

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“DESEMPEÑO DEL FRIJOL COMÚN BAJO RIEGO PARCIAL DE
RAÍCES EN UN SISTEMA DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA
SELECTIVA”**

Presentada por:

EMIL CRISTHIAN VEGA PONCE

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE *DOCTORIS PHILOSOPHIAE*
EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima – Perú
2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS

**“DESEMPEÑO DEL FRIJOL COMÚN BAJO RIEGO PARCIAL DE
RAÍCES EN UN SISTEMA DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA
SELECTIVA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

Doctoris Philosophiae (Ph.D.)

Presentada por:

EMIL CRISTHIAN VEGA PONCE

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
PRESIDENTE

Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco
PATROCINADOR

Ph. D. Eduardo Chávarri Velarde
MIEMBRO

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo
MIEMBRO

Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

A mi esposa Patricia y mi hijo Emilio Jesús por su infinito amor, ánimo, paciencia y comprensión.

A mis padres Leonardo y Elina por todo.

A mis hermanos.

"ex nihilo nihil fit"

Parménides

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza y la luz en esta ruta que me propuso para la adquisición de nuevos conocimientos.

Al prestigioso Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (PDRH-UNALM), por la calidez y calidad de su talento humano administrativo y académico.

A la Universidad Técnica de Manabí por el financiamiento de la bomba Schölander y el porómetro, a través del proyecto de investigación 2012-026IIC.

A SENESCYT-Ecuador por el financiamiento de mis estudios, a través de la beca 2013-AR4P139.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Agricultura primitiva y temprana	5
2.2. Agricultura contemporánea y moderna.....	6
2.3. Agua dulce y recursos hídricos.....	7
2.4. Productividad del agua	8
2.5. El agua en las plantas	9
2.6. Principales mecanismos para el control de la pérdida de agua en plantas.....	10
2.7. Disponibilidad del agua del suelo para las plantas	11
2.8. Técnicas de riegos reducidos.....	13
2.9. Riego Deficitario Controlado (RDC).....	14
2.10. Riego Parcial de Raíces (RPR).....	14
2.11. Algunas motivaciones e instrumentos para el estudio del sistema radicular de las plantas.	15
2.12. Respuestas de las raíces de las plantas a los estímulos provocados por el campo gravitacional terrestre (gravitropismo) y los gradientes de humedad del suelo (hidrotropismo)..	17
2.13. El cultivo de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1. Localización del experimento.....	19
3.2. Diseño del sistema de respuesta hidrogravitrópica selectiva	20
3.3. Diseño del experimento.....	20
3.4. Construcción de la curva de retención agua-suelo.....	22
3.5. Determinación del volumen de agua de riego a aplicar para llevar el suelo a capacidad de campo	24
3.6. Medición del potencial hídrico xilemático en la hoja del frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva	25
3.7. Medición de la conductancia estomática en la hoja del frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva	26
3.8. Construcción de la curva presión-volumen (P-V) en hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva....	26
3.9. Determinación del módulo de elasticidad (ϵ_v) del tejido de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva	28

3.10. Determinación de la productividad del agua en las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva	29
3.11. Montaje del experimento.....	29
3.12. Análisis de datos	32
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. Diseño del macetero con geometría acondicionada a la distribución del sistema radicular, considerando los movimientos orientativos que el estímulo hidrogravitrópico provoca sobre las raíces de las plantas de frijol común.....	33
4.2. Desempeño del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva respecto a la aplicación del agua con riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC) en plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	40
4.3. Potencial hídrico xilemático en frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, respecto a la aplicación del agua con riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC)	51
4.4. Conductancia estomática en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, respecto a la aplicación del agua con riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC).....	56
4.5. Dinámica de las relaciones hídricas en la hoja del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L) bajo riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC), en un sistema de respuesta hidrogravitrópica	63
4.6. Productividad del agua en frijol común, cultivado en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo riego convencional y riego parcial de raíces	68
V. CONCLUSIONES	72
VI. RECOMENDACIONES.....	75
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
VIII. ANEXOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto

Figura	Contenido	Pág.
Figura 2.1	Esquema del diagrama de Höfler representando la dinámica de los potenciales Ψ hídrico, Ψ osmótico y Ψ turgor durante la pérdida de agua en el tejido de una hoja de frijol común: a) situación de la célula en estado turgente y b) situación de la célula en estado de plasmólisis (punto de no retorno aunque se practique el riego, por pérdida de elasticidad de la pared celular).	11
Figura 2.2	Representación la curva de retención agua-suelo con los límites máximo (θ_{CC} , capacidad de campo) y mínimo (θ_{PMP} , punto de marchitez permanente) del nivel de humedad aprovechable para las plantas, con un punto intermedio (θ_{vsx}) que representa el límite o punto crítico de la fracción de agua transpirable del suelo (FATS) para un cultivo x en un suelo de textura arcillosa (arcilla 50%, limo 30%, arena 20%).	13
Figura 2.3	Representación esquemática del riego deficitario controlado (RDC).	14
Figura 2.4	Representación esquemática del riego parcial de raíces (RPR).	15
Figura 3.1	Ubicación (pin) del espacio donde se desarrolló el experimento en las instalaciones del PDRH-UNALM campus La Molina (Captura de Google Maps, septiembre 2016).	19
Figura 3.2	Instrumentación (Decagon Devices® USA) para el monitoreo de los parámetros que permitieron la construcción de la curva de retención agua-suelo: sensor para medir el potencial matricial del suelo (MPS-6, kPa) y su data logger Em50; y el sensor EC-5 para monitoreo de la humedad volumétrica del suelo (%) y su data logger Em5b.	22
Figura 3.3	Preparación de las hojas en las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva (izquierda), para la medición del potencial hídrico xilemático en la bomba Schölander (modelo 3005F01 de Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara, California-USA) (derecha).	25
Figura 3.4	Porómetro de estado estacionario SC-1 (Decagon Device USA) (izquierda) para el monitoreo de la conductancia estomática en hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva (derecha).	26
Figura 3.5	Diferentes etapas del montaje y desarrollo del experimento en el área de demostrativa del PDRH-UNALM.	31

Figura 4.1	<p>Perspectiva del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva para la aplicación del riego parcial de raíces (RPR) en plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), diseñado bajo una geometría adaptada a los movimientos de orientación tridimensional que el gravitropismo e hidrotropismo provocan sobre el sistema radicular. Se destacan sus dos SDRL (secciones de desarrollo de raíces laterales y aplicación del riego, para cada lado identificados como A y B), y el CGPRL (compartimiento de germinación de la semilla, iniciación del crecimiento radicular y posicionador de las raíces laterales-principal). Sin escala.</p>	35
Figura 4.2	<p>Vista ortogonal del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva, desde la SDRL-B (según la Figura 4.1); donde se aprecia la ubicación del CGPRL (compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento y posicionador de las raíces laterales-principal) con sus respectivas partes [cama de germinación, distribución de la red de orificios de salida de las raíces laterales (56 OSRL/SDRL) y sección inferior del CGPRL]. Escala 1:4.</p>	36
Figura 4.3	<p>Compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento y posicionador de las raíces laterales (CGPRL) instalado en el interior del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva; donde raíces laterales de frijol común salen por la red de orificios hacia las SDRL A-B (<i>a</i> y <i>c</i>, respectivamente). Planta de frijol común extraída del macetero (con la raíz principal encapsulada en el interior del CGPRL y las raíces laterales fuera de él), con todas sus partes desarrolladas y completas (<i>b</i>).</p>	37
Figura 4.4	<p>Proyecciones ortogonales del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva [lateral izquierda (arriba) e inferior (abajo), según la Figura 4.1], donde se aprecian las posiciones de los elementos que controlan y mantienen niveles adecuados de humedad del suelo en ambas SDRL, para permitir la aplicación y manejo del RPR (<i>a</i>, base de descanso del CGPRL; <i>b</i>, base de las SDRL; <i>c</i>, puntos de drenaje). Escala 1:4.</p>	39
Figura 4.5	<p>Medias móviles de seis horas del monitoreo (con el sensor EC-5) de los hidropatrones formados en el suelo, producto de la aplicación de nueve riegos (después de la floración del frijol común, 32 dds), en las SDRL A y B del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva, en los tratamientos con RPR300 (<i>a</i>), RC300 (<i>b</i>), RPR500 (<i>c</i>), RC500 (<i>d</i>).</p>	41
Figura 4.6	<p>Curva de retención agua-suelo (con los parámetros del modelo de Campbell 0.485 y 3.296), generada a partir de datos tomados con los sensores MPS-6 y EC-5 (Decagon Devices®) siendo <i>a</i> (68.8 por ciento, $\theta_{vs500}-\theta_{vsx}$) y <i>b</i> (63.4 por ciento finales de <i>a</i>, $\theta_{vs300}-\theta_{vsx}$) los rangos de agua transpirable por las plantas en el sustrato utilizado, para los tratamientos donde se aplicaron 0.3 L y 0.5 L respectivamente..</p>	42

Figura 4.7	Evolución de la distribución relativa del potencial matricial del suelo (Ψ_{ms}) entre las SDRL-A y SDRL-B bajo los cuatro tratamientos de riego (RPR300, RC300, RPR300 y RPR500) en los días 14, 15, 17, 18, 20, 21, 26 y 27 de noviembre del 2014 antes (ar) y 24 horas después de aplicar riego (dr).	44
Figura 4.8	Distribución porcentual del volumen total de agua suministrada en la irrigación de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva [37.6 litros 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 atenúen la influencia del vector gravitatorio; y nueve aplicaciones en los tratamientos de riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500)].	45
Figura 4.9	Presencia de raíces laterales de frijol común (con longitudes comprendidas entre 47.0 cm y 48.7 cm) en los cuatro tratamientos de riego, en función de las SDRL A-B del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva: a) número de raíces laterales (NRL) presentes en los OSRL y b) continuidad de raíces laterales (NRL/l).	46
Figura 4.10	Identificación de la ubicación de tres secciones en el eje longitudinal del CGPRL, donde los OSRL presentaron raíces laterales de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) con longitudes promedios entre 47.0-48.7 cm. Sección 1 entre las filas 1-8 con 32 OSRL en ambas SDRL para RPR300, sección 2 entre las filas 1-9 con 36 OSRL en ambas SDRL para RPR500 y RC 300, y sección 3 entre las filas 1-14 con 56 OSRL en ambas SDRL para RC500) (a). Distribución del porcentaje de la concentración de salida de raíces laterales de frijol común para cada sección del CGPRL en función de los cuatro tratamientos de riego (b).	49
Figura 4.11	Promedios de la amplitud del potencial hídrico xilemático ($\Delta\Psi_h$), en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), obtenido de las diferencias entre las mediciones realizadas antes y 24 horas después de aplicar el riego, en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500).	53
Figura 4.12	Promedios del potencial hídrico xilemático (Ψ_h) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) medidos al medio día (durante ocho días de evaluación), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	54

Figura 4.13	Relación del potencial hídrico xilemático de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) antes del riego (Ψ_{har} , superior) y 24 horas después del riego (Ψ_{h24dr} , inferior) con el potencial matricial del suelo en el mismo momento (Ψ_{msar} , y Ψ_{ms24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva.	55
Figura 4.14	Relación de la conductancia estomática de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) antes del riego (g_{sar} , superior) y 24 horas después del riego (g_{s24dr} , inferior), con el potencial matricial del suelo en el mismo momento (Ψ_{msar} , y Ψ_{ms24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva.	58
Figura 4.15	Relación de la conductancia estomática de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) antes del riego (g_{sar} , superior) y 24 horas después del riego (g_{s24dr} , inferior), con el potencial hídrico xilemático del mismo momento (Ψ_{har} , y Ψ_{h24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva.	59
Figura 4.16	Producción de vainitas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) con longitudes entre 10 y 14 cm, cosechadas en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva, bajo riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500).	68

En anexo 1

Figura	Contenido	Pág.
Figura 1	Vista en planta (superior) y lateral (inferior) de imágenes generadas en MicroCT del crecimiento de raíces de maíz en un sustrato de suelo: a) la raíz principal está creciendo de forma vertical en un espacio donde una sección de su eje está en contacto con el suelo húmedo y otra con el aire, y solo emite raíces laterales en la sección en adyacente al suelo húmedo. b) la raíz principal emite raíces laterales alrededor de todo su eje vertical porque está en contacto con el suelo húmedo. c) la raíz principal está creciendo prácticamente en el aire y apenas logra emitir raíces laterales.	97
Figura 2	Medición del diámetro del eje polar de la semilla de frejol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Var. Red Klaud para el diseño de la cama de germinación en el CGPRL.	97

Figura 3	Configuración del macetero propuesto por Puértolas et al. (2015) utilizado para aplicación de riego parcial de raíces (RPR) en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.). El área gris representa el compartimento húmedo y el negro el compartimento seco donde crecen las raíces laterales; la sección central donde crece la raíz principal, y de aspecto granuloso representa una capa de grava que separa los compartimentos húmedo y seco. También se representan las ubicaciones de los sensores para medir la humedad del suelo (semi-círculos negro).	98
Figura 4	Saturación con agua del suelo contenido en la SDRL (lado izquierdo) del macetero de respuesta hidrogravitropica selectiva para verificar alguna evidencia de transferencia horizontal de humedad hacia la SDRL opuesta (lado derecho).	98
Figura 5	Resumen grafico de la evaluación a la sensibilidad al riesgo (aversión y/o propensión) en el sistema radicular de plantas de arvejas (<i>Pisum sativum</i>) cuando fue dividido en dos partes: Las plantas mostraron "aversión al riesgo", lo que significa que crecieron más raíces en el macetero denominado constante, cuando la concentración media de nutrientes fue constante y suficiente durante todo el experimento. I mostraron "propensión al riesgo", lo que significa que crecieron más raíces en el macetero denominado variable, cuando la concentración media de nutrientes fue impredecible durante todo el experimento.	99
Figura 6	Efectos de la sensibilidad al déficit hídrico de diferentes cultivos reflejados en los valores del potencial hídrico xilemático.	99
Figura 7	Escala referencial de valores de conductancia estomática para definir niveles de transpiración.	100
Figura 8a	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 14-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 15-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.	101
Figura 8b	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 14-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 15-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.	102
Figura 8c	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 17-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 18-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.	103

Figura 8d	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 17-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 18-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.	104
Figura 8e	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 20-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 21-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.	105
Figura 8f	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 20-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 21-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.	106
Figura 8g	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 26-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 27-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.	107
Figura 8h	Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 26-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 27-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.	108
Figura 9	Resultados de análisis químicos en las vainitas de frijol cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	109
Figura 10	Resultados de análisis químicos en las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	110

En anexo 2

Figura	Contenido	Pág.
Figura 1	Curva típica presión-volumen que relaciona el potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) con el peso en una hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) obtenida bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	112
Figura 2	Generación de la ecuación para determinar el peso de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) a máximo turgor con los tres primeros puntos de la curva de la figura 1 bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	113
Figura 3	Potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), en función de su contenido relativo de agua (CRA) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	115
Figura 4	Generación de la ecuación para determinar el potencial osmótico (Ψ_{π}) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) relacionando Ψ_h^{-1} (equivalente a Ψ_{π}^{-1}) y CRA con datos de la sección de la curva de la figura 1 donde se produce el fenómeno de plasmólisis bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	116
Figura 5	Diagrama de Höfler de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014), donde el eje del potencial cruza al eje del CRA en el punto de turgor cero.	119
Figura 6	Potencial osmótico (Ψ_{π}) en función del potencial de turgor (Ψ_t) de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	120
Figura 7	Contenido relativo de agua (CRA) en función del potencial de turgor (Ψ_t) de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	121

ÍNDICE DE CUADROS

En el texto

Cuadro	Contenido	Pág.
Cuadro 3.1	Identificación de los tratamientos utilizados en la evaluación del frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	21
Cuadro 4.1	Potencial hídrico xilemático (bar) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) medido al medio día (Ψ_{har} antes del riego y Ψ_{h24dr} 24 horas después del riego), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	51
Cuadro 4.2	Conductancia estomática ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) medida al medio día (g_{sar} antes del riego y g_{s24dr} 24 horas después del riego), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	56
Cuadro 4.3	Contenidos de nitrógeno (N) y potasio (K) medidos al final de la etapa experimental en las plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500).	62
Cuadro 4.4	Parámetros de la curva presión-volumen en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) antes de la aplicación del riego (ar) y 24 horas después de su aplicación (24dr) de ocho evaluaciones realizadas en los cuatro tratamientos con riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	67
Cuadro 4.5	Productividad del agua de riego medida como Eficiencia del Uso del Agua (EUA), Eficiencia del Uso del Agua en Vainitas ($\text{EUA}_{\text{vainitas}}$), Eficiencia de Producción de Vainitas (EPV) y Eficiencia de Concentración de Proteínas en plantas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo RPR y RC, cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.	69

En anexo 1

Cuadro	Contenido	Pág.
Cuadro 1	Clasificación aproximada del estado energético del agua del suelo y su significado fisiológico en el cultivo del frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).	111

En anexo 2

Cuadro	Contenido	Pág.
Cuadro 1	Peso Fresco (PF) de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) obtenido con la balanza analítica AND EJ-200 (d=0.01g) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	114
Cuadro 2	Contenido Relativo de Agua (CRA) de la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	114
Cuadro 3	Potencial hídrico xilemático ajustado (Ψ_h) según el contenido relativo de agua (CRA) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	116
Cuadro 4	Potenciales osmóticos (Ψ_π) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	118
Cuadro 5	Potencial de turgor (Ψ_t) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	119
Cuadro 6	Valores del numerador y denominador de la ecuación 15 para obtener el parámetro B del módulo de elasticidad (Ψ_t) en la hoja de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).	123

LISTA DE SÍMBOLOS Y NOMENCLATURAS

Variable	Significado	Unidades
RPR	Riego parcial de raíces	--
RC	Riego convencional o completo	--
RDC	Riego deficitario controlado	--
SDRL-A	Sección de desarrollo de las raíces laterales (lado A)	--
SDRL-B	Sección de desarrollo de las raíces laterales (lado B)	--
CGPRL	Compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento y posicionador de las raíces laterales-principal	--
OSRL	Orificios de salida de las raíces laterales	--
RL	Raíces laterales	--
NRL	Número de raíces laterales	--
NRL/l	Número de raíces laterales por litro de agua	--
CC	Capacidad de campo	m ³ /m ³ , %
PMP	Punto de marchitez permanente	--
FATS	Fracción de agua transpirable del suelo	%
ar	Antes de riego	--
24dr	24 horas después de riego	--
Ψ_{ms}	Potencial matricial del suelo	kPa
Ψ_{msar}	Potencial matricial del suelo antes del riego	kPa
Ψ_{ms24dr}	Potencial matricial del suelo 24 horas después del riego	kPa
θ_{vs}	Contenido volumétrico de agua en el suelo	m ³ /m ³ , %
θ_{vsx}	Punto en el límite crítico del agua aprovechable para las plantas	m ³ /m ³ , %
θ_{cc}	Contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo	m ³ /m ³ , %
θ_{PMP}	Contenido volumétrico de agua en el suelo a punto de marchitez permanente	m ³ /m ³ , %
Ψ_h	Potencial hídrico xilemático	bar
Ψ_{har}	Potencial hídrico xilemático antes del riego	bar
Ψ_{h24dr}	Potencial hídrico xilemático 24 horas después del riego	bar
$\Delta\Psi_h$	Amplitud del potencial hídrico xilemático	bar

