 días después de siembra, dds) se aplicaron 16 riegos de 0,25 L en ambas secciones (A y B) hasta después de la floración (30 dds), con la intención de estimular el desarrollo de las raíces laterales hacia estas dos partes del macetero.

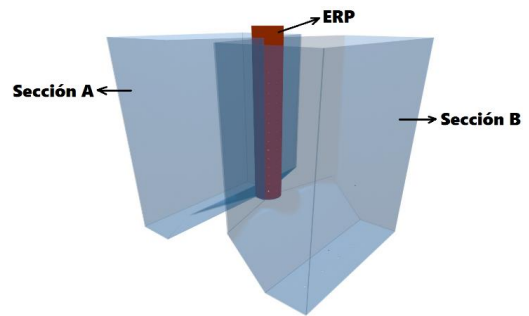


Figura 1. Perspectiva del macetero de respuesta hidrogravitrópica para cultivar plantas de frijol común bajo riego parcial de raíces (RPR). Se destacan sus dos secciones para el desarrollo de las raíces laterales y aplicación del riego de cada lado, identificadas como A y B; y el cilindro encapsulador de la raíz principal (ERP).

Para monitorear la humedad del suelo durante la aplicación del riego, se instalaron en las secciones A y B de los maceteros, sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) EC-5 conectados a registradores de datos Em5b (Decagon Device® USA), programados con ayuda del software ECH₂O® Utility versión 1,74 con una configuración de registro horaria. Así mismo, se construyó la curva de retención agua-suelo con datos del potencial matricial del suelo (Ψ_{ms}), utilizando el sensor MPS-6 (Decagon Device® USA), y datos del contenido hídrico volumétrico del suelo (θ_{vs}), utilizando el sensor EC-5 (Decagon Device® USA), ambos conectados al registrador de datos EM-50 (Decagon Device® USA); de esta manera se obtuvieron los parámetros del modelo de Campbell (Khlosi *et al.*, 2008; Bittelli y Flury, 2009), para finalmente poder definir los valores de Ψ_{ms} y θ_{vs} del rango entre los que se mantuvo la humedad del suelo dentro de los límites de la fracción de agua

transpirable, para que el factor controlador del estado hídrico de la planta dependa de las condiciones atmosféricas (Pardossi *et al.*, 2009).

Los tratamientos correspondieron a riego parcial de raíces (RPR), el mismo que está diseñado para mantener la mitad del sistema radicular de las plantas sin riego (donde el suelo se encuentra con un nivel de humedad bajo), mientras que al mismo tiempo la otra mitad se mantiene con riego (donde el suelo se puede encontrar hasta con el máximo nivel hídrico que puede contener), para luego intercambiar estas condiciones en la siguiente aplicación de agua; y riego completo (RC), donde toda la sección del suelo que es explorada por las raíces se encuentra bajo el máximo régimen hídrico apropiado para las plantas. De esta forma RPR y RC fueron combinados cada uno con dos volúmenes de agua (300 ml y 500 ml) obtenidos con la curva de retención agua-suelo, considerando los límites de la fracción de agua transpirable del suelo. En este sentido, se obtuvieron cuatro tratamientos con la siguiente configuración: 1) RPR300, 2) RPR500, 3) RC300 y 4) RC500 (control), todos en unidades de ml.

Finalmente, se realizaron nueve riegos de acuerdo a la configuración de los tratamientos (con ayuda de un recipiente aforado en 300 ml y 500 ml) considerando su inicio desde los 32 dds (correspondiente al momento después de la floración) hasta los 52 dds (correspondiente a tres días antes de la cosecha de las vainitas); de esta manera, el volumen total de agua aplicada en esta etapa para cada planta/macetero fue de 9000 ml (RC500), 4500 ml (RPR500), 5400 ml (RC300) y 2700 ml (RPR300).

En el caso del Ψ_x los monitoreos se realizaron en el momento de máxima radiación solar (entre las 11:00 y 14:00 horas del día), desde los 36 dds hasta los 43 dds en el instante anterior a la aplicación del riego y 24 horas después de este evento. Durante este periodo las mediciones se realizaron en la misma planta en hojas maduras no terminales (ramas del tercio medio) expuestas a

radiación solar directa. Para evaluar este parámetro se utilizó una bomba Schölander (modelo 3005F01 de Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara, CA), donde una hora antes de la medición las hojas fueron protegidas con bolsas plásticas aluminizadas para reflejar la luz del sol, evitar que se calienten, y conseguir el equilibrio entre el potencial hídrico de la hoja y el potencial hídrico del xilema (Romero *et al.*, 2014).