Ψ_{Turgor}	Potencial de turgor	bar
$\Psi_{\text{Osmótico}}$	Potencial osmótico	bar
$\Psi_{\text{Gravitacional}}$	Potencial gravitacional	bar
Gs	Conductancia estomática	mmol/m ² s
g _{Sar}	Conductancia estomática antes del riego	mmol/m ² s
g _{S24dr}	Conductancia estomática 24 después del riego	mmol/m ² s
CRA	Contenido relativo de agua	%
CRA _(turgor=0)	Contenido relativo de agua cuando la presión de turgor es igual a cero	%
ϵ_v	Módulo volumétrico de elasticidad	MPa
CA _{Apoplásticas}	Contenido de agua apoplástica	%
$\Psi_{O(CRA=1)}$	Potencial osmótico cuando el contenido relativo de agua es igual a uno	bar
$\Psi_{O(CRA=0)}$	Potencial osmótico cuando el contenido relativo de agua es igual a cero (potencial letal, inicio de plasmólisis)	bar
P-V	Presión-volumen	--
L y/o l	litro	--
EUA	Eficiencia del uso del agua	g/L
EUA _{vainitas}	Eficiencia del uso del agua en vainitas	g/L
EPV	Eficiencia de producción de vainitas	Número vainitas/L
ECP	Eficiencia de concentración de proteínas	g/L
N	Nitrógeno (contenido)	%
K	Potasio (contenido)	%
Ttos	Tratamientos	--
CV	Coefficiente de variación	%

RESUMEN

El agua es un recurso limitado y su escasez genera desequilibrios en las acciones que benefician a la sociedad, principalmente a la agricultura que representa la actividad humana de mayor consumo de agua. Investigaciones recientes han demostrado que los cultivos pueden mantener producciones adecuadas con importantes reducciones de consumo de agua, debido a que las plantas tienen la capacidad de reconocer señales abióticas y realizar ajustes en su sistema de regulación hídrica. El propósito de esta investigación consistió en estudiar el efecto de riegos reducidos en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Para ello se diseñó un macetero de respuesta hidrogravitropica donde se cultivaron las plantas y fueron evaluadas bajo dos tratamientos con riego completo o convencional (RC) y dos bajo riego parcial de raíces (RPR). Todos los tratamientos recibieron el mismo volumen de agua hasta antes de la floración, para luego asignar la aplicación del riego según la curva de retención agua-suelo; en el tratamiento control (RC500) la asignación del agua correspondió al 100 por ciento de la capacidad de campo del sustrato utilizado, en RC300 se aplicó el 60 por ciento de RC500, en RPR500 y RPR300 se aplicó el 50 por ciento de RC500 y RC300, respectivamente. Se monitoreo el potencial hídrico xilemático, conductancia estomática y el potencial matricial del suelo, junto con determinar la dinámica de las relaciones hídricas y la productividad del agua. Los resultados mostraron que la geometría del macetero propuesto facilitó la aplicación del RPR porque evitó transferencias horizontales de humedad entre las secciones de desarrollo de las raíces laterales. Los altos valores de conductancia estomática en RC500 evidenciaron transpiración de lujo, mientras que el ajuste osmótico realizado por RPR500 permitió mantener a las plantas con el mismo módulo de elasticidad que el control. Aunque en todos los tratamientos se evidenció la misma eficiencia de producción de vainitas, RPR500 mostró la mayor eficiencia del uso de agua y concentración de proteínas, aun cuando en este tratamiento se aplicó menos agua que RC500.

PALABRAS CLAVES: Raíces laterales, respuesta hidrogravitropica selectiva, módulo de elasticidad, ajuste osmótico, eficiencia de uso del agua.

ABSTRACT

Water is a limited resource and its scarcity generates imbalances in the actions that benefit the society, mainly to the agriculture that represents the human activity of greater consumption of water. Recent studies have shown that crops can maintain adequate yields with significant reductions in water consumption because plants have the ability to recognize abiotic signals and make adjustments to their water regulation system. The purpose of this research was to study the effect of reduced irrigation on bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivation. For this purpose, a hydrogravitropic response pot was designed where the plants were cultivated and evaluated under two treatments with complete or conventional irrigation (RC) and two under partial root-zone drying (RPR). All treatments received the same volume of water until before flowering, and then assigned the irrigation application according to the water-soil retention curve; in the control treatment (RC500) the water allocation corresponded to 100 percent of the field capacity of the substrate used, in RC300 the 60 percent of RC500 was applied, in PRP500 and RPR300 50 percent of RC500 and RC300 respectively. Xylem water potential, stomatal conductance and soil matrix potential were monitored, along with determining the dynamics of water relations and water productivity. The results showed that the geometry of the proposed pot facilitated the application of RPR because it avoided horizontal transfer of moisture between the lateral root developmental sections. The high values of stomatal conductance in RC500 evidenced luxury transpiration, while the osmotic adjustment performed by RPR500 allowed maintaining the plants with the same module of elasticity as the control. Although all treatments showed the same efficiency of green bean production, RPR500 showed the highest efficiency of water use and protein concentration, even though in this treatment less water was applied than RC500.

KEYWORDS: Lateral roots, selective hydrogravitropic response, elasticity module, osmotic adjustment, water use efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es la actividad humana que junto con formar parte del paisaje, la sociedad y la economía, genera pasivos a nivel ambiental (Quintero y Molina, 2006). Incluida esta última discrepancia, también es la actividad imprescindible para la producción de alimentos, permitiendo la supervivencia de la especie humana en el planeta Tierra y fuera de él (Dauzart et al., 2016), como en la Estación Espacial Internacional (Brinckmann, 2005; Herridge, 2014), en los viajes espaciales de largas distancias (Morrow et al. 1994, Ferl et al. 2002, Guo et al. 2008) y en las futuras misiones de colonización humana de la Luna, el planeta Marte y el espacio en general (Monje et al. 2003, Hublitz et al. 2004, Baratto et al. 2005, Kiss et al. 2009).

Oki y Kanae (2006) indican que de los 110000 km³ de agua que llueven en la superficie de la Tierra, 36 por ciento precipitan sobre el mar; 57 por ciento mantienen áreas forestales, de pastoreo, de biodiversidad y pesca; 0.1 por ciento (110 km³) es utilizada por ciudades e industrias y 7 por ciento (7700 km³) en irrigación. En esta última actividad 6004.5 km³ corresponden a “agua verde” (precipitación que se almacena en la zona del suelo donde se encuentran las raíces de las plantas cultivadas), mientras los restantes 1695.5 km³ corresponden a “agua azul” (extraída del caudal de ríos y acuíferos para aplicarse con algún método de riego a los cultivos), que es utilizada para producir el 40 por ciento de los alimentos que consumimos (De Pascale et al., 2011). De esta forma, la agricultura irrigada con “agua azul” representa la actividad humana más “sedienta”; por lo tanto, la disponibilidad subóptima de este recurso, es la limitación principal para el crecimiento vegetal (York et al., 2013), donde el déficit hídrico causado por las imperfecciones del clima en las 2/3 partes del planeta (Moreno, 2009) es considerado como el factor negativo de mayor impacto sobre la producción de los cultivos (Jensen et al., 2010).

En este sentido la FAO (2007) ha expresado que si no se introducen cambios trascendentales en los patrones de producción, la cantidad de agua utilizada en agricultura, actividades industriales y domésticas, aumentarán entre 60 a 90 por ciento para el año 2050.

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 sustentabilidad¹ del cultivo (Zegbe et al., 2005; Vega y Mejía, 2015).

En el caso del frijol común, que representa una de las leguminosas de mayor consumo humano, el 70 por ciento de la producción mundial se la obtiene bajo condiciones hídricas limitantes (Cuéllar y Covarrubias, 2005). En América Latina el 73 por ciento de la producción proviene de regiones con niveles de déficit hídrico desde moderado hasta severo (Jiménez y Acosta, 2013), 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 xilemático letal (-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). En este sentido, varios estudios han puesto de manifiesto al potencial hídrico xilemático como el mejor indicador del estado hídrico en varios cultivos (Abrisqueta et al., 2015).

Por otro lado, Robbins y Dinneny (2015) indican que las raíces de las plantas son capaces de reconocer pequeños cambios en los patrones de humedad del suelo, y que esta respuesta desencadena un conjunto de señales químicas que consiguen redistribuir el ácido abscísico (ABA) -sintetizado en las puntas de las raíces y transportado a través del sistema vascular- desde los diferentes órganos de las plantas hacia las células estomáticas (Sauter et al., 2001);

¹ *Sustentabilidad o desarrollo sustentable* es un anglosajismo que proviene del concepto *sustainable development*. La palabra *sustainable* ha sido erróneamente traducida al castellano como “sustentable” dicho vocablo en realidad no existe en este último idioma, independientemente de que cada día sea más utilizado. Por lo tanto, la expresión inglesa se refiere al esfuerzo necesario que se debe aplicar para que un proceso dinámico se mantenga, superando los obstáculos que pueda encontrar; obligando por lo tanto, a la identificación de las condiciones necesarias para que el sistema no sólo sobreviva sino para que pueda seguir avanzando. (Fragmento de la columna de opinión en CNNExpansión: ¿Sostenibilidad o sustentabilidad?, de Carlos Miguel Barber Kuri, Vicerrector Académico de la Universidad Anáhuac México Sur, 2009.

constituyendo el mecanismo que regula los procesos fundamentales para ajustar la pérdida de agua por transpiración (Gowing et al., 1990; Khalil y Grace, 1993; Davies et al., 2002). En base a estos descubrimientos se ha demostrado que mediante modificaciones en las técnicas de aplicación del agua de riego, es posible manipular la conductancia estomática (Sepaskhah y Ahmadi, 2010), para mejorar el control del estado hídrico de la planta, y permitir que se incremente la eficiencia del uso del agua (De Pascale et al., 2011).

Du et al. (2015) indican que un enfoque prometedor es el uso de riegos reducidos, que pueden tanto ahorrar agua e inducir regulaciones fisiológicas en las plantas, tales como el control de la apertura de los estomas y el control del crecimiento reproductivo y vegetativo. En este sentido, el riego deficitario controlado (RDC) y el riego parcial de raíces (RPR) son las actuales estrategias de riego utilizadas exitosamente 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).

Independientemente del ahorro de agua que se logra conseguir con ambas técnicas, en el RDC junto con mejorar la calidad de las cosechas ocurre una reducción del rendimiento (Leib et al., 2006; Paltineanu et al., 2013); mientras, que en el RPR el rendimiento de los cultivos es comparable al obtenido con el riego convencional, pero con importantes mejoras en los componentes asociados a la calidad de los productos cosechados (Serna et al., 2011; Vega y Mejía, 2015).

El problema de la técnica RPR radica en que su implementación para la producción intensiva de cultivos en maceteros puede verse limitada al ámbito experimental, porque el delicado procedimiento de dividir artificialmente la raíz principal en dos secciones simétricas, para someterlas al discontinuo patrón de humedad en el suelo, requiere obligatoriamente el mantenimiento de las plantas en cámaras de crecimiento controlado, resultando muy costoso, poco técnico y poco práctico para una producción comercial, tal como se ha comentado en varias metodologías (Stikic et al., 2003; Wakrim et al., 2005; Thai et al., 2007; López et al., 2008; Chamú et al., 2011). Por otro lado, Guedea-Fernández et al. (2001) indican que las dimensiones de los maceteros deben estar en función de la arquitectura y la velocidad de

crecimiento del sistema radicular, situación que es muy poco considerada por la industria fabricante de estos materiales para la agricultura.

Finalmente, estos antecedentes permiten confirmar que la sostenibilidad del agua para riego y la seguridad alimentaria están estrechamente vinculadas (Brauman et al., 2013), pues se requiere tener una alta eficiencia en el proceso de transformación insumo-producto (Sánchez et al., 2006). Esta situación, ha originado replantear el concepto de recursos hídricos y demandas, pasando de la tradicional categorización entre usos urbanos, agrarios, industriales y turísticos, a una nueva categorización basada en las funciones del agua, donde se diferencien tres niveles de prioridad: 1) agua-vida, 2) agua-interés general, y 3) agua-negocio (Martínez, 2006). Considerando este nuevo enfoque, es posible que la asignación del agua para los cultivos pueda ser regulada en función de la comprensión de sus respuestas fisiológicas (Du et al., 2015).

1.1. OBJETIVO GENERAL

Bajo estas circunstancias, el objetivo general del trabajo consistió en:

- Evaluar el efecto del riego parcial de raíces en plantas de frijol, cultivadas en maceteros de respuesta selectiva a los estímulos hidrogravitrópicos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En el mismo contexto los objetivos específicos consistieron en:

- Diseñar, construir y evaluar un macetero de respuesta selectiva a los estímulos hidrogravitrópicos, para aplicar la técnica de riego parcial de raíces.
- Evaluar el potencial hídrico xilemático y la conductividad estomática en la hoja de frijol común, irrigado de forma convencional y con riego parcial de raíces.
- Evaluar la dinámica de las relaciones hídricas en la hoja de frijol común.
- Evaluar la productividad del agua en el frijol bajo riego convencional y riego parcial de raíces.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. AGRICULTURA PRIMITIVA Y TEMPRANA

Posiblemente en el periodo Neolítico (8000 A.C.) inició la domesticación de variedades silvestres de plantas, actividad que permitió a grupos de recolectores desarrollarse como sociedades agrarias sedentarias. Esta domesticación se produjo de forma paralela en varias partes del mundo, donde las plantas eran seleccionadas de acuerdo a rasgos hereditarios útiles que gradualmente se iban mejorando; como por ejemplo: hábito de crecimiento, precocidad, maduración sincrónica, tamaño de frutos, reducción de sabores insípidos o no deseables, entre otros. Así mismo, la aplicación de prácticas para el manejo de las plantas de interés agrícola fue un proceso gradual, mediante el cual los hombres primitivos adaptaron las técnicas de cultivos a sus condiciones de agua, suelo y clima (Prakash, 2001).

Las primeras civilizaciones se desarrollaron a lo largo de ríos principales; los egipcios junto al río Nilo, los harappas en el valle del río Indo, los chinos a lo largo del río Huang, y los mesopotámicos en los valles de los ríos Tigris y Éufrates. Después de las inundaciones, estos ríos proporcionaban sedimentos con una importante fuente de nutrientes para las plantas y abundante agua para la irrigación de los cultivos. Para mejorar las prácticas agrícolas, los egipcios con el invento de la rueda lograron fabricar bombas para llenar con agua sus canales y cultivar en época de sequía; así mismo, debieron construir sistemas de riego y drenaje, y grandes diques para regular las inundaciones anuales. Los harappas protegieron sus llanuras fértiles con la construcción de presas y sistemas de drenaje junto con producir trigo, cebada y sésamo en terrazas. En Mesopotamia la agricultura se basaba en producir trigo, cebada, dátiles, higos, aceitunas y uvas; y era totalmente dependiente de la eficiencia de los sistemas de riego, porque frecuentemente se obstruían con grandes cantidades de sedimentos que transportaban los ríos Tigris y Éufrates (Stamp, 1961; citado por Monje et al., 2003).

En Europa, los romanos se destacaron porque heredaron muchas de las prácticas culturales de los pueblos que conquistaban. Ellos desarrollaron el concepto de rotación de cultivos y fertilización, porque entendieron que después de un ciclo agrícola, el suelo reducía su potencial productivo; además, en la época de verano cultivaban en invernaderos que eran irrigados con el agua que conservaban de la época de precipitaciones (Gill y Dale, 1985). Sin embargo, Cárdenas-Arroyo (1992) indica que fueron las primeras civilizaciones americanas las que desarrollaron las mayores habilidades para domesticar plantas, quienes aplicaron avanzados métodos agrotecnológicos para cultivarlas; entre estos se pueden mencionar:

- Andenes: que consistían en un sistema de terrazas construidas en las laderas de grandes montañas, permitido cultivar entre otros alimentos más de 200 especies de papas; las parcelas estaban dotadas de acueductos que permitan irrigar las plantas y drenar el exceso de agua. Fueron construidos por los Incas.
- Chinampas: que consistían en un sistema de parcelas flotantes sobre lagos, dotadas de elementos para el riego y drenaje que permitían el cultivo de especies de interés alimenticio. Fueron construidas por los Aztecas.
- Kool: que consistía en un sistema donde se cortaba la vegetación arbustiva y los árboles pequeños del bosque o selva, dejando en pie solo los grandes árboles o aquellos que se consideraba necesario o conveniente preservar; finalmente, se permitía que transcurriera un tiempo para que se seque la vegetación muerta y se incorporará al suelo, caso contrario se aceleraba el proceso mediante la quema, donde las cenizas resultantes aportaban fertilizantes al terreno; de esta manera, se podían cultivar plantas de interés agrícola durante dos o tres años consecutivos. Este sistema fue ideado por los Mayas.

2.2. AGRICULTURA CONTEMPORÁNEA Y MODERNA

Se considera a la agricultura contemporánea y moderna cuando sus mejoras están enfocadas a reducir la cantidad de trabajo necesaria para sostener una población en una determinada área cultivada. En este sentido, los mayores avances se lograron desde la revolución industrial, cuando la mecanización sustituyó el trabajo manual (preparación del suelo,

siembra, fertilización, irrigación y cosecha); y después la revolución verde, que mediante la siembra de variedades mejoradas y el uso de grandes cantidades de agua, fertilizantes y plaguicidas; condujeron a un aumento constante en el rendimiento de los cultivos (FAO, 2000).

Bajo este escenario en 1910 mientras un agricultor podía alimentar a siete personas, en 1980 un agricultor producía alimentos para alimentar a 80 personas, debido a los desarrollos tecnológicos en fertilizantes, herbicidas, reguladores de crecimiento, uso de invernaderos, mejoras en los programas de fitomejoramiento y en las técnicas de irrigación, que permiten incrementar la productividad de los cultivos (Monje et al., 2003). En la actualidad el desarrollo exponencial de aplicaciones inimaginables para teléfonos inteligentes, ha motivado a los investigadores en irrigación, introducir sofisticados desarrollos en poderosas plataformas de fácil utilización y mínima interacción del usuario para el riego de las plantas, especialmente para algodón que es uno de los mayores consumidores de recurso hídrico en la agricultura (Vellidis et al., 2016), y para césped que corresponde a la especie ornamental de mayor consumo hídrico en el área urbana (Migliaccio et al., 2015).

Aun así, el reto de la agricultura moderna radica en el mantenimiento de altas tasas de producción, mientras hace frente a nuevos desafíos provocados por la disminución y/o deterioro de los recursos naturales y los cambios en el clima global (Monje et al., 2003).

2.3. AGUA DULCE Y RECURSOS HÍDRICOS

El agua es el elemento desvinculado de cualquier utilización por el hombre cuando no modifica su ciclo natural, por lo tanto, es un elemento que está dotado de valor ambiental. Mientras que recurso hídrico es la parte del agua susceptible de utilizar cuando el hombre interrumpe su ciclo natural (transformándolo en un ciclo artificial, como en el caso de la agricultura); por lo tanto, es un elemento que está dotado de valor económico (Rebouças, 2002; citado por Gomes y Barbieri, 2004).

El planeta Tierra tiene 2/3 de su superficie cubiertas por agua (360 millones Km² de un total de 510 millones Km²); sin embargo, 97.5 por ciento del agua disponible es salada (concentración de sal mayor al 30 por ciento) y el restante 2.5 por ciento es considerada dulce (con una concentración de sal inferior a 0.5 por ciento); en esta última distribución el 98.8 por ciento es de difícil acceso (donde el 68.7 por ciento se encuentra en estado sólido en los glaciares y el 30.1 por ciento se encuentra en depósitos subterráneos profundos), por lo tanto, apenas el 1.2 por ciento está disponible en ríos y lagos (Shiklomanov, 1993, citado por USGS, 2016).

En este sentido, el agua dulce es un recurso limitado y con múltiples funciones que cumplir; su escasez junto con el calentamiento global provocan los dos más graves y complejos problemas ambientales (Jovanovic y Stikic, 2012), especialmente en la agricultura irrigada que crece continuamente en todo el mundo (Schlosser et al., 2014), donde para muchos productores la idea de abundancia refuerza la cultura de desperdicio (Rebouças, 1999; citado por Gomes y Barbieri, 2004).

2.4. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

La productividad es la relación entre la unidad de producto resultado y la unidad de insumo utilizado. En el caso del agua el término productividad es usado exclusivamente para denotar la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida. El valor del producto puede ser expresado en diferentes términos: biomasa, grano o dinero. Por ejemplo, el enfoque llamado «cultivo por gota», hace referencia a la cantidad de producto obtenido por unidad de agua. Otro enfoque considera las diferencias en los valores nutricionales de los diferentes cultivos, o que la misma cantidad de un cultivo alimenta más personas que la misma cantidad de otro cultivo por unidad de agua consumida (FAO, 2003).

Otra preocupación surge con la forma de expresar los beneficios sociales de la productividad del agua en la agricultura. Todas las opciones mencionadas pueden ser resumidas como «nutrientes por gota», «per cápita por gota», «trabajos por gota» y «medios de vida sostenibles por gota». Por lo tanto, no existe una definición única de productividad, y el valor

considerado en el numerador podría depender del enfoque así como de la disponibilidad de datos. Sin embargo, la productividad del agua definida en kilos por gota es un concepto útil cuando se compara la productividad del agua en diferentes partes del mismo sistema o cuenca y también cuando se compara la productividad del agua en la agricultura con otros usos posibles del agua (FAO, 2003).

2.5. EL AGUA EN LAS PLANTAS

Considerando que el agua es la molécula esencial para la vida, en las plantas la mayoría de los procesos fisiológicos son afectados cuando los niveles en la constitución de sus tejidos disminuyen más del 80% (Moreno, 2009).

En las plantas el agua es absorbida por su sistema radicular, principalmente por los pelos absorbentes y otras células de la epidermis de la raíz. El ingreso del agua por estos elementos ocurre de forma activa (por vía simplástica) y de forma pasiva (por vía apoplástica). En la ruta por el espacio simplástico, el transporte del agua ocurre a través del citoplasma celular (donde hay sustancias hidrófobas que aumentan la viscosidad del medio y la resistencia al paso de agua), que se comunica célula a célula por medio de los plasmodesmos, luego atraviesa la Banda de Caspary hasta llegar al xilema. En el caso de la ruta del apoplasto el agua se mueve a través de los espacios intercelulares (donde existe menor resistencia al paso de agua debido a la presencia de sustancias hidrófilas), hasta que llega a la Banda de Caspary, donde se ve obligada a cruzar por una membrana celular, para luego dirigirse al xilema (Steudel, 2000). Dentro del xilema el agua continuará su camino hacia el exterior, donde está sujeta a salir por la hoja en la fase de transpiración. A medida que la planta transpira se genera una presión negativa en la columna de agua ascendente, provocando una caída del potencial hídrico ($\Psi_{\text{hídrico}}$), parámetro que representa el estado hídrico de las plantas donde están involucrados los siguientes potenciales (Abrisqueta, 2010):

$$\Psi_{\text{hídrico}} = \Psi_{\text{osmótico}} + \Psi_{\text{turgor}} + \Psi_{\text{matricial}} + \Psi_{\text{gravitacional}} \quad [1]$$

Donde,

- $\Psi_{\text{osmótico}}$: Potencial osmótico (planta), originado por la presencia de solutos disueltos en los tejidos vegetales, puede ser cero o asumir valores negativos.
- Ψ_{turgor} : Potencial de turgor o presión (planta), originado por la presión de turgencia de las células, puede asumir valores positivos o cero.
- $\Psi_{\text{matricial}}$: Potencial matricial (planta), corresponde a la presencia de agua no osmótica en los tejidos vegetales, puede tener valores nulos o negativos y en el caso de las plantas es despreciable.
- $\Psi_{\text{gravitacional}}$: Potencial gravitacional (planta), representa la diferencia de energía potencial debido a la diferencia de altura, su influencia solo es apreciable en arboles de gran altura.

Por lo tanto, considerando los potenciales influyentes de la suma algebraica, el potencial hídrico en las plantas queda definido de la siguiente manera:

$$\Psi_{\text{hídrico}} = \Psi_{\text{osmótico}} + \Psi_{\text{turgor}} \quad [2]$$

2.6. PRINCIPALES MECANISMOS PARA EL CONTROL DE LA PÉRDIDA DE AGUA EN PLANTAS

Cuando el contenido de agua en el suelo disminuye y/o aumenta la demanda evaporativa de la atmosfera, las plantas activan una serie de procesos que tienden a mantener su estado hídrico favorable (Moreno, 2009). El primer mecanismo de defensa en la presencia de un suministro inadecuado de agua provoca el cierre de los estomas, situación que puede ocurrir incluso en plantas bien regadas durante el día; donde el agua absorbida por las raíces no llega a proporcionar el suficiente grado de hidratación, debido a una demanda hídrica extrema provocada por niveles elevados del déficit de presión de vapor del aire (Mencuccini et al., 2000). Otro de los mecanismos más eficientes consiste en realizar ajustes en su potencial hídrico, efecto que se transmite a todos sus órganos, ocasionando principalmente una disminución controlada de la turgencia celular, donde los contenidos de agua simplástica y apoplástica tienden a equilibrarse (Saruhan et al., 2012). En este sentido, un cambio en la

presión de turgencia se puede ver reflejado en cambios de la elasticidad del tejido (Dichio et al., 2003), (Figura 2.1).

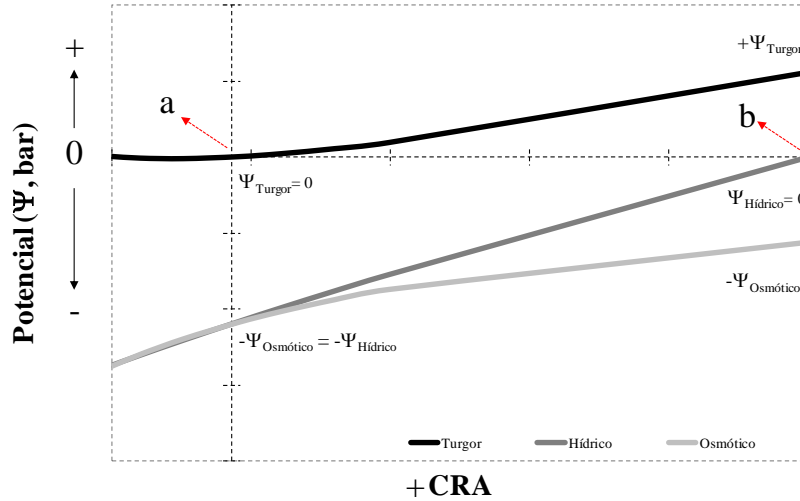


Figura 2.1: Esquema del diagrama de Höfler representando la dinámica de los potenciales $\Psi_{\text{hídrico}}$, $\Psi_{\text{osmótico}}$ y Ψ_{turgor} durante la pérdida de agua en el tejido de una hoja de frijol común: *a*) situación de la célula en estado turgente y *b*) situación de la célula en estado de plasmólisis (punto de no retorno aunque se practique el riego, por pérdida de elasticidad de la pared celular). Elaborado por el autor.

2.7. DISPONIBILIDAD DEL AGUA DEL SUELO PARA LAS PLANTAS

Dexter y Bird (2001) expresan que un procedimiento ampliamente utilizado para describir las características de la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas está representado por la curva de retención agua-suelo, que relaciona el potencial matricial (succión o presión negativa) con el contenido de agua (Figura 2.2). Evangelista et al. (2013) indican que el potencial matricial representa el componente más importante de todo potencial hídrico del suelo, el mismo que se describe con la siguiente ecuación:

$$\Psi_{h_suelo} = \Psi_{osmótico_s} + \Psi_{presión_s} + \Psi_{matricial_s} + \Psi_{gravitacional_s} \quad [3]$$

Donde,

- $\Psi_{\text{osmótico}_s}$: Potencial osmótico (suelo), originado por la presencia de sales disueltas en el agua del suelo que provocan que el potencial disminuya (más negativo) y aumente la retención.
- $\Psi_{\text{presión}_s}$: Potencial de presión (suelo), presente solo en suelos saturados.
- $\Psi_{\text{matricial}_s}$: Potencial matricial (suelo), es el resultado de las fuerzas que retienen el agua en el suelo (adsorción y capilaridad); su valor representa la capacidad de retención, que es inversamente proporcional al contenido de agua en el suelo.
- $\Psi_{\text{gravitacional}_s}$: Potencial gravitacional (suelo), está determinado por la distancia (altura) de un punto con respecto a un nivel de referencia dado.

En este sentido, Cornelis et al. (2006) indican que la retención del agua en la matriz del suelo ($\Psi_{\text{matricial}_s}$) depende de la forma y angulosidad de sus partículas, y los espacios entre ellas (poros). Sin embargo, para fines de la práctica del riego es importante manejar dentro de la capacidad de retención o almacenamiento del agua unos límites para que las plantas aprovechen de manera continua el agua dentro del proceso evapotranspiratorio.

De esta forma, la capacidad de campo (CC) representa el límite máximo o superior de disponibilidad de agua para las plantas; en este nivel el suelo es capaz de retener agua en contra de la fuerza de gravedad, porque hay un equilibrio entre el contenido de agua y aire en los poros del suelo. Los factores que afectan a la capacidad de campo son la textura y estructura del suelo, y el tipo de arcilla que lo componen; sus valores están en el orden de -10 kPa para suelos arenosos y -33 kPa para suelos arcillosos. Por otro lado, cuando disminuye la cantidad de agua en el suelo y las plantas no son capaces de extraerla fácilmente, detienen su crecimiento y se marchitan; si esta disminución persiste en el tiempo, las plantas se marchitan al grado que no son capaces de recuperarse, aun si se las ubicaran en un ambiente saturado de vapor de agua, entonces a partir de este momento la humedad del suelo ha llegado al punto de marchitez permanente (PMP) y su potencial ha bajado hasta -1500 kPa, (Jarre et al., 2013). En todo caso, Sinclair y Ludlow 1986 (citado por Lago, 2011) indican que el contenido de agua en el suelo, utilizado para la transpiración de las plantas varía entre la capacidad de campo (cuando la transpiración es máxima) y un punto (θ_{vsx}) que

representa el contenido de humedad equivalente al 10 por ciento de la máxima transpiración, rango que se le denomina fracción de agua transpirable del suelo (FATS), (Figura 2.2).

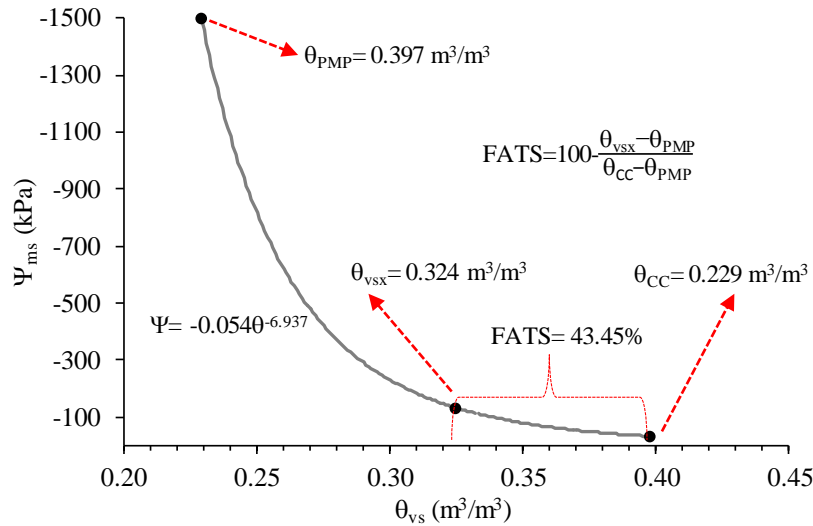


Figura 2.2: Representación la curva de retención agua-suelo con los límites máximo (θ_{CC} , capacidad de campo) y mínimo (θ_{PMP} , punto de marchitez permanente) del nivel de humedad aprovechable para las plantas, con un punto intermedio (θ_{vsx}) que representa el límite o punto crítico de la fracción de agua transpirable del suelo (FATS) para un cultivo x en un suelo de textura arcillosa (arcilla 50%, limo 30%, arena 20%). Elaborado por el autor.

2.8. TÉCNICAS DE RIEGOS REDUCIDOS

Jovanovic y Stikic (2012) indican que para mejorar la productividad del agua y la calidad de las cosechas en la actual era de cambio climático, las estrategias de ahorro de agua para los cultivos consisten en aplicar técnicas de riegos reducidos. La FAO (2002) expresa que con la ayuda de métodos basados en la comprensión de las respuestas fisiológicas de las plantas al suministro de agua, el riego deficitario controlado (RDC) y el riego parcial de raíces (RPR) son las técnicas que pueden mejorar notablemente el desempeño del agua en los cultivos. En este sentido, White (2007) indica que los principales factores que distinguen a ambas técnicas corresponden a la forma diferente de aplicar el riego, y el efecto de las condiciones localizadas de humedad del suelo sobre el estado hídrico de la planta.

2.9. RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO (RDC)

El RDC es una técnica de irrigación que consiste en humedecer toda la zona de las raíces de las plantas con una cantidad de agua menor a la evapotranspiración durante periodos específicos del ciclo de un cultivo (Figura 2.3). El principio de RDC se basa en que la sensibilidad de las plantas a la falta de agua no es constante durante toda la época de su crecimiento, y por lo tanto, el déficit hídrico provocado discontinuamente durante períodos establecidos puede incrementar el ahorro de agua y mejorar la calidad del producto a cosechar (Metin et al., 2011). En este sentido, la clave para manejar esta técnica consiste en definir el momento de riego y el grado de déficit de agua que se aplica a las plantas; por lo tanto, un monitoreo constante del contenido de agua en el suelo es requerido para mantener un régimen hídrico en las plantas dentro de un rango de estrés que no limite el rendimiento (Jovanovic y Stikic, 2012).

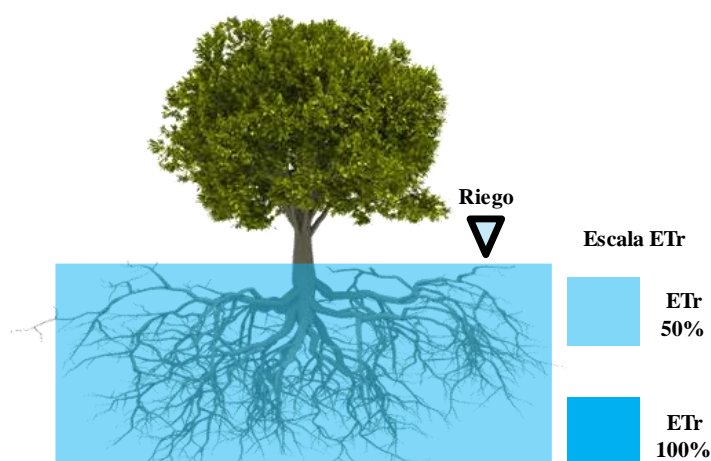


Figura 2.3: Representación esquemática del riego deficitario controlado (RDC).
Elaborado por el autor.

2.10. RIEGO PARCIAL DE RAÍCES (RPR)

El RPR es una técnica que en los últimos años ha incrementado su interés a nivel académico, debido a que corresponde un punto de rotura del riego tradicional (Du et al., 2015); mientras en RDC la aplicación del agua se maneja en un espacio a través del tiempo, en RPR el agua aplicada es manejada sobre dos espacios en tiempos desfasados; esta situación potencia a la planta, principalmente en términos de eficiencia del uso del agua, tal como ha sido

demostrado por varios autores (Du et al., 2016; Hutton y Loveys, 2011; Sepaskhah y Ahmadi, 2010; Tang et al., 2010; Du et al., 2008; Davies et al., 2002).