Para la evaluación de la gs, las mediciones se realizaron en la misma planta y en el mismo periodo en que se evaluaba el Ψ_x , utilizando el porómetro de estado estacionario SC-1 (Decagon Device® USA).

Los maceteros se agruparon para conformar los tratamientos (cuatro) en tres repeticiones, y se organizaron en el campo de acuerdo a un diseño de bloques completos al azar. Cada tratamiento o parcela ocupó un área de 0,70 m² y estuvo conformada por 12 maceteros de respuesta hidrogravitrópica con una planta sembrada en cada uno; se realizó la medición en dos plantas centrales de cada parcela y sus resultados fueron promediados para el respectivo análisis. Las variables (gs y Ψ_x) se sometieron a análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$), con ayuda del programa SAS® v9.1 (SAS Institute, 2004).

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se observan los patrones espacio-temporales de humedad del suelo, generados por los nueve riegos aplicados en las secciones A y B de los maceteros de respuesta hidrogravitrópica con las técnicas RPR (1a y 1c) y RC (1b y 1d). Se puede apreciar que en el caso de la aplicación de RPR, se realizaron cinco riegos en la sección A y cuatro en la sección B, donde el desalineamiento controlado que se produce entre los patrones de cada sección del macetero (Figura 2a y 2c), es considerado clave para desencadenar en las raíces de las plantas señales físicas y/o químicas (Comstock, 2002) para la generación de regulaciones hídricas en la hoja, con el fin de mantener un adecua-

do régimen hídrico en toda la planta (Prado y Maurel, 2013). Mientras que, en el caso de la aplicación de RC, los nueve riegos se realizaron en ambas secciones al mismo tiempo (Figura 2b y 2d), efecto que permitía mantener el mismo nivel de humedad dentro de todo el macetero y la alineación de los patrones hídricos del suelo.

Se puede afirmar que el comportamiento de los patrones espacio-temporales de humedad del suelo en este trabajo mostraron las tendencias representativas para ambas técnicas (RC y RPR), las mismas que han sido descritas por Wakrim *et al.* (2005), López *et al.* (2008), y Chamú *et al.* (2011). Así mismo, también se evidenció que no existió transferencia horizontal de humedad entre las secciones donde se desarrollaron las raíces laterales, lo que confirma un buen desempeño del diseño y la geometría del sistema de respuesta hidrogravitrópica para el cultivo de frijol común (Vega, 2017).

En el mismo contexto, se aprecian unos segmentos que representan los rangos de la fracción de agua transpirable del suelo; los mismos que fueron obtenidos en la curva de retención agua-suelo (Figura 3), donde se definió 26% a -41 kPa (θ_{vs500} , en los tratamientos donde se aplicó 500 ml) y

22% a -76 kPa (θ_{vs300} , en los tratamientos donde se aplicó 300 ml) como los límites superiores para ambos rangos (siendo 28% a -33 kPa la capacidad de campo del sustrato), y 15 % a -252 kPa como el límite inferior o punto crítico (θ_{vsc}) para el caso del cultivo de frijol común (Camarena *et al.*, 2009).

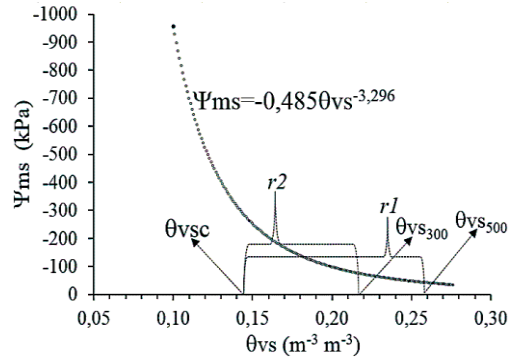


Figura 3. Curva de retención agua-suelo con los respectivos parámetros del modelo de Campbell (-0,485 y -3,296), generada a partir de datos (puntos negros) tomados con los sensores MPS-6 (monitoreo del Ψ_{ms}) y EC-5 (monitoreo de la θ_{vs}); siendo θ_{vsc} el límite común de los rangos de la fracción de agua transpirable del suelo, definidos como $r1$ ($\theta_{vs500} - \theta_{vsc}$) y $r2$ ($\theta_{vs300} - \theta_{vsc}$), para los tratamientos donde se aplicó 300 ml y 500ml respectivamente.