Sepaskhah y Ahmadi (2010) indican que RPR está diseñado para mantener la mitad del sistema radicular de las plantas sin riego (donde el suelo se encuentra con un nivel de humedad muy bajo), mientras que al mismo tiempo la otra mitad se encuentra con riego (donde el suelo está con un nivel de humedad óptimo), Figura 2.4. Este principio permite que la zona irrigada de las raíces mantenga la transpiración de las hojas y un estado hídrico favorable de la planta; mientras que en la parte donde se desactiva el riego, las raíces promueven la síntesis de señales químicas (ácido abscísico, ABA), que son transportadas vía xilemática a las hojas, para inducir respuestas fisiológicas como un control de la apertura y cierre de los estomas (Dodd et al., 2006; Kriedemann y Goodwin, 2003)

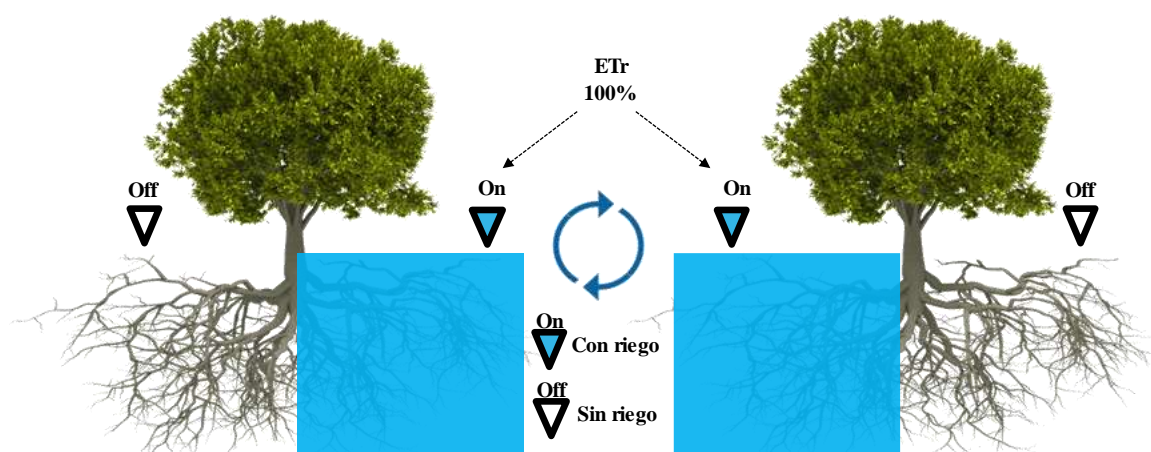


Figura 2.4: Representación esquemática del riego parcial de raíces (RPR). Elaborado por el autor.

2.11. ALGUNAS MOTIVACIONES E INSTRUMENTOS PARA EL ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR DE LAS PLANTAS

Niabu et al. (2008) indican que las plantas requieren de raíces para la adquisición de agua y nutrientes, y como sistema de anclaje; además, que su arquitectura ha evolucionado para responder a las condiciones ambientales, permitiendo que puedan sobrevivir en diferentes nichos ecológicos. Así mismo, las variaciones en el tamaño, forma y cantidad de

superficie/volumen de suelo que exploran, son en gran medida ajustes que necesariamente realizan para adaptarse a las diferentes presiones ambientales (Feng et al., 2016).

Passioura y Angus (2010) expresan que con adecuadas prácticas agronómicas se puede lograr un control en el almacenamiento y conservación del agua dentro de las zonas del suelo donde se desarrollan las raíces; por lo tanto, se puede incrementar la salud de las plantas, mejorar su crecimiento y el rendimiento de las cosechas; en este sentido, también mencionan que existe una relación directa de estos parámetros con la calidad del sistema radicular. Así mismo, Lv et al. (2010) indican que con la difusión de nuevas técnicas de riego, es necesario obtener una mejor comprensión de la distribución de las raíces y el patrón de absorción de agua para gestionar mejor los sistemas de riego.

En este sentido, Passot et al. (2016) utilizaron tomografía computarizada de rayos x para caracterizar la arquitectura radicular del mijo (*Pennisetum glaucum*) (sexto cereal más importante en el mundo) y mejorar la comprensión de la adquisición de agua y nutrientes en sus diferentes etapas de desarrollo. En el mismo contexto, Adu et al. (2014) diseñaron un rizotrófon digital (con un sistema adquisición de imágenes de alta resolución y bajo costo) para cuantificar la dinámica de la variación del crecimiento radicular del nabo (*Brassica rapa*); mientras que otros investigadores han perfeccionado el diseño de rizotrones analógicos para mejorar la observación y el registro del crecimiento de las raíces, tanto en plantas grandes de sistema radicular alorrizo o axonomorfo (Silva y Beeson, 2011), como en plantas pequeñas de sistema radicular homorrizo o fasciculado (Judd et al. 2014). Por otro lado, la portabilidad que ofrecen los mini-rizotrones facilitan el estudio de las raíces directamente en el campo con una mínima perturbación del suelo (Cai et al., 2016), mientras que el uso rizotubos en laboratorios permiten estudiar varias repeticiones de la misma especie de planta en un solo instrumento (Jeudy et al., 2016).

2.12. RESPUESTAS DE LAS RAÍCES DE LAS PLANTAS A LOS ESTÍMULOS PROVOCADOS POR EL CAMPO GRAVITACIONAL TERRESTRE (GRAVITROPISMO) Y LOS GRADIENTES DE HUMEDAD DEL SUELO (HIDROTROPISMO)

Cuando las plantas emigraron desde el mar hace aproximadamente 450 millones de años, se convirtieron en organismos terrestres; sin embargo, tuvieron que superar diversas tensiones ambientales en su nuevo hábitat (principalmente la sequía) para sobrevivir (Takahashi, 2007). Desde entonces, las plantas terrestres han evolucionado una notable plasticidad morfológica que les permite adaptarse a su entorno. Uno de los rasgos más importantes que las plantas han adquirido es la capacidad de detectar las señales ambientales (tropismo) y utilizarlas como base para gobernar la orientación y crecimiento de sus órganos (Esmon et al., 2005; Wyatt y Kiss, 2013).

En este sentido, el gravitropismo es el tropismo que permite orientar el crecimiento de las raíces dentro del campo gravitacional de la Tierra (Tan et al., 2011). La detección de la gravedad se produce en gran parte dentro de unas células especializadas llamadas estatocistos, que se encuentran en la punta de las raíces. Los estatocistos contienen en su interior amiloplastos densos o almidones llamados estatolitos, cuya posición o movimiento dentro de los estatocistos proporciona información acerca de la orientación de la raíz con respecto al vector gravitatorio (Harrison y Masson, 2008).

Por otro lado, el hidrotropismo es la respuesta de las raíces a un gradiente de humedad en el suelo, y desde su re-descubrimiento en 1985, se ha demostrado que es común entre las especies de plantas superiores. Además, en algunas especies, el gravitropismo interfiere con el hidrotropismo, lo que sugiere que existen dos mecanismos compartidos y divergentes que median los dos tropismos. Esta hipótesis ha sido apoyada por estudios que proporcionan una comprensión de cómo las raíces detectan múltiples señales del medio ambiente y exhiben diferentes respuestas (Takahashi, 1994). Sin embargo, la consecuencia biológica del hidrotropismo está relacionada directamente con la evitación del estrés hídrico (Moriwaki, et al., 2013), así mismo, numerosas líneas de investigación evidencia que la auxina y la citoquinina actúan como reguladores positivos y negativos del desarrollo de las raíces laterales en presencia de un gradiente de humedad (Cassab et al. 2013).

2.13. EL CULTIVO DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)

Exploraciones botánicas han demostrado que el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es originario de la zona occidental de México y Guatemala; actualmente este cultivo se extiende desde México hasta el sur de la Cordillera de los Andes en una gran variedad de características morfológicas, hábitos de crecimiento, características de la semilla y potencial de rendimiento (Miranda, 1967; citado por Romero-Arenas et al., 2013).

El frijol común es la leguminosa alimenticia más importante y consumida en el mundo, debido a que sus frutos son una importante fuente de proteínas, vitaminas y minerales esenciales para la dieta de los seres humanos, especialmente en los países en desarrollo (Miklas et al., 2006).

La producción mundial de frijol común es de aproximadamente 22 millones de toneladas al año, donde América Latina, es la región productora más importante con 8 millones de hectáreas. Uno de los principales problemas para la establecimiento de este cultivo es que el 60 por ciento de las plantaciones están en tierras agrícolas sin infraestructura de riego y propensas a períodos de sequía inesperados, situaciones que provocan hasta el 80 por ciento en la reducción del rendimiento (FAO, 2009; citado por Rosales et al., 2012). Por otro lado, en África oriental y meridional el frijol común ocupa más de cuatro millones de hectáreas al año y proporciona alimentos a más de 100 millones de personas; así mismo, es la segunda fuente más importante de proteínas y la tercera fuente más importante de calorías para de la dieta de los hogares africanos que cuentan con los ingresos económicos más bajos (Rezene et al., 2013).

Estos antecedentes le atribuyen al frijol común cualidades para convertirse en una planta modelo, principalmente para el estudio de los efectos que el déficit hídrico y el manejo del riego provocan sobre su fisiología, la calidad y el volumen de su producción (De Santana et al., 2014; Aguilar-Benítez et al., 2012; Saruhan et al., 2012; Garduño-González et al., 2009; Polanía et al., 2009; Martínez et al., 2007; Bertsch et al., 2003; Nóbrega et al., 2001; Vernieri et al., 2001; Moraes-Dallaqua et al., 2000).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo se desarrolló durante el año 2014 en el área experimental de las instalaciones del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos (PDRH) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el campus principal del distrito La Molina en Lima-Perú a 230 m.s.n.m., 12°05'06'' latitud Sur y 76° 75'00'' longitud Oeste (Figura 3.1).



Figura 3.1: Ubicación (pin) del espacio donde se desarrolló el experimento en las instalaciones del PDRH-UNALM campus La Molina (Captura de Google Maps, septiembre 2016).

3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

El sistema de respuesta hidrogravitrópica selectiva consistió en formular un nuevo concepto de macetero, que involucró ajustes geométricos en donde la actual industria fabricante de estos materiales para la agricultura intensiva, aún no ha logrado posicionarse al mismo nivel de los avances en las técnicas de irrigación, las mismas que pretenden reducir el uso del agua y mantener producciones óptimas, como en el caso del riego parcial de raíces (RPR).

Así mismo, las modificaciones artificiales al que comúnmente es sometido el sistema radicular de las plantas bajo RPR, junto con el acondicionamiento obligatorio postmodificación en cámaras de crecimiento controlado (Stikic et al., 2003; Wakrim et al., 2005; Thai et al., 2007; López et al., 2008; Chamú et al., 2011), requirió en el nuevo macetero la incorporación de innovaciones que consideraron los mecanismos de posicionamiento que desarrollan las raíces de las plantas frente a los estímulos inducidos por el gravitropismo diferencial, al que responden las raíces laterales (desarrollo horizontal) y la raíz principal (desarrollo vertical) (Tian et al., 2014); y al que desarrollan las raíces laterales para distribuirse en el suelo donde se formen patrones de disponibilidad hídrica (Bao et al., 2014; Atkinson et al., 2014) (Figura 1, anexo 1).

3.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se utilizó un diseño donde las parcelas se organizaron en el terreno de acuerdo a bloques completos al azar. Cada parcela estuvo conformada por 12 maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva con una planta sembrada en cada uno, donde se evaluaron dos unidades hasta los 55 días después de siembra (dds) con la respectiva cosecha, cuando la planta se encontraba en el estado 82 de acuerdo a la codificación BBCH (Bleiholder, 1996). Así mismo, se definieron cuatro tratamientos con tres repeticiones cada uno; estos tratamientos se basaron en riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional o completo (RC). Estas dos formas de aplicación (RPR y RC) se combinaron con dos volúmenes de agua de 0.3 y 0.5 litro cada uno, según la estimación de los parámetros hidrofísicos con la curva de retención agua-suelo para el suelo utilizado; en este sentido se obtuvieron cuatro

tratamientos con la siguiente configuración: 1) RPR300, 2) RPR500, 3) RC300 y 4) RC500² (Cuadro 3.1), totalizando un universo de 144 maceteros/plantas.

Cuadro 3.1: Identificación de los tratamientos utilizados en la evaluación del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Tratamientos	Descripción
RC500	Control: Aplicando el 100 por ciento de agua, equivalente a llevar el suelo a capacidad de campo según la estimación de sus características hidrofísicas con ayuda de la curva de retención agua-suelo; distribuyendo la aplicación del agua en partes iguales y al mismo tiempo (50 por ciento + 50 por ciento) en cada una de las dos secciones destinadas al riego, continuando hasta la aplicación <i>n</i> .
RPR500	Utilizando el 50 por ciento del agua de RC500, desfasando la aplicación en el tiempo (50 por ciento + 0 por ciento) en un riego y luego (0 por ciento + 50 por ciento) en el siguiente riego para cada una de las dos secciones destinadas para este fin, continuando hasta la aplicación <i>n</i> .
RC300	Utilizando el 60 por ciento de agua de RC500, distribuyendo la aplicación del agua en partes iguales y al mismo tiempo (50 por ciento + 50 por ciento) en cada una de las dos secciones destinadas al riego, continuando hasta la aplicación <i>n</i> .
RPR300	Utilizando el 50 por ciento del agua de RC300, desfasando la aplicación en el tiempo (50 por ciento + 0 por ciento) en un riego y luego (0 por ciento + 50 por ciento) en el siguiente riego para cada una de las dos secciones destinadas este fin, continuando hasta la aplicación <i>n</i> .

² Tratamiento control

3.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN AGUA-SUELO

La construcción de la curva de retención agua-suelo se la realizó en el proceso de deshidratación del suelo; en este sentido, se empleó una metodología similar a la de Paltineanu et al. (2013). Para esta actividad se utilizó la siguiente instrumentación de Decagon Devices® USA: un sensor MPS-6 para medir el potencial matricial del suelo (kPa) y un sensor FDR EC-5 [calibrado según lo recomendado por el fabricante, con la metodología de Cobos y Chambers (2010)] para medir la humedad volumétrica del suelo (%), conectados a los respectivos registradores de datos Em50 y Em5b, programados para adquirir la información cada 8 horas con ayuda del software ECH2O® Utility versión 1.74 (Figura 3.2).



Figura 3.2: Instrumentación (Decagon Devices® USA) para el monitoreo de los parámetros que permitieron la construcción de la curva de retención agua-suelo: sensor para medir el potencial matricial del suelo (MPS-6, kPa) y su data logger Em50; y el sensor EC-5 para monitoreo de la humedad volumétrica del suelo (%) y su data logger Em5b.

En este sentido se colocaron 4.0 kg de un sustrato heterogéneo (a una densidad de 0.89 g/cm³) para cultivos de macetas adquirido en el vivero de la UNALM (MO: 5.93 por ciento, pH: 7.67, CE: 1.35 dS/m), dentro de un recipiente de 4.5 cm³. Luego se insertaron ambos sensores en el suelo y se aplicó agua hasta saturar la muestra. El recipiente con la muestra de suelo fue expuesto a radiación solar directa para que se deshidrate hasta que su contenido volumétrico de agua fue de 0.1 m³/m³ ó aproximadamente 1000 kPa de potencial matricial (valor tomado como un nivel cercano al punto de marchitez permanente), situación que se consiguió al final de tres días, cuando se realizó la descarga de los datos desde los registradores a una computadora portátil. Los pares de datos adquiridos fueron insertados en

un gráfico de dispersión de una hoja de cálculo, donde el eje x correspondió a la humedad volumétrica del suelo, mientras que el eje y correspondió al potencial matricial del suelo, finalmente los datos fueron ajustado a un tendencia potencial para obtener los parámetros del modelo Campbell de la curva de retención agua-suelo (Bittelli y Flury, 2009), según la siguiente ecuación:

$$\Psi_{ms} = -a\theta^b \quad [4]$$

Donde,

- Ψ_{ms} : potencial matricial del suelo, kPa.
- a : parámetro relacionado con la pendiente de la curva, adimensional.
- b : parámetro relacionado con la distribución del tamaño de los poros, adimensional.

Campbell (1985) (citado por Jara, 1995), indica que los parámetros a y b también pueden ser determinados por soluciones simultaneas de la Ec. [4] cuando son conocidos los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, tal como se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$a = \exp[\ln(\Psi_{ms_{cc}}) + b \ln(\theta_{vs_{cc}})] \quad [5]$$

Donde,

- $\Psi_{ms_{cc}}$: potencial matricial del suelo a capacidad de campo, kPa.
- $\theta_{vs_{cc}}$: humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo, m^3/m^3 .

$$b = \frac{\ln(\Psi_{ms_{pmp}}) - \ln(\Psi_{ms_{cc}})}{\ln(\theta_{vs_{cc}}) - \ln(\theta_{vs_{pmp}})} \quad [6]$$

Donde,

- Ψ_{mspmp} : potencial matricial del suelo a punto de marchitez permanente, kPa.
- θ_{vsmpmp} : humedad volumétrica del suelo a punto de marchitez permanente, m^3/m^3 .

3.5. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA DE RIEGO A APLICAR PARA LLEVAR EL SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO

Considerando el volumen de suelo utilizado en cada sección de aplicación del riego en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, junto con los valores de humedad volumétrica del suelo, determinados a capacidad de campo y menor a este nivel en la curva de retención agua-suelo, se determinó el volumen de riego con la siguiente ecuación:

$$V_{riego} = (\theta_{vscc} - \theta_{vsx})V_{suelo} \quad [7]$$

Donde,

- V_{riego} : volumen de riego aplicado para llevar el suelo capacidad de campo, cm^3 .
- θ_{vscc} : humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo determinada en la curva de retención agua-suelo, $0.27 m^3/m^3$ (a -33 kPa de retención).
- θ_{vsx} : humedad volumétrica del suelo entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, en un punto considerado como límite crítico, según una clasificación reportada por Camarena et al. (2009) [considerado también como límite crítico cuando se mide la fracción de agua transpirable del suelo, FATS (Lago, 2011)], (Cuadro 1, anexo 1); en este sentido, $0.15 m^3/m^3$ (a -251 kPa de retención).
- V_{suelo} : volumen de suelo en la sección de riego del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva, $4500 cm^3$.

3.6. MEDICIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO EN LA HOJA DEL FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADO EN LOS MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

Las mediciones del potencial hídrico xilemático (Ψ_h , bar) se realizaron desde los 36 dds hasta los 43 dds (14-11-2014 hasta 21-11-2014) en el momento de máxima radiación solar entre las 11:00 y 14:00 horas, antes y 24 horas después de aplicar el riego. Las mediciones se realizaron en la misma planta, en hojas maduras (verdes) no terminales de las ramas del tercio medio, expuestas a radiación solar directa, utilizando una bomba Schölander (modelo 3005F01 de Soilmoisture Equipment Corp. Santa Bárbara, California-USA. Figura 3.3) con una tasa de presurización de 1 bar/2s. Las hojas fueron protegidas una hora antes de la medición con bolsas plásticas aluminizadas de cierre hermético para reflejar la luz del sol, evitar que se calienten, y detener la transpiración; de esta manera se consiguió el equilibrio entre el potencial hídrico de la hoja y el potencial hídrico del xilema (Valenzuela, 2011, Díaz, 2015).



Figura 3.3: Preparación de las hojas en las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva (izquierda), para la medición del potencial hídrico xilemático en la bomba Schölander (modelo 3005F01 de Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara, California-USA) (derecha).

3.7. MEDICIÓN DE LA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA EN LA HOJA DEL FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADO EN LOS MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

Las mediciones de la conductancia estomática ($gs, mmol/m^2s$) se realizaron en la misma planta, el mismo día y a la misma hora del monitoreo del potencial hídrico xilemático, utilizando el porómetro de estado estacionario SC-1 (Decagon Device USA) (Figura 3.4). Se seleccionaron dos plantas por cada tratamiento y repetición donde la hoja (foliolo central) elegida debía estar expuesta a radiación solar directa, sana y sin daño mecánico, ser de color verde y ubicada en las ramas del tercio medio de la planta.



Figura 3.4: Porómetro de estado estacionario SC-1 (Decagon Device USA) (izquierda) para el monitoreo de la conductancia estomática en hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva (derecha).

3.8. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA PRESIÓN-VOLUMEN (P-V) EN HOJAS DE PLANTAS DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADAS EN LOS MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

Para la construcción de la curva presión-volumen se empleó la metodología descrita por Brown y Tanner (1983); en este sentido antes y 24 horas después de aplicar el riego las hojas que cumplieran con los requisitos para la medición del potencial hídrico xilemático fueron preparadas de la misma manera para este procedimiento.

Una vez que se cortó la hoja (cubierta con la bolsa aluminizada) su peso fue registrado en una balanza analítica marca AND (modelo EJ-200, 0.01 g de precisión, Korea), luego se la introdujo en la cámara de la bomba Schölander (modelo 3005F01 de Soilmoisture Equipment Corp. Santa Bárbara, California-USA) donde fue presurizada a una tasa de 1 bar/2s. Con la ayuda de una lupa se observaba la parte del peciolo que queda expuesta y cuando comenzó a formarse un menisco de agua en el tejido, el ingreso de nitrógeno presurizado a la cámara fue detenido, este instante representaba el equilibrio de la tensión interna del xilema con la presión del gas en el interior de la cámara; por lo tanto, el valor en el manómetro se registró como el potencial hídrico del xilema. Este ciclo se repitió siete veces en la misma muestra siguiendo el procedimiento de Jara y Celis, 1989.

Después de realizada la última lectura, la hoja fue llevada al horno a 70°C hasta que la muestra alcanzará un peso constante, de esta manera se obtuvo el peso seco (Pseco). El peso a turgor máximo (Ptm) se lo determinó por la extrapolación del potencial hídrico hacia cero ($\Psi_h=0$) en la curva que se describió entre el Ψ_h y Pfresco (peso fresco).

Por otro lado, el contenido relativo de agua (CRA) se calculó con la siguiente expresión:

$$CRA = \frac{Pfresco_n - Pseco}{Ptm - Pseco} \quad [8]$$

Donde,

- $Pfresco_n$: cada uno de los pesos frescos de la hoja en el ciclo del procedimiento para la construcción de la curva P-V, g.

Después de la construcción de las curvas P-V (ver memoria de cálculo en anexo 2) para cada tratamiento, se siguió la metodología de Tyree y Hammel (1972) para la determinación del potencial osmótico a turgor máximo ($\Psi_{O(CRA=1)}$), potencial osmótico a turgor cero (también denominado potencial hídrico xilemático letal, $\Psi_{O(turgor=0)}$), contenido relativo de agua a

turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) y contenido de agua apoplástica ($CA_{Apoplástica}$); parámetros que también permitieron generar los diagramas de Höfler.

3.9. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_v) DEL TEJIDO DE LAS HOJAS DE PLANTAS DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADAS EN LOS MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

Para determinar el módulo de elasticidad se empleó la ecuación desarrollada por Stadelmann (1984), quien derivó ε_v de una función dependiente del potencial de turgor máximo (Ψ_{tm}) e inversamente proporcional al CRA respectivo, junto con la inclusión de un coeficiente de regresión (β) como factor de proporción, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_v = -\Psi_{tm} \times \beta \times \frac{1}{CRA_{\Psi_{tm}}} \quad [9]$$

Donde el factor β está relacionado con la sensibilidad de los cambios de elasticidad y el grado de saturación de agua, y puede ser calculado como el coeficiente de regresión a partir de una serie de cálculos individuales de pares de datos de potencial de turgor (Ψ_{t_n}) y CRA_n con la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{\sum_{n=1} \left[\left(\frac{1}{CRA_n} - 1 \right) \times (\ln \Psi_{t_n} - \ln \Psi_{tm}) \right]}{\sum_{n=1} \left(\frac{1}{CRA_n} - 1 \right)^2} \quad [10]$$

3.10. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN LAS PLANTAS DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADAS EN LOS MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA

La productividad del agua fue determinada como:

- Eficiencia del Uso del Agua (EUA), mediante la relación entre el peso seco de las estructuras aéreas de las plantas (vainitas más follaje, g) y el volumen de agua aplicada (litros), (Quezada et al., 2014).
- Eficiencia del Uso del Agua en vainitas (EUA_v), mediante la relación entre el peso seco de las vainitas (g) y el volumen de agua aplicada (litros), (FAO, 2003).
- Eficiencia de Producción de Vainitas (EPV), mediante la relación entre el número de vainitas (unidades) y el volumen de agua aplicada (litros), (FAO, 2003).
- Eficiencia de Concentración de Proteínas en las vainitas (ECP), mediante la relación entre la cantidad de proteínas (g) y el volumen de agua aplicada (litros), (FAO, 2003).

3.11. MONTAJE DEL EXPERIMENTO

En la Figura 3.5 se puede apreciar las diferentes etapas del montaje y desarrollo del experimento. En este sentido, el material vegetal utilizado (semillas) se adquirió en el Programa de Investigación y Proyección Social de Leguminosas de Grano y Oleaginosas, las mismas que correspondieron a frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Red Kloud, tipo determinado I. Las semillas se sembraron el 09-10-2014 y germinaron el 13-10-2014 (4 dds) en la sección correspondiente del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva, que en su interior contenía una turba comercial (Kekkilä Garden® DMS-05) colocada con una densidad de 0.3 g/cm³. El 16-10-2014 (7 dds) se aplicó un riego (en la sección correspondiente para este fin) para llevar el suelo a capacidad de campo, y entre el 20-10-2014 (11 dds) y el 07-11-2014 (26 dds) se aplicaron ocho riegos de 0.5 litros en las secciones del macetero destinadas para esta finalidad (totalizando 4 litros/planta), con el objetivo de estimular el crecimiento de las raíces laterales hacia estas secciones.

Por otro lado, el 30-10-2017 (18 dds) se instalaron 24 sensores FDR modelos EC-5, dos por cada planta/macetero central dentro de cada parcela y seis registradores de datos EM-5b, cada uno con capacidad para almacenar información de cuatro sensores, con la respectiva programación. En el mismo contexto, el 31-10-2014 (19 dds) se aplicó una dosis de 14 g/planta de fertilizante de liberación lenta (10-12-17) en todas las plantas; así mismo entre el 08-11-2014 (27 dds) y el 13-11-2014 (32 dds) la base superior de los maceteros se cubrió con una lámina plástica convencional (color blanca) para ayudar a controlar la presencia de insectos no deseables.

Después de la floración (28 dds, 06-11-2014) se inició la aplicación de los tratamientos de riego, para que estos no introdujeran modificaciones significativas en la fecundación de la flor. De esta forma los tratamientos se ejecutaron desde los 32 dds hasta los 52 dds (10-11-2014 hasta 30-11-2014), totalizando nueve aplicaciones de riego en cada planta; esta actividad se la realizó de forma manual con recipientes aforados en 0.3 y 0.5 litros.

Finalmente a los 55 dds (03-12-2014) se realizó la cosecha de las vainitas, las mismas que fueron sometidas a un análisis en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Zootecnia, para determinar la concentración de proteínas (Figura 9, anexo 1); así mismo, en dos plantas por parcela fue analizada la concentración de nitrógeno y potasio en el Laboratorio de Suelo-Planta-Agua-Fertilizante de la Facultad de Agronomía de la UNALM (Figura 10, anexo 1).




 <p>Siembra, 09-10-2014</p>	 <p>Hojas primarias (8 dds), 18-10-2014</p>
 <p>Hojas primarias (12 dds), 21-10-2014</p>	 <p>Primera hoja trifoliada (16 dds), 26-10-2014</p>
 <p>Instalación de sensores EC-5 (18 dds), 30-10-2014</p>	 <p>Instalación y programación de registrador de datos EM-5b (18 dds), 30-10-2014</p>
 <p>Instalación de plástico anti insectos no deseables (19 dds), 31-10-2014</p>	 <p>Aplicación de riego (29 dds), 08-11-2014</p> <p>Vainitas en días previos a la cosecha (52 dds), 30-11-2014</p>

Figura 3.5: Diferentes etapas del montaje y desarrollo del experimento en el área de demostrativa del PDRH-UNALM.

3.12. ANÁLISIS DE DATOS

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño en bloques completamente al azar con el fin de determinar si hubo diferencias significativas en cada una de las variables respuestas medidas, adicionalmente se hizo un test de comparación múltiple de Tukey ($\alpha=0.05$) para comparar medias y clasificar cada uno de los niveles de los factores evaluados. Previamente las variables fueron sometidas a prueba de normalidad (Test de Shapiro-Wilk $v-p>0.05$) y homogeneidad de varianza (Test de Bartlett $v-p>0.05$). Para el análisis de los datos se utilizó el programa SAS v. 9.2.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISEÑO DEL MACETERO CON GEOMETRÍA ACONDICIONADA A LA DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICULAR, CONSIDERANDO LOS MOVIMIENTOS ORIENTATIVOS QUE EL ESTÍMULO HIDROGRAVITRÓPICO PROVOCA SOBRE LAS RAÍCES DE LAS PLANTAS DE FRIJOL COMÚN

Para inducir un control en los mecanismos selectivos de las raíces a las señales abióticas (que promueven el crecimiento en respuesta a un estímulo, tal como lo expresan Raven et al., 1999; citado por Peralta, 2008), generado principalmente por la aplicación o presencia de agua en el suelo (hidrotropismo) o la influencia del vector gravitatorio de la Tierra (gravitropismo), se consideró en el diseño de la forma del macetero una geometría que permitió mantener separados los espacios donde se desarrollaron las raíces laterales y la raíz principal o pivotante del frijol, respetando la configuración espacial de su arquitectura radicular en todo su conjunto (Figura 4.1).

Takahashi y Scott (1991), Takahashi et al. (1996), Takahashi (1997 y 2003), Tsutsumi et al. (2003) y Takahashi et al. (2009) mencionan que debido a la estrecha interacción de las raíces con los mecanismos hidrogravitrópicos, resulta muy complejo diferenciar sus respuestas; principalmente el hidrotropismo (Kiss, 2000; Eapen et al., 2003; Cassab et al., 2013). Sin embargo, con el desarrollado de varios estudios se ha logrado contrarrestar la influencia del campo gravitacional, permitiendo separar ambas respuestas en varias especies de plantas; estas experimentaciones incluyen: mutaciones agravitrópicas (Firn et al., 2000), clinorotación (Blancaflor y Masson, 2003), y condiciones de microgravedad en el espacio (Wolverton et al., 2009).

Por otro lado, Guevara y Giordano (2015) mediante condiciones controladas generaron gradientes de humedad en un suelo arenoso, para evaluar la estimulación que el hidrotropismo provoca sobre el crecimiento de las raíces en un grupo de plantas nativas de

una región árida de Argentina (*Bulnesia retama* Griseb., *Prosopis flexuosa* DC., y *Prosopis alpacato* Phil.); encontrando que la orientación del crecimiento de las raíces laterales estuvo gobernada por los gradientes de humedad (65 por ciento en *B. retama*, 84 por ciento en *P. flexuosa*, y 88 por ciento en *P. alpacato*), por el contrario las raíces pivotantes (o principales) en cada especie no mostraron un crecimiento debido a la respuesta hidrotrópica.

En este sentido, el diseño propuesto en esta investigación aseguró que las raíces laterales (cuando emergen los primordios) eviten el vector gravitacional mediante la aplicación temprana de riegos de estimulación en la sección correspondiente (SDRL, Figura 4.1), siguiendo el mismo principio en que las raíces laterales vencen la fuerza de la gravedad para encontrar agua cuando colonizan un sustrato (Takahashi, 1994; Niklas, 1997 citado por Lanza, 2008). Mientras que la sección diseñada para contener a la raíz principal (CGPRL, Figura 4.1) permitió aislarla de los efectos del hidrotropismo, sin comprometer su crecimiento predeterminado debido a la combinación de los mecanismos de gravitropismo positivo (crecimiento en la dirección del vector gravitatorio; Eapen et al., 2003), circumnutación (movimiento helicoidal sobre el eje de dirección de crecimiento; Miglicciaccio et al., 2013), y tigmotropismo negativo (movimiento para evitar obstáculos; Lanza, 2008).

De esta forma, en la Figura 4.1 se muestran los detalles del diseño del macetero de respuesta hidrogravitropica selectiva, que permitió la implementación directa del RPR sin la necesidad de realizar modificaciones artificiales en la arquitectura del sistema radicular de las plantas de frijol común. En este sentido, las partes o secciones principales que caracterizan el macetero son:

- Dos secciones (identificadas como A y B) para el desarrollo de las raíces laterales (SDRL), que también corresponden a los lugares donde se aplica el riego; y
- Una sección que encapsula la raíz principal y proporciona el control inicial de la sensibilidad de las raíces al vector gravitatorio y a la humedad del suelo, denominada CGPRL (compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento radicular y posicionador de raíces laterales-principal).

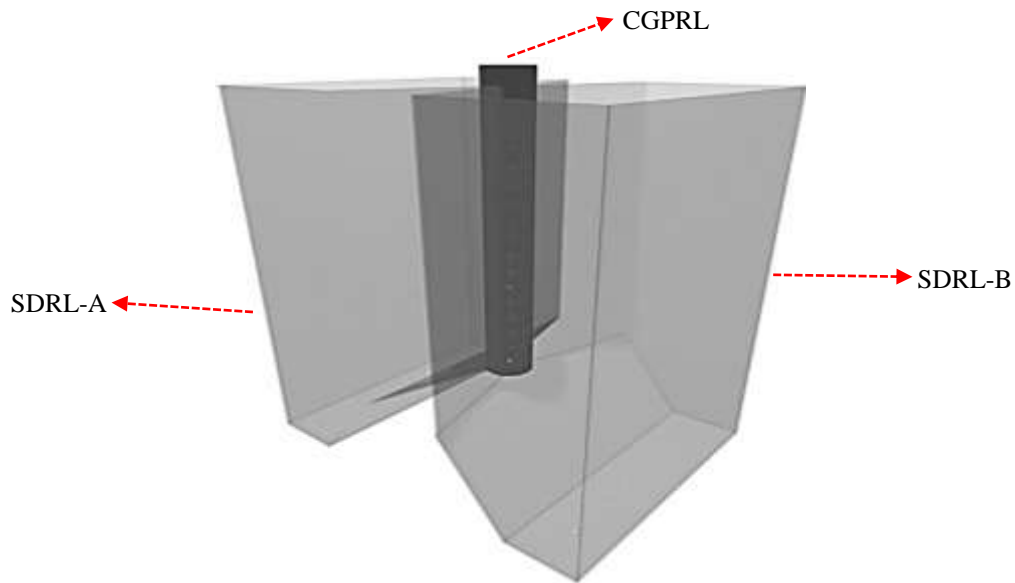


Figura 4.1: Perspectiva del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva para la aplicación del riego parcial de raíces (RPR) en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), diseñado bajo una geometría adaptada a los movimientos de orientación tridimensional que el gravitropismo e hidrotropismo provocan sobre el sistema radicular. Se destacan sus dos SDRL (secciones de desarrollo de raíces laterales y aplicación del riego, para cada lado identificados como A y B), y el CGPRL (compartimiento de germinación de la semilla, iniciación del crecimiento radicular y posicionador de las raíces laterales-principal). Sin escala.

Passini et al. (2003), Araujo et al. (2004), y Wakrim et al. (2005) en diferentes experimentaciones cultivaron frijol común en maceteros con capacidades de 3.5, 3 y 4 kg respectivamente; sin embargo, Poorter et al. (2012) después de analizar 65 estudios diferentes donde las plantas crecían en maceteros (incluida el frijol común), comprobaron que al duplicar el tamaño de estos recipientes, la producción de biomasa aumentaba hasta un 43 por ciento; con estas consideraciones se propuso que el volumen para cada SDRL correspondiera a 4500 cm³, totalizando ambas secciones un volumen de 9000 cm³ (altura= 22 cm, y base total 20 cm por 25 cm).

En el caso específico del CGPRL (Figura 4.2) el volumen fue de ~125 cm³; en este elemento de geometría cilíndrica ($\varnothing_i = 2.85$ cm y $h = 18.0$ cm), el espacio de la cama de geminación (donde también ocurre la correcta disposición de la plántula por su rápida respuesta gravitatoria y fototrópica) correspondió a los primeros 3.0 cm (medidos en la dirección

superficie-base, distancia bajo la que iniciaban los orificios de salida de las raíces laterales, OSRL $\varnothing= 0.3$ cm); esta profundidad se consideró en base al máximo diámetro polar que alcanzó la semilla de frijol (variedad Red Klaud), cuando su longitud promedio pasó de 1.9 cm a 2.4 cm (Figura 2, anexo 1) en la fase inicial de la germinación; donde ocurre la absorción de agua y se aceleran los procesos que activan la división y alargamiento celular hasta que se produzca la emergencia de la radícula (Doria, 2010; Sánchez-Urdaneta et al., 2011).

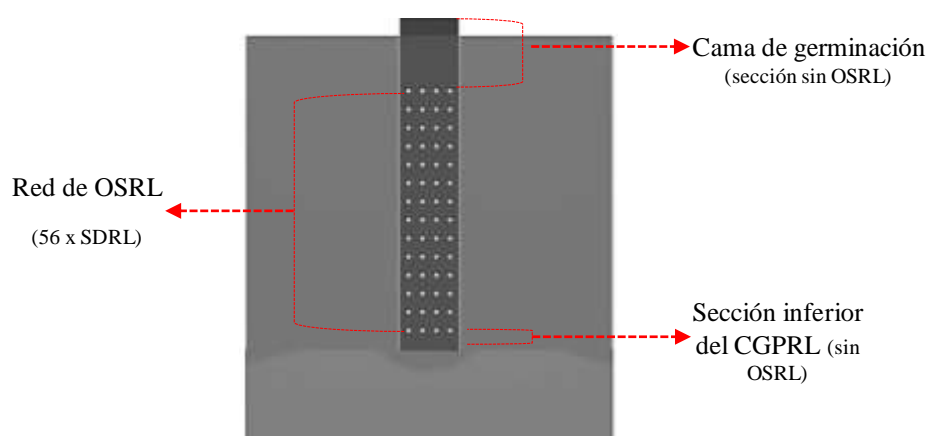


Figura 4.2: Vista ortogonal del macetero de respuesta hidrogravitropica selectiva, desde la SDRL-B (según la Figura 4.1); donde se aprecia la ubicación del CGPRL (compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento y posicionador de las raíces laterales-principal) con sus respectivas partes [cama de germinación, distribución de la red de orificios de salida de las raíces laterales (56 OSRL/SDRL) y sección inferior del CGPRL]. Escala 1:4.