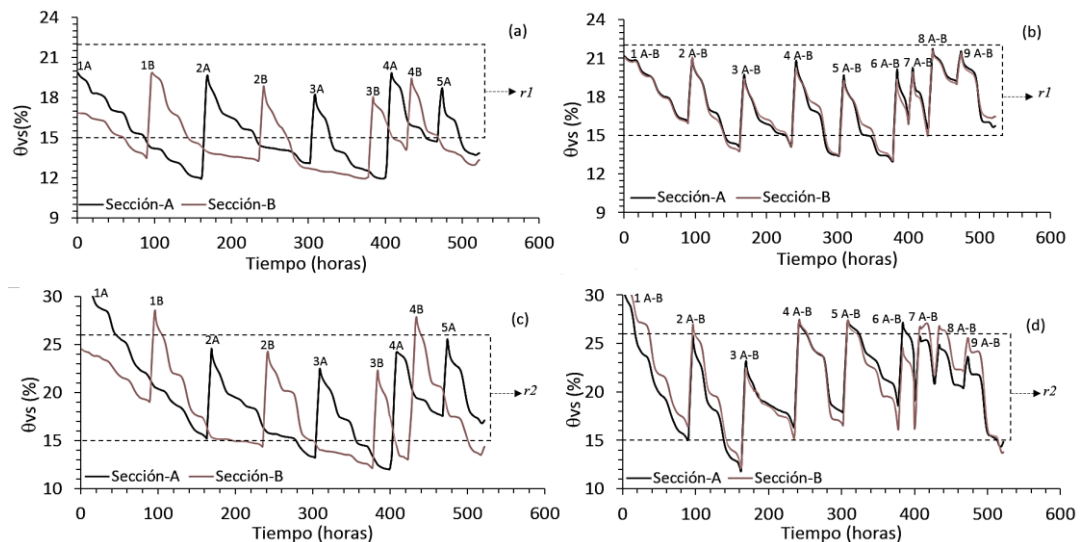


Figura 2. Patrones espacio-temporales (medias móviles de seis horas) de la humedad volumétrica del suelo (θ_{vs}), generados por los nueve riegos aplicados en las secciones A y B de los maceteros de respuesta hidrogravitrópica, monitoreados con el sensor EC-5 en los tratamientos RPR300 (a), RC300 (b), RPR500 (c), y RC500 (d); donde $r1$ y $r2$ representan los rangos de la fracción transpirable del suelo.

La Figura 4 representa el volumen total de agua empleado en los cuatro tratamientos (37600 ml distribuidos en ocho riegos para la germinación de la semilla y estimulación de los primordios de las raíces laterales para que en el inicio de su desarrollo eviten el vector gravitatorio; más las nueve aplicaciones de los riegos de tratamientos); distribuidos en mayor porcentaje (34,6%) para RC500 (control), de acuerdo a la capacidad hídrica del suelo definida con la curva de retención agua-suelo (Figura 3).

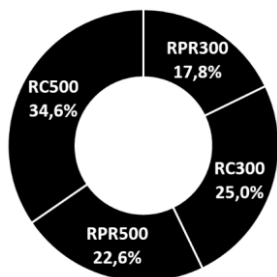


Figura 4. Distribución porcentual del volumen total de agua utilizada en los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego completo (RC300 y RC500).

El tratamiento donde se empleó menor cantidad de agua correspondió a RPR300 con 17,8%, equivalente al 51,5% del total empleado en el control; asimismo, en RC300 y RPR500 se utilizaron un total de 9,4 (25,0%) y 8,5 (22,6%) litros respectivamente; representando una reducción de 27,7% y 34,6% con respecto al control.

En la Tabla 1 se observa la evolución del potencial xilemático antes de la aplicación del riego ($\Psi_{x_{ar}}$) y 24 horas después de este evento ($\Psi_{x_{24dr}}$). El tratamiento RPR300 fue el que mostró los valores más cercanos al potencial xilemático letal (-15 bar) para esta especie en el momento previo a la aplicación del riego, los mismos que fluctuaron entre -10,42 y -8,08 bar; sin embargo, comparado con el tratamiento RPR500 no se observaron diferencias estadísticas entre ambos durante todo el periodo de evaluación; mientras tanto, el tratamiento RC500 mostró los niveles más óptimos de este parámetro con fluctuaciones que variaron desde -7,00 hasta -5,17 bar en el momento antes de aplicar riego.

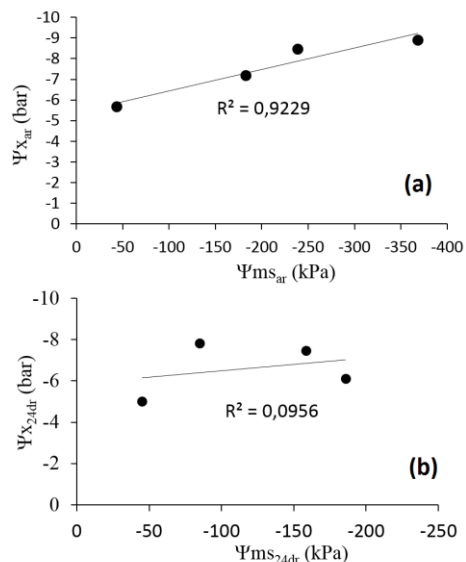


Figura 5. Relación promedio del potencial xilemático de la hoja de frijol común antes del riego ($\Psi_{x_{ar}}$, a) y 24 horas después del riego ($\Psi_{x_{24dr}}$, b) con el potencial matricial del suelo $\Psi_{ms_{ar}}$ y $\Psi_{ms_{24dr}}$, respectivamente.

Esto puede afirmar que el Ψ_x de las plantas de frijol común se mantuvo dentro de un rango que no afectó su estatus hídrico, considerando que para algunas especies de plantas los procesos fisiológicos básicos se mantienen con un aceptable desempeño hasta los -10 bares (Bradford y Hsiao, 1982). En la Tabla 1 también se observa que el momento de la aplicación del riego fue realizado cuando el $\Psi_{x_{ar}}$ se encontraba por encima de este valor; por lo tanto, mientras se controlen los niveles de este parámetro las plantas pueden considerarse adecuadamente irrigadas (Abrisqueta *et al.*, 2015).

En la Figura 5a (superior) se observa la dependencia promedio que adquiere el Ψ_x del frijol común con el Ψ_{ms} ($R^2 = 0,92$), situación que corresponde a los momentos cuando la humedad del suelo está en proceso de agotamiento y se aleja de los niveles de disponibilidad adecuada para las plantas (según los rangos en la curva de retención agua-suelo, Figura 3); por lo tanto, el estado hídrico de la planta es controlado exclusivamente por los niveles de Ψ_{ms} .

Tabla 1

Potencial xilemático (bar) en la hoja de frijol común antes del riego (Ψ_{Xar}) y 24 horas después del riego (Ψ_{X24dr}), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego completo (RC300 y RC500)

Ttos	Ψ_{Xar} 14 ¹	Ψ_{X24dr} 15	Ψ_{Xar} 17	Ψ_{X24dr} 18	Ψ_{Xar} 20	Ψ_{X24dr} 21	Ψ_{Xar} 26	Ψ_{X24dr} 27
RPR	-8,08	-6,50	-8,57	-7,25	-8,58	-7,50	-10,42	-8,65
300	±0,22a	±0,14a	±0,07a	±0,14b	±0,08a	±0,14 ^a	±0,08a	±0,08b
RC	-6,00	-5,67	-6,60	-5,58	-6,25	-5,58	-9,92	-7,58
300	±0,00b	±0,08b	±0,06b	±0,08c	±0,14b	±0,08b	±0,08b	±0,08c
RPR	-7,33	-6,67	-8,27	-7,67	-8,35	-7,92	-9,92	-9,00
500	±0,17a	±0,08a	±0,15a	±0,08a	±0,08a	±0,08 ^a	±0,08b	±0,00a
RC	-5,33	-4,77	-5,22	-4,75	-5,17	-4,65	-7,00	-5,83
500 ²	±0,17c	±0,02c	±0,15c	±0,03d	±0,17c	±0,08c	±0,00c	±0,08d
\bar{X}	-6,69	-5,90	-7,17	-6,31	-7,09	-6,41	-9,32	-7,77
p	***	***	***	***	***	***	***	***
CV (%)	4,70	2,80	2,97	2,04	3,14	2,83	1,34	1,09

¹Días de evaluación en el mes de noviembre de 2014. ²Tratamiento control. Cada valor representa la media ± error estándar (n = 3). Medias con una letra distinta son significativamente diferentes según el test de Tukey (p: nivel de significación, *p ≤ 0,05, **p ≤ 0,01, ***p ≤ 0,001). CV: coeficiente de variación. Ttos: Tratamientos.

Sin embargo, 24 horas después de aplicar el riego (Figura 5b, inferior) y conseguir incrementos adecuados en los niveles de humedad del suelo, el Ψ_{ms} deja de intervenir en el control el estado hídrico de las plantas, de esta forma, se asegura que el factor controlador del Ψ_x del frijol dependa exclusivamente de las condiciones atmosféricas, tal como lo refleja el bajo valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,1$), efecto que también ha sido comentado por Millar (1993) para otras especies.

En el mismo contexto, García *et al.* (2010) también observaron que al relacionar las variables de Ψ_x y Ψ_{ms} en el cultivo de sorgo (*Sorghum* spp.), el coeficiente de determinación se incrementaba al disminuir la humedad del suelo en niveles cercanos a la provocación de un déficit hídrico en las plantas. Asimismo, Trincado (2005) y Aguirre (2008) encontraron que la relación entre estas dos variables en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.) cv. Hass, no estaba asociada al estado hídrico de la planta cuando el suelo se encuentra en condiciones de humedad adecuada.