En otro contexto, Zarebanadkouki et al. (2013) después de utilizar neutrografía para rastrear el transporte de agua en raíces de *Lupinus albus*, encontraron que la mayor parte de la absorción de agua se produjo en las raíces laterales, concluyendo que desde el punto de vista hidráulico la función de la raíz principal consistía en recibir el agua de estas raíces y transportarla hacia las estructuras aéreas de la planta. Este antecedente es importante porque permitió asegurar que el aislamiento que provocó el CGPRL para mantener el sustrato con niveles de humedad más bajos que en el suelo contenido en las SDRL, no alteraría el normal desempeño de la raíz principal.

En este sentido, el CGPRL mantuvo encapsulada en su interior a la raíz principal, asegurando su crecimiento de forma vertical por los efectos que la fuerza de la gravedad provoca de forma singular en este órgano (Tian et al., 2014). Mientras que una red duplicada de 56 OSRL alineados en cuatro columnas de 14 filas y distribuidos equidistantemente (1 cm) sobre las paredes del CGPRL, permitió la salida de las raíces laterales hacia ambas SDRL (Figura 4.3); fenómeno que se activó debido a la formación de patrones hídricos en el suelo frente al eje circunferencial de la raíz principal (tal ha sido observado por Bao et al., 2014), donde está involucrado el principio de organización para la ramificación de las raíces laterales debido a la acumulación de auxina en puntos específicos alrededor de ese eje (Dubrovsky et. al., 2006; Ditengou et. al., 2008; Dubrovsky et al., 2009; Szymanowska y Lipowczan, 2014), que luego implica movimientos exploratorios de las raíces laterales en el suelo por los efectos estimulativos que produce el hidrotropismo (Cassab et al., 2013; Guevara y Giordano, 2015).

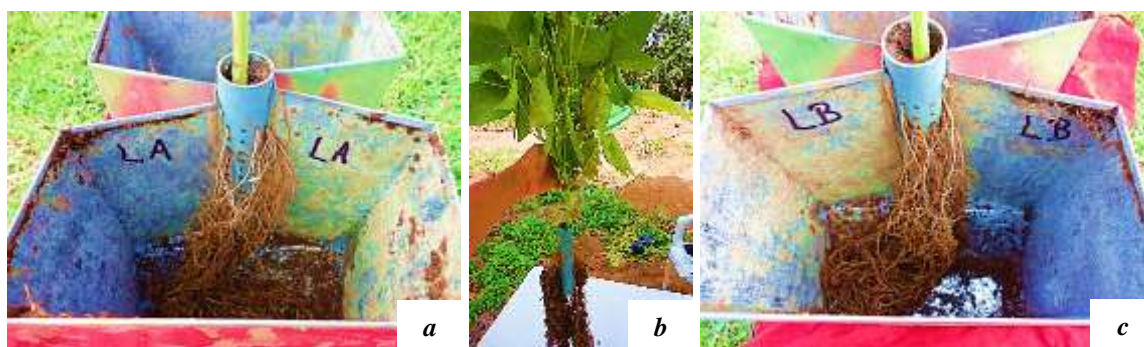


Figura 4.3: Compartimiento para la germinación de la semilla, iniciación del crecimiento y posicionador de las raíces laterales (CGPRL) instalado en el interior del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva; donde raíces laterales de frijol común salen por la red de orificios hacia las SDRL A-B (a y c, respectivamente). Planta de frijol común extraída del macetero (con la raíz principal encapsulada en el interior del CGPRL y las raíces laterales fuera de él), con todas sus partes desarrolladas y completas (b).

Puértolas et al. (2015) trasplantaron plántulas de papa (*Solanum tuberosum* L.) de siete días de emergencia para someterlas a RPR dentro de un macetero, donde los dos compartimientos para el desarrollo de las raíces laterales y aplicación del agua de riego (~1800 cm³ cada uno) estaban separados por una capa de grava (entre 3 y 4 cm de espesor y diámetro partículas de 1.5 a 2.0 cm, donde también se desarrollaba la raíz principal) que interrumpía la capilaridad entre ambas secciones (Figura 3, anexo 1).

La estrategia planteada por Puértolas et al. (2015) para la aplicación de RPR en la configuración de este macetero, requería inclinarlo 20° hacia el lado donde se aplicaba el riego y mantenerlo en esa posición durante 15 minutos, para evitar que el agua llegue hacia el lado opuesto, donde la humedad debía mantenerse con valor inferior; así mismo, una malla con orificios de 0.7 mm de apertura colocada en la base inferior del macetero, evitaba la acumulación de agua drenándola hacia el exterior.

En el macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva estos inconvenientes fueron superados al ubicar el CGPRL sobre una base (*a*) con un nivel superior a las bases de cada SDRL (*b*) (Figura 4.4). Este desnivel eliminó cualquier posibilidad de acumulación de agua frente a la red de OSRL (Figura 4.2) por donde salieron las raíces laterales hacia cada SDRL (Figura 4.3); aún, cuando en evaluaciones preliminares del macetero, el suelo contenido en una de las SDRL fue saturado con agua, sin llegar a transmitir humedad hacia la SDRL opuesta (Figura 4, anexo 1). Así mismo, al colocar el suelo dentro de las SDRL con una densidad aparente mayor (0.89 g/cm^3) al sustrato contenido dentro del CGPRL (0.30 g/cm^3), se logró interrumpir el flujo capilar horizontal entre estas secciones del macetero por el gradiente de conductividad hidráulica que se genera cuando en capas adyacentes del suelo se presentan estas condiciones (Donado, 2004; Casanova et al., 2009), tal como ha sido comprobado en varias experimentaciones (Filgueira et al., 2006). En otro contexto, un espacio de 2.0 cm sin OSRL en la base inferior del CGPRL (Figura 4.2), junto con puntos de drenajes (*c*) en las bases de ambas SDRL (*a*) y del CGPRL (*b*) (Figura 4.4), constituyeron elementos claves que aseguraron el control y el mantenimiento adecuado de los niveles de humedad del suelo dentro de las SDRL cuando se aplicaba el riego.

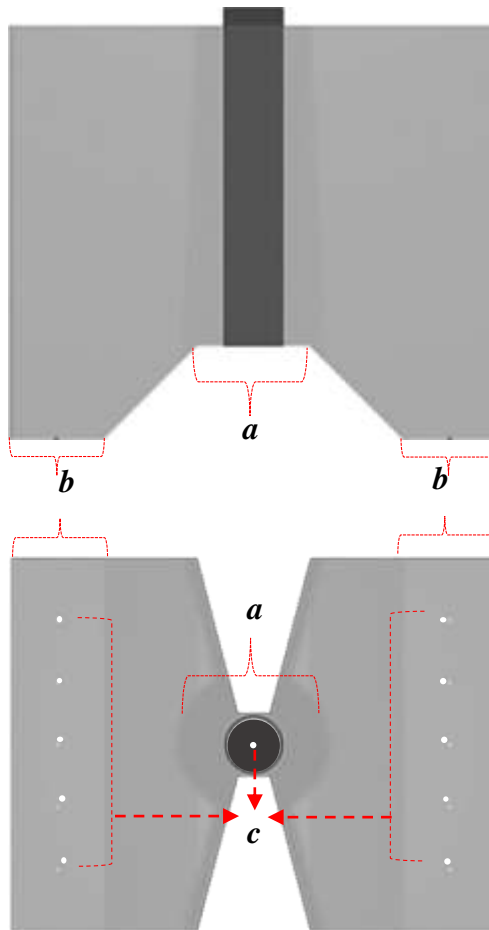


Figura 4.4: Proyecciones ortogonales del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva [lateral izquierda (arriba) e inferior (abajo), según la Figura 4.1], donde se aprecian las posiciones de los elementos que controlan y mantienen niveles adecuados de humedad del suelo en ambas SDRL, para permitir la aplicación y manejo del RPR (*a*, base de descanso del CGPRL; *b*, base de las SDRL; *c*, puntos de drenaje). Escala 1:4.

4.2. DESEMPEÑO DEL MACETERO DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA RESPECTO A LA APLICACIÓN DEL AGUA CON RIEGO PARCIAL DE RAÍCES (RPR) Y RIEGO CONVENCIONAL (RC) EN PLANTAS DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)

En la Figura 4.5 se observan los hidropatrones espacio-temporales que se formaron en el suelo debido de los nueve riegos aplicados en las SDRL A y B, con las técnicas RPR (5a y 5c) y RC (5b y 5d) después de la floración (32 dds), para que los tratamientos no logren introducir modificaciones significativas en la fecundación de la flor.

En la aplicación de RPR, se realizaron cinco riegos en la SDRL-A y cuatro en la SDRL-B, debido a la singular configuración de la técnica (Figura 4.5a y 4.5c); mientras que en el caso de la aplicación de RC los nueve riegos se realizaron en ambas SRDL (Figura 4.5b y 4.5d).

En la Figura 4.5a y 4.5c también se puede apreciar que no existió transferencia horizontal de humedad entre las dos SDRL, cuando se aplicó el riego a una de ellas. Así mismo, en la Figura 4.5b y 4.5d se aprecia que ambos patrones de humedad del suelo dentro de las dos SDRL se mantuvieron con similares niveles antes y después de aplicar el riego. En este sentido, el comportamiento de los hidropatrones en el suelo, generados por la aplicación del riego, describieron las tendencias representativas para ambas técnicas, tal como han sido explicadas por Wakrim et al. (2005), Zegbe et al. (2006), López et al. (2008), y Chamú et al. (2011); sin embargo, es importante destacar que, estos autores mantuvieron separados en dos maceteros y/o volúmenes de control diferentes las secciones de las raíces, que previamente fueron divididas con procedimientos artificiales.

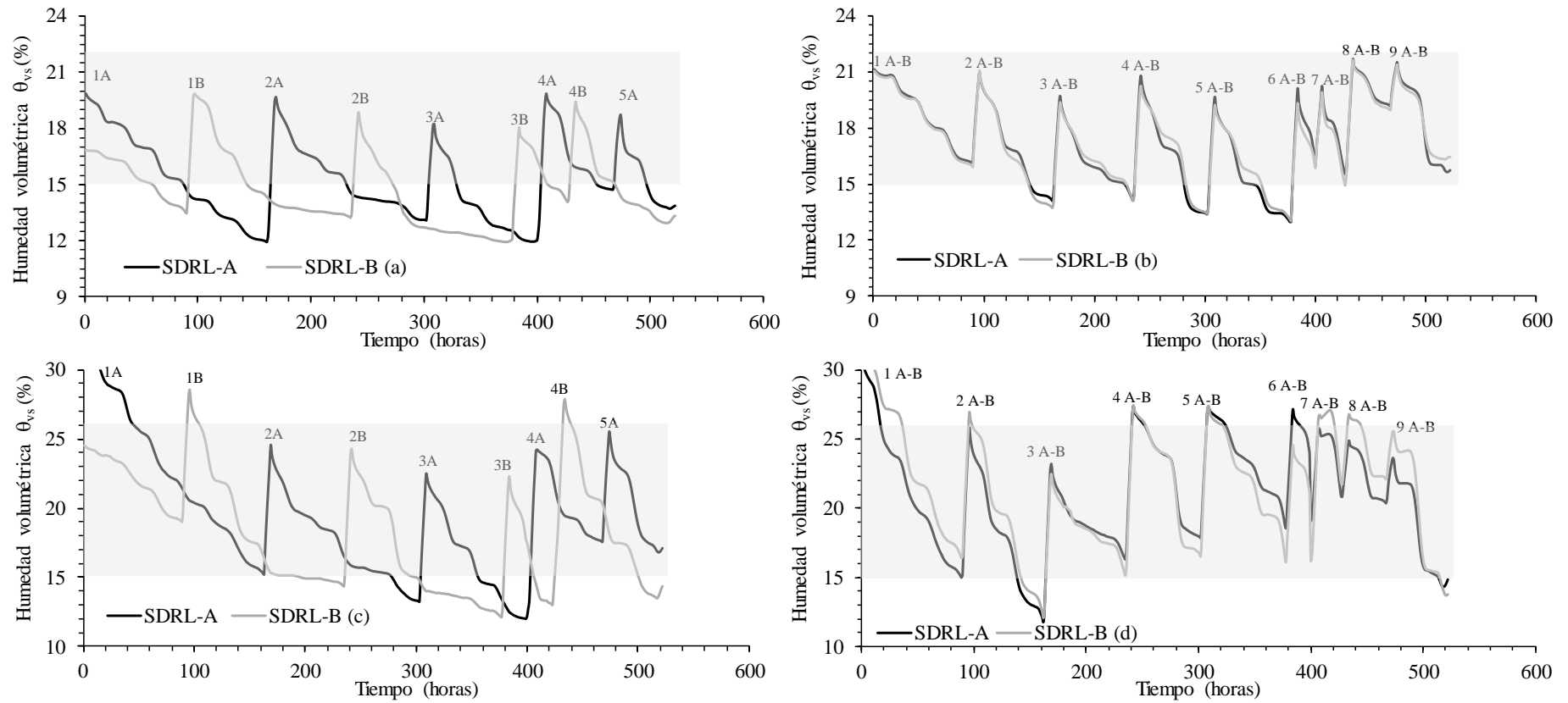


Figura 4.5: Medias móviles de seis horas del monitoreo (con el sensor EC-5) de los hidropatrones formados en el suelo, producto de la aplicación de nueve riegos (después de la floración del frijol común, 32 dds), en las SDRL A y B del macetero de respuesta hidrogravitópica selectiva, en los tratamientos con RPR300 (a), RC300 (b), RPR500 (c), RC500 (d).

En el mismo contexto, en la figura 4.5 se aprecia una franja que representa los niveles del contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_{vs}) dentro de un rango de agua transpirable para las plantas en el sustrato utilizado, definido entre 26 por ciento a -41 kPa (θ_{vs500} en los tratamientos donde se aplicó 0.5 L) y 22 por ciento a -76 kPa (θ_{vs300} en los tratamientos donde se aplicó 0.3 L), ambos considerados como límite superior para ambos rangos (por su cercanía a capacidad de campo, 28 por ciento a -33 kPa), y 15 por ciento a -252 kPa para el límite o punto crítico (θ_{vsx} , Figura 4.6). Vega y Mejía, (2015) indican que estas determinaciones permiten programar la aplicación del riego y mantener el estado hídrico de la planta dependiente de las condiciones atmosféricas, con valores de potencial hídrico alejados de un nivel letal.

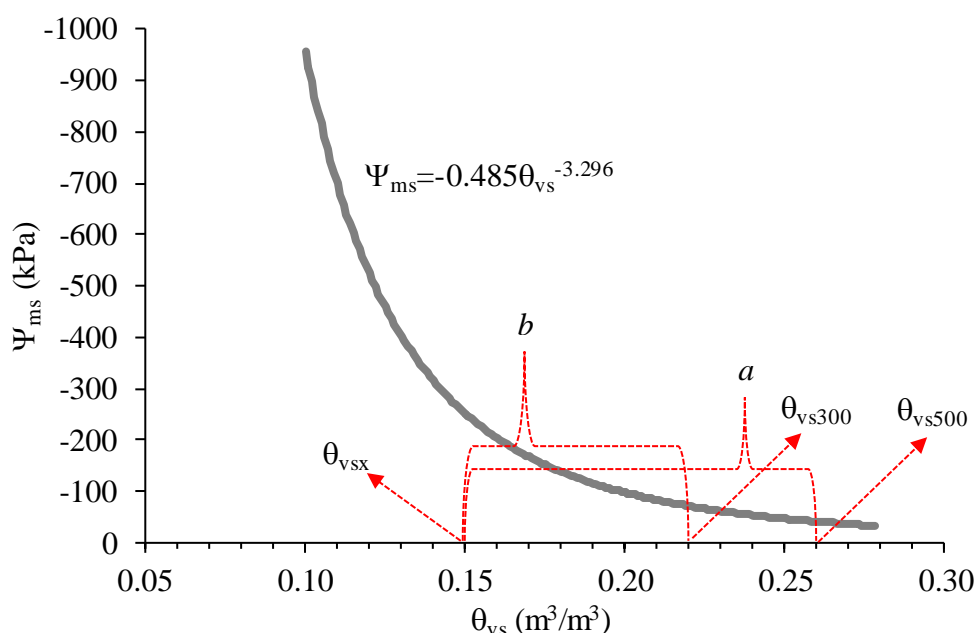


Figura 4.6: Curva de retención agua-suelo (con los parámetros del modelo de Campbell 0.485 y 3.296), generada a partir de datos tomados con los sensores MPS-6 y EC-5 (Decagon Devices®) siendo a (68.8 por ciento, $\theta_{vs500}-\theta_{vsx}$) y b (63.4 por ciento finales de a , $\theta_{vs300}-\theta_{vsx}$) los rangos de agua transpirable por las plantas en el sustrato utilizado, para los tratamientos donde se aplicaron 0.3 L y 0.5 L respectivamente.

En otro contexto la figura 4.7 muestra la evolución de la distribución porcentual del potencial matricial del suelo (Ψ_{ms}) entre las SDRL A y B, durante los ocho días donde fueron evaluados los parámetros biofísicos en las plantas de frijol bajo RC y RPR. Se puede apreciar que donde se manejaron las plantas con RC, existió un comportamiento estable del Ψ_{ms} entre

las SDRL A y B, tal como lo representa el balance individual de los diagramas pasteles de estos tratamientos en el día del monitoreo; independientemente si el momento corresponde a antes de la aplicación del riego o 24 horas después de su aplicación.

En el caso de los tratamientos con las plantas manejadas bajo RPR se aprecia un comportamiento no-estable del Ψ_{ms} , donde, su distribución en las SDRL va alterando entre mayor y menor, dependiendo si el momento corresponde a antes de la aplicación del riego o 24 horas después de su aplicación, tal como se aprecia en el balance individual de los diagramas pasteles.

Estos antecedentes permiten establecer que la estructura de la distribución relativa del Ψ_{ms} entre ambas SDRL, puede considerarse como una estrategia para el manejo del agua en la zona radicular, frente a las respuestas de “sensibilidad al riesgo” que se activan en las raíces de las plantas cuando varía la disponibilidad del recurso hídrico aplicado (Dener et al., 2016).