Considerando que el frijol común y las vides (*Vitis vinifera*) comparten el valor del potencial xilemático letal (Pimentel,

2004), según la escala de valores de conductancia estomática (Greenspan, 2000) para este último cultivo (Figura 6); las plantas de frijol común experimentaron variaciones desde condiciones de estrés moderado ($>100 \text{ mmol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el tratamiento RPR300 (antes de aplicar el riego), hasta valores de conductancia estomática que se traducen en condiciones de transpiración de lujo ($>300 \text{ mmol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$), principalmente en el tratamiento RC500 (24 horas después del riego) entre el periodo que comprendió después de la floración hasta el final del experimento (Tabla 2).

En la Tabla 2 también se observa que las plantas del tratamiento RC300 fueron las únicas donde la conductancia estomática pasaba del rango óptimo (antes del riego) al de transpiración de lujo (24 horas después del riego), mientras que el tratamiento RPR500 ligeramente incrementaba sus valores a la condición de transpiración de lujo 24 después de aplicar el riego (situación que disminuía en el transcurso del tiempo).

Fernández *et al.* (2014) indican que tanto las variaciones del Ψ_x como de la g_s , están influenciadas directa o indirectamente por las variables ambientales y las propiedades del suelo; así mismo, se puede afirmar que

las fluctuaciones de humedad en el suelo (Figuras 2 y 3) originaron en las raíces el desencadenamiento de señales hidráulicas, que se transportaron por la corriente xilemática y fueron detectadas en las mediciones del potencial xilemático de la hoja; principalmente en el tratamiento RPR500, que a pesar de los bajos Ψ_x mantuvieron a las plantas con óptimos valores de conductancia estomática. Por otro lado, Davies *et al.* (2000), Stoll *et al.* (2000), y Holbrook *et al.* (2002) en investigaciones de cultivos bajo riegos reducidos, también atribuyeron que la disminución de la conductancia estomática en las hojas se debió a la activación de señales químicas en las raíces de las plantas expuestas a suelo sin riego por un periodo determinado; en este sentido, Prado y Maurel (2013) afirman que todo el proceso de regulación del sistema hídrico de las plantas es controlado por las hojas.

En general se puede decir que las plantas de frijol respondieron con una disminución de la conductancia estomática en todos los tratamientos antagonistas, debido principalmente porque el menor volumen de agua aplicado redujo el valor del punto crítico (θ_{vsc}) en el rango del agua aprovechable para las plantas (Figura 2), tal como ha sido demostrado en la determinación de la fracción de agua transpirable del suelo para papa (*Solanum tuberosum* L.) y yuca (*Manihot esculenta* Crantz) por Lago (2011).

En el mismo sentido, Álvarez *et al.* (2009) indican que, frente a una situación de reducción del contenido de agua en el suelo, la mayoría de las plantas responden con una caída de la conductancia estomática como consecuencia de un descenso de los niveles de la energía libre del agua en los tejidos foliares, es decir, de un descenso en el potencial hídrico de las hojas.

Tabla 2

Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en la hoja de frijol común antes del riego ($g_{s,ar}$) y 24 horas después del riego ($g_{s,24dr}$), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego completo (RC300 y RC500)

Ttos	$g_{s,ar}$ 14 ¹	$g_{s,24dr}$ 15	$g_{s,ar}$ 17	$g_{s,24dr}$ 18	$g_{s,ar}$ 20	$g_{s,24dr}$ 21	$g_{s,ar}$ 26	$g_{s,24dr}$ 27
RPR	120,77	256,87	128,80	258,05	123,65	252,42	101,82	151,73
300	$\pm 1,26a$	$\pm 12,47a$	$\pm 4,47a$	$\pm 12,56a$	$\pm 2,69a$	$\pm 6,73a$	$\pm 1,78a$	$\pm 1,44a$
RC	245,02	503,95	247,55	500,63	242,62	500,35	206,50	307,80
300	$\pm 2,11b$	$\pm 2,85c$	$\pm 2,77b$	$\pm 8,60c$	$\pm 3,59b$	$\pm 7,03c$	$\pm 2,12b$	$\pm 1,00b$
RPR	268,67	360,27	274,33	357,50	269,92	357,73	217,18	320,68
500	$\pm 4,60c$	$\pm 6,60b$	$\pm 2,94c$	$\pm 6,79b$	$\pm 2,08c$	$\pm 5,58b$	$\pm 3,12b$	$\pm 1,27c$
RC	553,60	700,42	557,78	688,78	549,98	681,22	505,40	543,35
500 ²	$\pm 5,73d$	$\pm 6,58d$	$\pm 9,97d$	$\pm 7,17d$	$\pm 6,49d$	$\pm 11,36d$	$\pm 4,26c$	$\pm 1,11d$
\bar{X}	297,02	455,38	302,12	451,24	296,54	447,93	257,73	330,89
p	***	***	***	***	***	***	***	***
CV (%)	2,28	3,47	2,93	2,01	2,42	2,51	1,90	0,66

¹Días de evaluación en el mes de noviembre de 2014. ²Tratamiento control. Cada valor representa la media \pm error estándar ($n = 3$). Medias con una letra distinta son significativamente diferentes según el test de Tukey (p : nivel de significación, * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, *** $p \leq 0,001$). CV: coeficiente de variación. Ttos: Tratamientos.

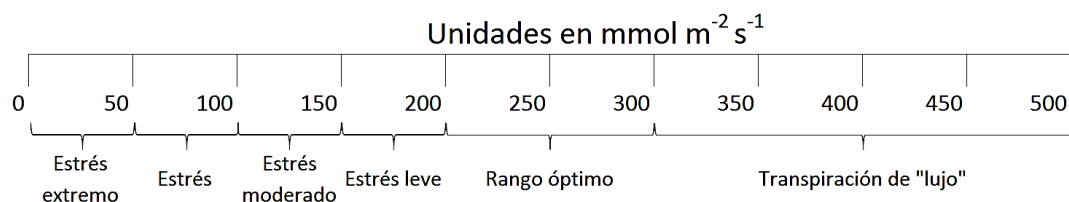


Figura 6. Escala referencial de valores de conductancia estomática para definir niveles de transpiración.

Aun así, con bajos niveles de potencial xilemático en el tratamiento RPR500, los valores de conductancia estomática indican que las plantas de frijol común se mantuvieron dentro del rango de condiciones hídricas óptimas.

4. Conclusiones

La capacidad del sistema de respuesta hidrogravitropica para aislar y mantener simultáneamente dos diferentes niveles de humedad en el suelo, facilitó el manejo del riego parcial de raíces en las plantas de frijol común. La disminución del volumen de agua aplicado influyó en la reducción del potencial xilemático, principalmente, en los tratamientos con riego parcial de raíces; sin embargo, las plantas lograron mantenerse en condiciones hídricas no letales (<-15 bar), al igual que aquellas bajo riego completo.

La transpiración de lujo observada en los valores de la conductancia estomática del tratamiento control, demuestra que estuvo asociada a una posible sobrestimación del límite crítico (θ_{vsc}) para la definición del agua aprovechable para las plantas en el sustrato utilizado.

Considerando los beneficios que ofrece el empleo de sistemas de respuesta hidrogravitropica para el riego parcial de raíces, se recomienda en el futuro utilizar sustratos con características opuestas en las secciones correspondientes del macetero para estudiar el comportamiento de las variables consideradas en este trabajo.

Agradecimientos

El primer autor agradece a SENESCYT-Ecuador por la beca 2013-AR4P139 otorgada para los estudios en el PDRH-UNALM (Lima-Perú), a la Universidad Técnica de Manabí (Ecuador) por el financiamiento de la bomba Schölander y el porómetro a través del proyecto 2012-026IIC, y al Ing. Galo Cedeño García M.Sc. por el apoyo en la implementación del experimento.