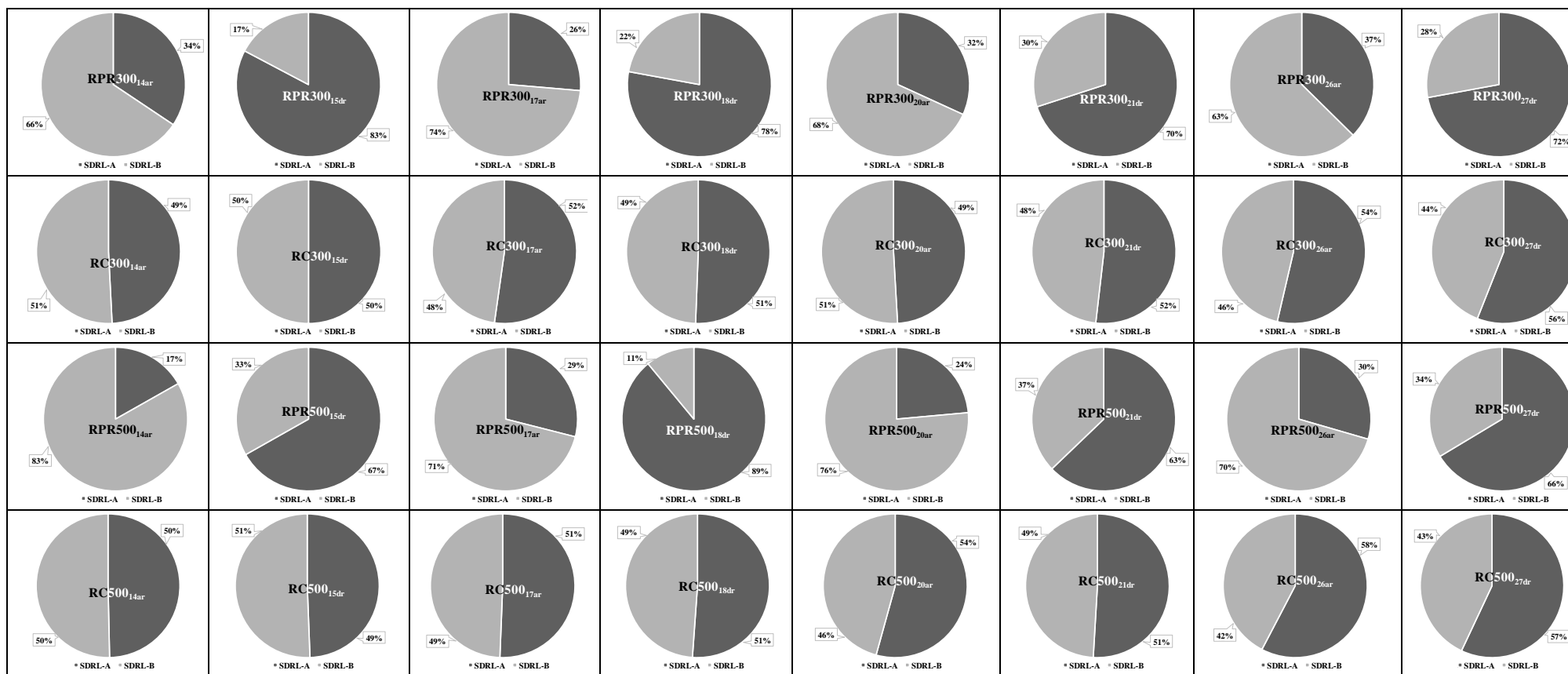


Figura 4.7: Evolución de la distribución relativa del potencial matricial del suelo (Ψ_{ms}) entre las SDRL-A y SDRL-B bajo los cuatro tratamientos de riego (RPR300, RC300, RPR300 y RPR500) en los días 14, 15, 17, 18, 20, 21, 26 y 27 de noviembre del 2014 antes (ar) y 24 horas después de aplicar riego (dr).

Por otro lado la Figura 4.8 representa el volumen total de agua empleado en los cuatro tratamientos (37.6 litros 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; y nueve aplicaciones de riego según los tratamientos respectivos); distribuidos en mayor cantidad (13 litros, 34.6 por ciento) para RC500 (control), de acuerdo a la capacidad hídrica del suelo definida con la curva de retención agua-suelo (Figura 4.6). En el mismo contexto, el tratamiento donde se empleó menor cantidad de agua correspondió a RPR300 con 17.8 por ciento (6.7 litros), equivalente al 51.5 por ciento del total empleado en el control; así mismo, en RC300 y RPR500 se utilizaron un total de 9.4 (25.0 por ciento) y 8.5 (22.6) litros respectivamente; representando una reducción de 27.7 y 34.6 por ciento respecto al control.

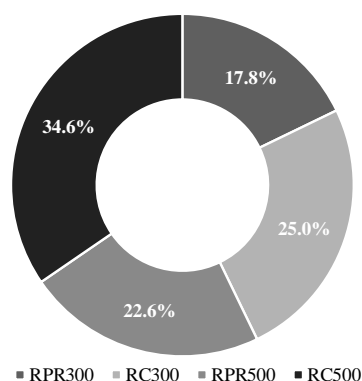


Figura 4.8: Distribución porcentual del volumen total de agua suministrada en la irrigación de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva [37.6 litros distribuidos en: ocho riegos para la germinación de la semilla y estimulación de los primordios de las raíces laterales para que en el inicio de su desarrollo atenúen la influencia del vector gravitatorio; y nueve aplicaciones en los tratamientos de riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500)].

Es importante destacar que en diferentes cultivos, varios autores [Wakrim et al. (2005) en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), Savić et al. (2008) en tomate (*Lycopersicon esculentum*), Hutton y Loveys (2011) en naranjo (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck), y Xie et al. (2012) en papa (*Solanum tuberosum* L.)] aunque consideran el monitoreo de variables hidrofísicas del suelo, utilizan la evapotranspiración y/o transpiración del cultivo para asignar la cantidad de agua en los tratamientos bajo evaluación. Sin embargo, coincide en

casi todos los casos el mantenimiento de una reducción de aproximadamente el 50 por ciento del empleo de agua en RPR sobre RC.

Considerando los niveles de agua empleados, en la Figura 4.9 se muestra la respuesta de los tratamientos al número de raíces laterales (NRL) presente en los OSRL de cada SDRL. Estas raíces se caracterizaron por tener longitudes entre 47 cm y 48.7 cm en promedio y una estructura con varios niveles de bifurcación; resultados que se enmarcan dentro de los rangos obtenidos por Vieira et al. 2008 quienes reportaron valores entre 25.9 cm y 104.6 cm en cuatro genotipos de frijol común con patrón de crecimiento determinado tipo I.

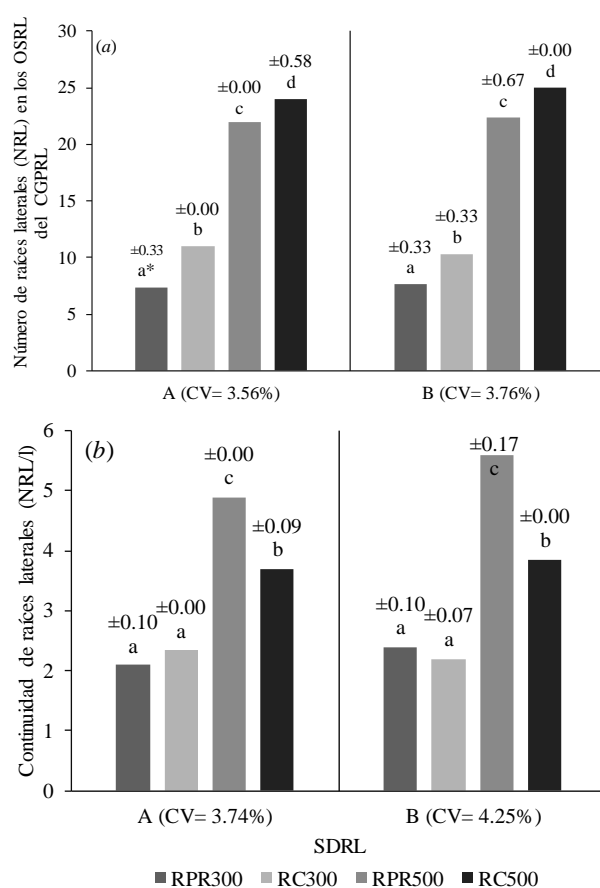


Figura 4.9: Presencia de raíces laterales de frijol común (con longitudes comprendidas entre 47.0 cm y 48.7 cm) en los cuatro tratamientos de riego, en función de las SDRL A-B del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva: a) número de raíces laterales (NRL) presentes en los OSRL y b) continuidad de raíces laterales (NRL/l). **error estándar n=3. CV, coeficiente de variación. Medias con una letra distinta son significativamente diferentes, test de Tukey $p \leq 0.05$.*

En la Figura 4.9a se aprecia que existe una respuesta proporcional del NRL a la localidad espacio-temporal de agua aplicada para cada uno de los tratamientos en ambas SDRL; en este sentido, el mayor NRL se presentó en los tratamientos con aplicación de RC sobre los tratamientos donde se aplicó RPR. Sin embargo, es importante destacar que el mayor incremento proporcional de NRL se presentó entre los tratamientos RPR300 y RPR500, sobre RC300 y RC500 con un incremento promedio aproximado de tres y dos veces más NRL en ambas SDRL, respectivamente. Estos resultados también demostraron un apropiado funcionamiento del CGPRL, al haber posicionado y direccionado hacia ambas SDRL del macetero un número similar de raíces laterales, independientemente del tratamiento.

En la Figura 4.9b se puede observar el efecto del volumen total de agua aplicada que originó la presencia continua de RL en cada SDRL del macetero. En estas dos secciones (SDRL), las plantas de los cuatro tratamientos presentaron una similar continuidad de estas raíces (NRL/l), aun cuando en la sección A del macetero (en los tratamientos con RPR) se aplicó un riego más que en la sección B (debido a la configuración singular de la técnica); por lo tanto, el mantenimiento de esa continuidad, se debe a la capacidad que tienen las puntas de las raíces para procesar información sobre su entorno específico (humedad del suelo), integrarlo en su fisiología (Robbins y Dinneny, 2015), y medir los riegos de aversión o propensión (Figura 5, anexo 1) para mantener, elevar o disminuir esta característica (Dener et al., 2016).

En estas circunstancias el tratamiento RPR500 consiguió 39.9 por ciento de incremento promedio en la continuidad de raíces laterales sobre el control (RC500); este efecto puede ser explicado por la teoría de sensibilidad al riesgo (Gómez et al., 2013), así, las plantas bajo RC500 mostraron una respuesta de “aversión al riesgo”, es decir, que el mantenimiento de un nivel óptimo más constante en la cantidad de recurso hídrico en suelo contenido en ambas SDRL, fue suficiente para mantener una continuidad de raíces sin necesidad de “asumir el riesgo” de aumentarla; mientras que en las plantas bajo RPR500 la respuesta fue de “propensión al riesgo”, es decir, que cuando los niveles óptimos de la cantidad de recurso hídrico en suelo se mantuvieron variables entre ambas SDRL ocurrió un incremento de la continuidad de raíces como una respuesta adaptativa a la variación del recurso, tal como ocurre en las decisiones de supervivencia que consideran los seres humanos y otros animales

cuando la opción estable no proporciona lo que necesitan (Dener et al., 2016). Finalmente se puede decir que la continuidad de raíces laterales en RPR300 y RC300 fue “indiferente al riesgo” (Figura 4.9b).

Trabajos recientes también han demostrado que la distribución del agua aplicada en el suelo influye en la forma y función de los tejidos que quedan tras el crecimiento de las raíces; estos tejidos adecuan su desarrollo para aprovechar la heterogeneidad espacial del perfil de humedad en la atmósfera del suelo, con una adaptación del sistema de raíces para la absorción óptima del agua y el transporte de nutrientes (Zarebanadkouki et al., 2013; Bao et al., 2014). En este sentido, la Figura 4.10a muestra la ubicación de tres secciones con OSRL a lo largo de todo el eje del CGPRL, que se caracterizaron por desarrollar una diferente presencia de raíces laterales (identificadas en la Figura 4.9) en función a los cuatro tratamientos de riego:

- Sección 1 con 32 OSRL hacia cada SDRL, comprendida entre las filas 1-8 correspondió a la presencia de raíces en el tratamiento RPR300.
- Sección 2 con 36 OSRL hacia cada SDRL, comprendida entre las filas 1-9 fue común para la presencia de raíces en los tratamientos RPR500 y RC300.
- Sección 3 con 56 OSRL hacia cada SDRL, comprendida y entre las filas 1-14 (todo el eje del CGPRL con OSRL) para la presencia de raíces el tratamiento RC500.

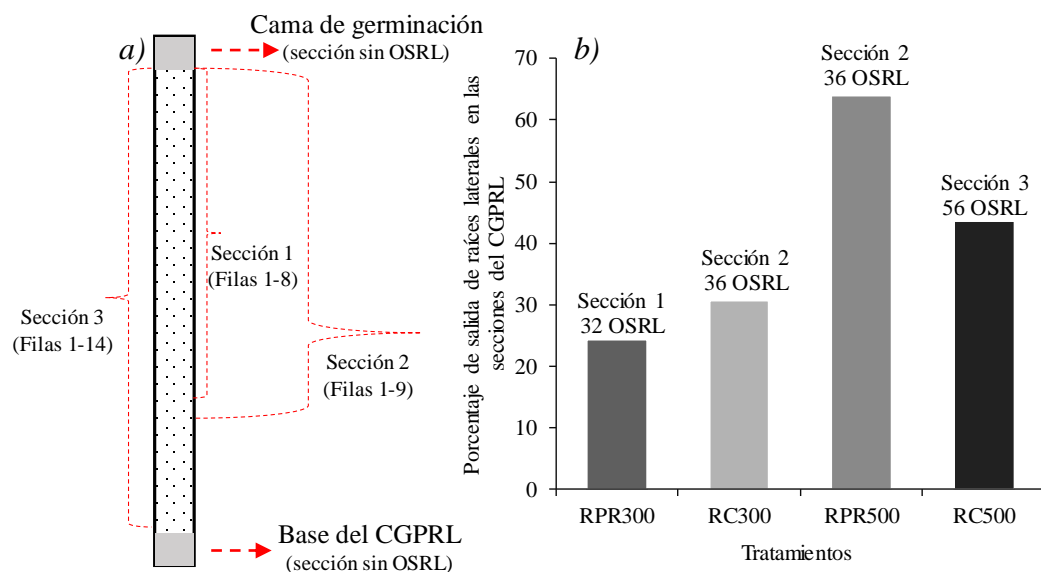


Figura 4.10: Identificación de la ubicación de tres secciones en el eje longitudinal del CGPRL, donde los OSRL presentaron raíces laterales de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) con longitudes promedio entre 47.0-48.7 cm. Sección 1 entre las filas 1-8 con 32 OSRL en ambas SDRL para RPR300, sección 2 entre las filas 1-9 con 36 OSRL en ambas SDRL para RPR500 y RC 300, y sección 3 entre las filas 1-14 con 56 OSRL en ambas SDRL para RC500) (a). Distribución del porcentaje de la concentración de salida de raíces laterales de frijol común para cada sección del CGPRL en función de los cuatro tratamientos de riego (b).

En la Figura 4.10a también es posible apreciar que la distribución de raíces laterales con las características ya señaladas, se concentró entre las filas 1-9 del CGPRL (11.5 cm de profundidad, medidos desde la superficie de la cama de semilla) para los tratamientos RC300, RPR300 y RPR500, mientras que en tratamiento RC500 estas raíces estuvieron presentes en todo el eje del CGPRL; por lo tanto, se puede afirmar que cuando la aplicación del agua de riego representa el volumen que mantiene al suelo con un nivel más cercano a capacidad de campo (según lo determinado en la curva de retención agua-suelo, Figura 4.6), la presencia de raíces laterales puede incrementarse en el perfil húmedo (Ojeda y Pire, 1996; Yuge et al., 2012).

Robbins y Dinneny (2015) también han demostrado que los primordios generadores de nuevas raíces laterales en el eje circunferencial de la raíz principal ajustan su presencia en función de la disponibilidad del agua en el suelo, considerándola como una propiedad que adoptan estas raíces cuando crecen en ambientes con heterogéneos niveles de humedad. Este

efecto se ve representado en la Figura 4.10b donde se aprecian los diferentes niveles de concentración de raíces laterales en los tratamientos evaluados; en este sentido, se puede afirmar que hasta cierto punto el aumento de la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas (Figura 4.6) según los volúmenes aplicados (Figura 4.8), genera un incremento de la densidad de estas raíces (desde 24.5 por ciento en RPR300 de la sección 1 hasta 43.8 por ciento en RC500 de la sección 3) que se relaciona casi perfectamente con el aumento en la profundidad del CGPRL; sin embargo, en el tratamiento RPR500 se anula esa tendencia; al parecer la aplicación del riego parcial de raíces (cuando el volumen de agua aplicado al suelo mantiene un nivel aproximado a la capacidad de campo) genera una mayor capacidad de producir más raíces laterales y a menor profundidad, permitiendo incrementar la extracción de agua del suelo y mantener a la planta con un buen régimen hídrico.

Zarebanadkouki et al. (2013) después de monitorear el transporte de agua en raíces de *Lupinus albus* cultivado en maceteros de aluminio (30×25×1, cm), indicaron que la absorción de agua fue mayor en las capas superiores del suelo. En el mismo sentido Ho et al. (2005) mencionan que la presencia abundante de raíces laterales en los primeros centímetros del suelo, son importantes para la absorción de nutrientes que se concentran a esta profundidad; de igual forma, Sponchiado et al. (1989) (citado por Polanía et al., 2009) encontraron que en fríjol común grandes producciones de raíces se asocian a una mayor tolerancia y evasión de la sequía, sugiriendo un incremento de la extracción de agua del suelo; así mismo, White y Castillo (1992) revelan que en esta especie las diferencias en redimiendo también están determinadas por la distribución de su sistema de raíces.

4.3. POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO EN FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADO EN MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA, RESPECTO A LA APLICACIÓN DEL AGUA CON RIEGO PARCIAL DE RAÍCES (RPR) Y RIEGO CONVENCIONAL (RC)

En el cuadro 4.1 se observa la evolución del potencial hídrico xilemático antes y 24 horas después de la aplicación del riego, donde se aprecia que el tratamiento RPR300 fue el que mostró los valores más cercanos al potencial hídrico letal para esta especie (-15 bares) en el momento previo a la aplicación del riego, los mismos que fluctuaron entre -10.42 y -8.08 bares; 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 bares.

Cuadro 4.1: Potencial hídrico xilemático (bar) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) medido al medio día (Ψ_{har} antes del riego y Ψ_{h24dr} 24 horas después del riego), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Ttos	14 ²	15	17	18	20	21	26	27
	Ψ_{har}	Ψ_{h24dr}	Ψ_{har}	Ψ_{h24dr}	Ψ_{har}	Ψ_{h24dr}	Ψ_{har}	Ψ_{h24dr}
RPR 300	-8.08 ±0.22a	-6.50 ±0.14a	-8.57 ±0.07a	-7.25 ±0.14b	-8.58 ±0.08a	-7.50 ±0.14a	-10.42 ±0.08a	-8.65 ±0.08b
RC 300	-6.00 ±0.00b	-5.67 ±0.08b	-6.60 ±0.06b	-5.58 ±0.08c	-6.25 ±0.14b	-5.58 ±0.08b	-9.92 ±0.08b	-7.58 ±0.08c
RPR 500	-7.33 ±0.17a	-6.67 ±0.08a	-8.27 ±0.15a	-7.67 ±0.08a	-8.35 ±0.08a	-7.92 ±0.08a	-9.92 ±0.08b	-9.00 ±0.00a
RC 500¹	-5.33 ±0.17c	-4.77 ±0.02c	-5.22 ±0.15c	-4.75 ±0.03d	-5.17 ±0.17c	-4.65 ±0.08c	-7.00 ±0.00c	-5.83 ±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

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, ns: no significativo)

CV: coeficiente de variación.