Referencias bibliográficas

- Abriquetsa, I.; Conejero, W.; Valdés-Vela, M.; Vera, J.; Ortuño, M.; Ruiz-Sánchez, M. 2015. Stem water potential estimation of drip-irrigated early-maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Computers and Electronics in Agriculture* 114: 7-13.
- Aguirre, C. 2008. Relación planta-agua en paltos (*Persea American Mill*) cv. Hass. Memoria de título de ingeniero civil agrícola, Universidad de Concepción, Chillán-Chile, 95 p.
- Álvarez, S.; Navarro, A.; Bañón, S.; Sánchez-Blanco, M. 2009. Regulated deficit irrigation in potted *dianthus* plants: effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Scientia Horticulturae* 122: 579-585.
- Baratto, C.; Faglia, G.; Pardo, M.; Vezzoli, M.; Boarino, L.; Maffei, M.; Bossi, S.; Sberveglieri, G. 2005. Monitoring plants health in greenhouse for space missions. *Sensors and Actuators* 108: 278-284.
- Behboudian, M.; Singh, Z. 2001. Water relations and scheduling in grapevine. *Horticultural Reviews* 27: 189-225.
- Bittelli, M.; Flury, M. 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal* 73(5): 1453-1460.
- Bradford, K.; Hsiao, T. 1982. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant Physiology* 70(5): 1508-1513.
- Brinckmann, E. 2005. ESA hardware for plant research on the International Space Station. *Advances in Space Research* 36: 1162-1166.
- Camarena, F.; Huaringa, A.; Mostacero, E. 2009. Tecnología para el incremento de la producción de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Primera edición. Universidad Nacional Agraria La Molina – Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. 232 p.
- Chamú, J.; López, A.; Ramírez, C.; Trejo, C.; Martínez, E. 2011. Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de la raíz en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 97-110.
- Comstock, J. 2002. Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany* 53: 195-200.
- Cuéllar, S.; Covarrubias, A. 2005. Alternativas para enfrentar la sequía en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Claridades Agropecuarias* 142: 32-41.
- De Pascale, S.; Costa, L.; Vallone, S.; Barbieri, G.; Maggio, A. 2011. Increasing water use efficiency in vegetable crop production: from plant to irrigation systems efficiency. *HortTechnology* 21(3): 301-308.
- Dauzart, A.; Vandenbrink, J.; Kiss, J. 2016. The effects of clinorotation on the host plant, *Medicago truncatula*, and its microbial symbionts. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 3(1): 1-10.
- Davies, J.; Bacon, A.; Thompson, S.; Sobeih, W.; Rodríguez, G. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. *Journal of Experimental Botany* 51: 1617-1626.
- Dener, E.; Kacelnick, A.; Shemesh, H. 2016. Pea plants show risk sensitivity. *Current Biology* 26(13): 1763-1767.
- FAO (Food and agriculture organization of the United Nations). 2015. 2050: la escasez de agua en varias zonas del mundo amenaza la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/283264/icode/>
- Ferl, R.; Wheeler, R.; Levine, H.; Paul, A. 2002. Plants in space. *Current Opinion in Plant Biology* 5: 258-263.

- Fernández, G.; Melgarejo, L.; Rodríguez, N. 2014. Algunos aspectos de la fotosíntesis y potenciales hídricos de la granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) en estado reproductivo en el Huila, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 8(2): 206-216.
- Fernández, J.; Díaz-Espejo, A.; Infante, J.; Durán, P.; Palomo, J.; Chamorro, V.; Girón, I.; Villagarcía, L. 2006. Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil* 284: 273-291.
- García, A.; Cun, R.; Montero, L. 2010. Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(3): 7-11.
- Gomes, G.; Moritz, A.; Freiria, G.; Furlan, F.; Assari, L. 2016. Desempenho produtivo de genótipos de feijão-vagem arbustivo em dois ambientes. *Scientia Agropecuaria* 7(2): 85-92.
- Greenspan, M. 2000. Using the leaf porometer in grapes. *Advanced Viticulture*. Disponible en: http://www.advancedvit.com/Using_the_leaf_porometer_in_grapes.pdf
- Guo, X.; Liu, X.; Ai, W.; Tang, Y.; Zhu, J.; Wang, X.; Wei, M.; Qin, L.; Yang, Y. 2008. Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility. *Advances in Space Research* 41: 736-741.
- Holbrook, N.; Shashidar, R.; James, A.; Munns, R. 2002. Stomatal control in tomato with ABA-deficient roots: response of grafted plants to soil drying. *Journal of Experimental Botany* 53: 1503-1514.
- Hublitz, I.; Henninger, D.; Drake, B.; Eckart, P. 2004. Engineering concepts for inflatable Mars surface greenhouses. *Advances in Space Research* 34: 1546-1551.
- Jiménez, J.; Acosta, J. 2013. Rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y Tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo el método riego-sequía en Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(4): 557-567.
- Kamaljit, S. 2014. Modern agricultural practices and analysis of socio-economic and ecological impacts of development in agriculture sector, Punjab, India - A review. *Indian J. Agric. Res.* 48(5): 331-341.
- Khlosi, M.; Cornelis, W.; Douaik, A.; Martinus, Th.; Gabriels, D. 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadose Zone Journal* 7:86-97.
- Kiss, J.; Kumar, P.; Millar, K.; Edelmann, R.; Correll, M. 2009. Operations of a spaceflight experiment to investigate plant tropisms. *Advances in Space Research* 44: 879-886.
- Lago, I. 2011. Transpiração e crescimento foliar de clones de batata e de mandioca em resposta à fração de água transpirável no solo. Tesis doctoral en ingeniería agrícola. Universidad Federal de Santa María, Santa María, RS-Brasil. 92 p.
- López-Ordaz, A.; Trejo-López, C.; Peña-Valdivia, C.; Ramírez-Ayala, C.; Tijerina-Chávez, L.; Carrillo-Salazar, J. 2008. Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agricultura Técnica en México* 34(3): 297-302.
- Millar, A. 1993. Manejo de agua y producción agrícola. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, oficina en Chile. 556 pp.
- Monje, O.; Stutte, G.; Goins, G.; Porterfield, D.; Bingham, G. 2003. Farming in space: environmental and biophysical concerns. *Advances in Space Research* 31(1): 151-167.
- Moriwaki, T.; Miyazawa, Y.; Kobayashi, A.; Takahashi, H. 2013. Molecular mechanisms of hydrotropism in seedling roots of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae). *American Journal of Botany* 100(1): 25-34.
- Morrow, R.; Bula, R.; Tibbitts, T.; Dinauer, W. 1994. The ASTROCULTURETM flight experiment series, validating technologies for growing plants in space. *Advances in Space Research* 14(11): 29-37.
- Nunes, R.; Mazzei, F.; Oliveira, A.; Corrêa da Silva, B.; Massi, T.; de Menezes, M.; Fernandes, E.; Michael, D.; Camprostrini, E. 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. *Scientia Horticulturae* 183: 13-22.
- Pardossi, A.; Incrocci, L.; Incrocci, G.; Malorgio, F.; Battista, P.; Bacci, L.; Rapi, B.; Marzalletti, P.; Hemming, J.; Balendonck, J. 2009. Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. *Sensors* 9: 2809-2835.
- Pimentel, C. 2004. A relação da planta com a água. EDUR -Editora Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-, Soropédica-RJ. 191 pp.
- Prado, K.; Maurel, C. 2013. Regulation of leaf hydraulics: from molecular to whole plant levels. *Frontiers in Plant Science* 4(255): 1-14.
- Puértolas, J.; Conesa, M.; Ballester, C.; Dodd, I. 2015. Local root abscisic acid (ABA) accumulation depends on the spatial distribution of soil moisture in potato: implications for ABA signalling under heterogeneous soil drying. *Journal of Experimental Botany* 6(8): 2325-2334.
- Robbins, N.; Dinneny, J. 2015. The diving root: moisture-driven responses of roots at the micro- and macro-scale. *Journal of Experimental Botany* 66(8): 2145-2154.
- Romero, P.; Pérez-Pérez, J.; del Amor, F.; Martínez-Cutillas, A.; Dodd, I.; Botía, P. 2014. Partial root zone drying exerts different physiological responses on field-grown grapevine (*Vitis vinifera* cv. Monastrell) in comparison to regulated deficit irrigation. *Functional Plant Biology* 41(11): 1087-1106.
- Romero, P.; Martínez-Cutillas, A. 2012. The effects of partial root-zone irrigation and regulated deficit irrigation on the vegetative and reproductive development of field-grown Monastrell grapevines. *Irrigation Science* 30(5): 377-396.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT® v9.1. User's Guide. Cary, NC.
- Sepaskhah, A.; Ahmadi, S. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*, 4(4): 241-258.
- Stoll, M.; Loveys, R.; Dry, R. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51: 1627-1634.
- Tan, C.; Wang, H.; Zhang, Y.; Qi, B.; Xu, G.; Zheng, H. 2011. A proteomic approach to analyzing responses of *Arabidopsis thaliana* root cells to different gravitational conditions using an agravitropic mutant, pin2 and its wild type. *Proteome Sciences* 9(72): 1-16.
- Thomas, G. 2014. Why crop yields in developing countries have not kept pace with advances in agronomy. *Global Food Security* 3: 49-58.
- Trincado, J. 2005. Relaciones agua-planta en paltos (*Persea American Mill*) cv. Hass, sector Peumo, provincia Cachapoal, VI región. Memoria de título de ingeniero civil agrícola. Universidad de Concepción, Chillán-Chile, 80 p.

- Vega, E. 2017. Desempeño del frijol común bajo riego parcial de raíces en un sistema de respuesta hidrogravitropica selectiva. Tesis doctoral en recursos hídricos. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú, 122 pp.
- Wakrim, R.; Wahbi, S.; Tahi, H.; Aganchich, B.; Serraj, R. 2005. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Agriculture, Ecosystems & Environment 106: 275-287.
- Yan, F.; Yanq, S.; Song, F.; Liu, F. 2012. Differential responses of stomatal morphology to partial root-zone drying and deficit irrigation in potato leaves under varied nitrogen rates. Scientia Horticulturae 145: 76–83.
- York, L.; Nord, E.; Lynch, J. 2013. Integration of root phenes for soil resource acquisition. Frontiers in Plant Science 4: 1-15.
- Zegbe, J.; Behboudian, M.; Lang, A.; Clothier, B. 2006. Responses of ‘Petopride’ processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. Irrigation Science 24: 203-210.