Ttos: Tratamientos.

^{1/} Tratamiento control.

^{2/} días de evaluación en el mes de noviembre de 2014.

De esta forma, Bradford y Hsiao (1982) indican que en algunas especies de plantas, sus procesos fisiológicos básicos se mantienen con un aceptable desempeño hasta los -10 bares de Ψ_h cuando están adecuadamente regadas (Figura 6, anexo 1), y de acuerdo con Abrisqueta (2010) mientras se controle el potencial hídrico del xilema se puede maximizar el rendimiento y la calidad del fruto.

En el mismo contexto Wakrim et al. (2005) en un sistema de raíz dividida artificialmente, encontraron valores de Ψ_h en frijol común que fluctuaron entre -3.2 y -4.7 kPa cuando fue regado de forma convencional, y de -4 y -7 kPa cuando la aplicación de agua fue efectuada bajo riego parcial de raíces; mientras que con el mismo procedimiento Aguirre et al. (1999) obtuvieron valores de -5 a -9 kPa en RC y -4 a -8 kPa en RPR; sin embargo, es importante destacar que en ambos trabajos no fueron consideradas las características hidrofísicas del suelo, porque las aplicaciones de riego se realizaron diariamente; de esta forma, debieron haber manejado bajas amplitudes en el potencial hídrico xilemático ($\Delta\Psi_h$).

En esta trabajo, el tratamiento RPR500 fue el que mostró el menor valor promedio de la $\Delta\Psi_h$ (-0.65 bar, de las mediciones realizadas antes y 24 horas después de la aplicación del riego); en la Figura 4.11 se aprecia que en el tratamiento control (RC500) también se obtuvo un valor de la $\Delta\Psi_h$ similarmente bajo (-0.68 bar), mientras que la mayor amplitud fue observada en el tratamiento RPR300 con -1.44 bares; en este sentido, se puede decir que la idea de manejar bajas $\Delta\Psi_h$ es beneficioso para mantener un saludable régimen hídrico en las plantas, de la misma forma que se opera en el riego localizado de alta frecuencia.

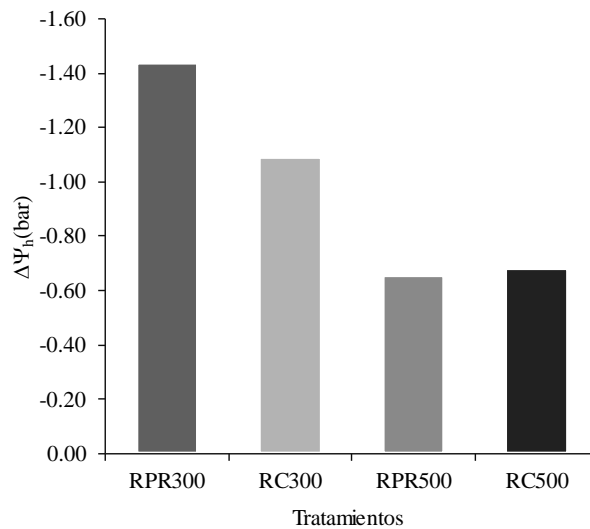


Figura 4.11: Promedios de la amplitud del potencial hídrico xilemático ($\Delta\Psi_h$), en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), obtenido de las diferencias entre las mediciones realizadas antes y 24 horas después de aplicar el riego, en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva, en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500).

En otro contexto, la Figura 4.12 muestra que en general existen diferencias inherentes entre la respuesta del potencial hídrico xilemático de la hoja y las dos técnicas de riego (RPR y RC); en este sentido, los rangos de humedad del suelo determinados con ayuda de la curva de retención agua-suelo (Figura 4.6) para la definición de los límites de aplicación del riego, no mostraron alguna influencia para comprometer el Ψ_h según el volumen de agua suministrada (Figura 4.8) y de acuerdo a la técnica de irrigación utilizada, principalmente en RPR. Sin embargo, entre los tratamientos más similares en el volumen de agua aplicado (RPR500 y RC300), los contrastes estadísticos encontrados pudieron originarse principalmente por la diferente disponibilidad de FATS (parámetro no medido en este estudio), tal como ha sido demostrado por Wakrim et al. (2005).

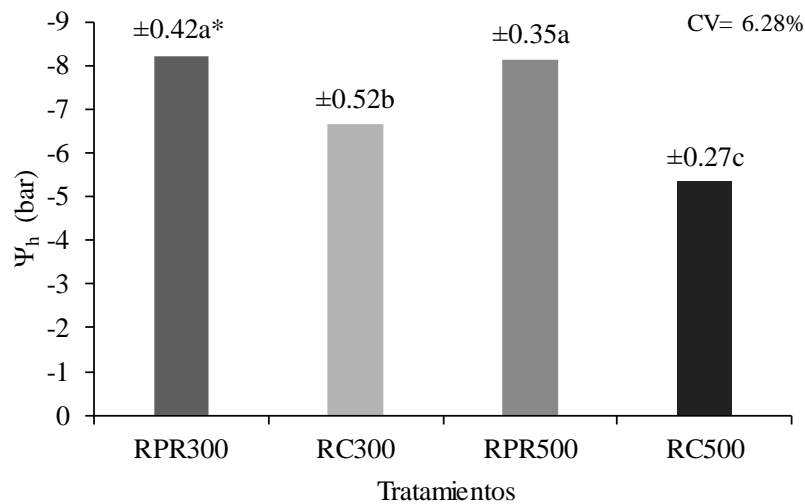


Figura 4.12: Promedios del potencial hídrico xilemático (Ψ_h) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) medidos al medio día (durante ocho días de evaluación), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva. *error estándar $n=8$. CV, coeficiente de variación. Medias con una letra distinta son significativamente diferentes, test de Tukey $p \leq 0.05$.

Por otro lado, en la Figura 4.13 (superior) se observa la dependencia que adquiere el potencial hídrico xilemático del frijol con el potencial matricial del suelo ($R^2=0.92$, $r=0.96$), cuando la humedad se aleja de los niveles de disponibilidad aceptable (según la curva de retención agua-suelo, Figura 4.6); en el mismo sentido, 24 horas después de aplicar el riego (Figura 4.13, inferior) ocurre una dispersión de los puntos ($R^2=0.1$, $r=0.31$), efecto que permite asegurar que el factor controlador del estado hídrico del frijol dependió exclusivamente de las condiciones atmosféricas, tal como ha sido reportado por Millar (1993) en otras especies; de esta forma el buen desempeño del manejo del riego se ve reflejado por la amplia diferencia que existió entre los coeficientes de determinación obtenidos. En el mismo contexto, relaciones entre el potencial hídrico foliar y contenido de humedad del suelo en el cultivo de sorgo (*Sorghum* spp.) han arrojado valores de $r=0.87$ en condiciones de baja humedad del suelo, resultado que puede indicar la posibilidad de emplear la determinación del estado hídrico de las plantas a través del Ψ_h como una alternativa para la programación del riego (García et al., 2010).

Así mismo, Trincado (2005) y Aguirre (2008) encontraron que la relación entre el potencial matricial de agua del suelo con el potencial hídrico xilemático en paltos (*Persea americana*

Mill.) cv. Hass, no estaba asociado al estado hídrico de la planta cuando el suelo se encuentra en condiciones hídricas adecuadas. De la misma forma Abrisqueta et al. (2015) indican que la producción de las plantas está más estrechamente relacionada con el agua disponible en el suelo que con cualquier variable meteorológica, por ello el control de contenido de agua del suelo se ha utilizado para estimar los requerimientos hídricos y el manejo eficiente del riego.

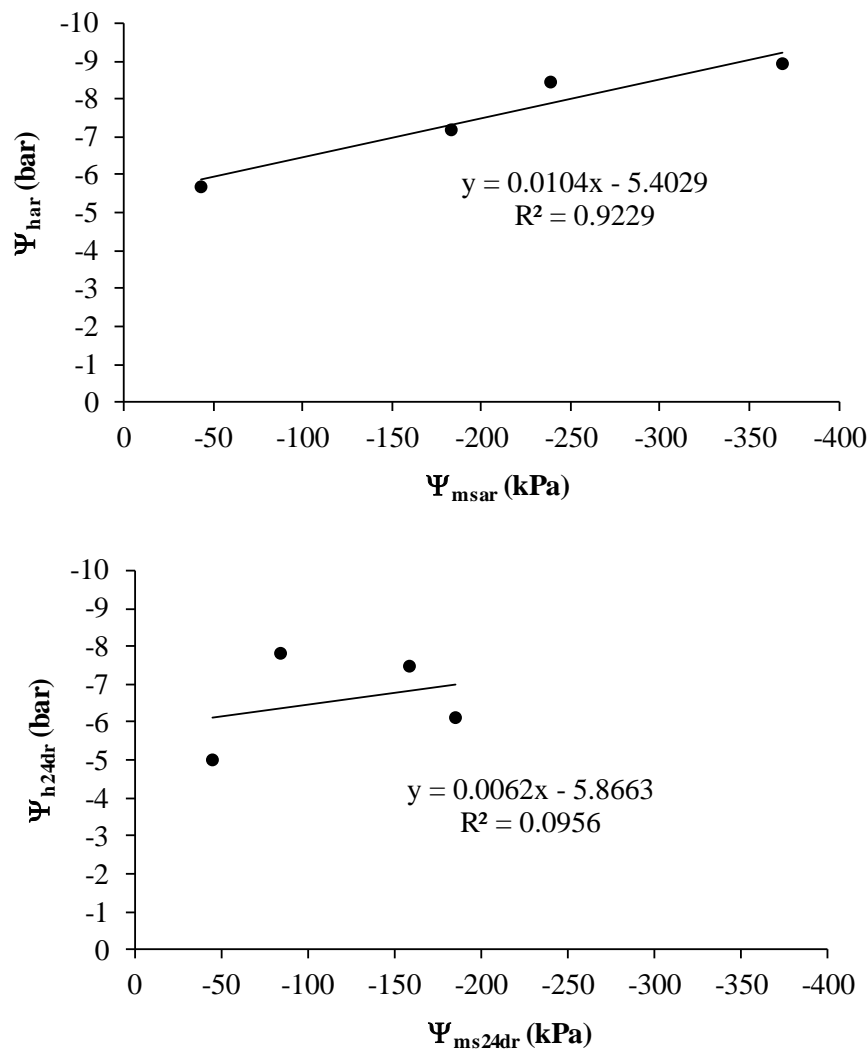


Figura 4.13: Relación del potencial hídrico xilemático de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) antes del riego (Ψ_{har} , superior) y 24 horas después del riego (Ψ_{h24dr} , inferior) con el potencial matricial del suelo en el mismo momento (Ψ_{msar} , y Ψ_{ms24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

4.4. CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA EN LA HOJA DE FRIJOL COMÚN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) CULTIVADO EN MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA, RESPECTO A LA APLICACIÓN DEL AGUA CON RIEGO PARCIAL DE RAÍCES (RPR) Y RIEGO CONVENCIONAL (RC)

Considerando que el frijol común y las vides comparten el valor del potencial hídrico letal (Pimentel, 2004), y según la escala de valores de conductancia estomática definida por Greenspan (2000) para este último cultivo (Figura 7, anexo 1); las plantas de frijol experimentaron variaciones desde condiciones de estrés moderado ($> 100 \text{ mmol/m}^2\text{s}$) en el tratamiento RPR300 antes de aplicar el riego, hasta valores de conductancia que se traducen en condiciones de transpiración de lujo ($>300 \text{ mmol/m}^2\text{s}$) principalmente en el tratamiento RC500, entre el periodo que comprende después de la floración hasta antes de la cosecha (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2: Conductancia estomática ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) medida al medio día (g_{Sar} antes del riego y g_{S24dr} 24 horas después del riego), en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Ttos	14 ²	15	17	18	20	21	26	27
	g_{Sar}	g_{S24dr}	g_{Sar}	g_{S24dr}	g_{Sar}	g_{S24dr}	g_{Sar}	g_{S24dr}
RPR 300	120.77 $\pm 1.26a$	256.87 $\pm 12.47a$	128.80 $\pm 4.47a$	258.05 $\pm 12.56a$	123.65 $\pm 2.69a$	252.42 $\pm 6.73a$	101.82 $\pm 1.78a$	151.73 $\pm 1.44a$
RC 300	245.02 $\pm 2.11b$	503.95 $\pm 2.85c$	247.55 $\pm 2.77b$	500.63 $\pm 8.60c$	242.62 $\pm 3.59b$	500.35 $\pm 7.03c$	206.50 $\pm 2.12b$	307.80 $\pm 1.00b$
RPR 500	268.67 $\pm 4.60c$	360.27 $\pm 6.60b$	274.33 $\pm 2.94c$	357.50 $\pm 6.79b$	269.92 $\pm 2.08c$	357.73 $\pm 5.58b$	217.18 $\pm 3.12b$	320.68 $\pm 1.27c$
RC 500¹	553.60 $\pm 5.73d$	700.42 $\pm 6.58d$	557.78 $\pm 9.97d$	688.78 $\pm 7.17d$	549.98 $\pm 6.49d$	681.22 $\pm 11.36d$	505.40 $\pm 4.26c$	543.35 $\pm 1.11d$
\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

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, $*p \leq 0.05$, $**p \leq 0.01$, $***p \leq 0.001$, ns: no significativo)

CV: coeficiente de variación.

Ttos: Tratamientos.

^{1/} Tratamiento control.

^{2/} días de evaluación en el mes de noviembre de 2014.

En el cuadro 4.2 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 con el tiempo).

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_{vss}) en el rango del agua aprovechable para las plantas elegidos como aceptable, tal como ha sido demostrado en la FATS determinada 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 un 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.

Por otro lado, se puede afirmar que las plantas de frijol común podrían llegar a reducir totalmente la apertura de sus estomas y disminuir completamente la conductancia estomática si el potencial matricial del suelo alcanzara valores entre -407 kPa (Figura 4.14 inferior) y -436 kPa (Figura 4.14 superior), donde el nivel de humedad del suelo sería de 12.97 % y 12.69 % respectivamente, según la curva de retención agua-suelo (Figura 4.6).

En el mismo contexto, también es posible deducir que a los -10.1 bares de potencial hídrico xilemático las plantas de frijol pueden llegar a cerrar totalmente sus estomas (Figura 4.15 superior), mientras que 24 horas después de aplicación del riego, la máxima conductancia estomática puede ascender hasta 1227.9 mmol/m²s (Figura 4.15 inferior), con un promedio de 429.6 mmol/m²s (medido entre las 12:00 y 14:00 horas).

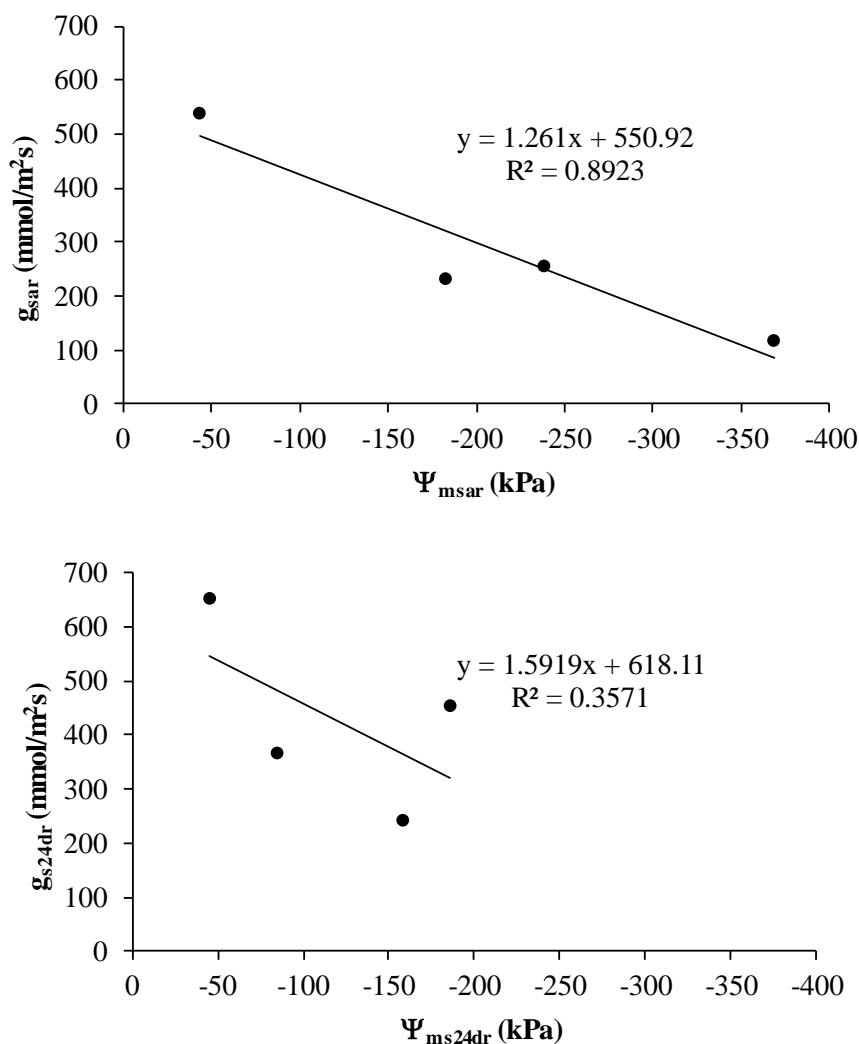


Figura 4.14: Relación de la conductancia estomática de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) antes del riego (g_{sar} , superior) y 24 horas después del riego (g_{s24dr} , inferior), con el potencial matricial del suelo en el mismo momento (Ψ_{msar} , y Ψ_{ms24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Por otro lado, Lanna et al. (2016) obtuvieron valores entre 540 y 1270 mmol/m²s en dos variedades de frijol común bajo tratamientos sin restricción hídrica y entre 270 y 710 mmol/m²s cuando existía restricción hídrica; en el mismo sentido, los valores obtenidos por Costa et al. (2000) en cuatro cultivares de frijol variaron entre 155 y 580 mmol/m²s bajo condiciones de estrés por sequía. En el mismo contexto, Aguirre et al. (1999) encontraron valores que fluctuaron entre 125 y 225 mmol/m²s en condiciones de riego parcial de raíces, y de 280 a 350 mmol/m²s bajo riego convencional.

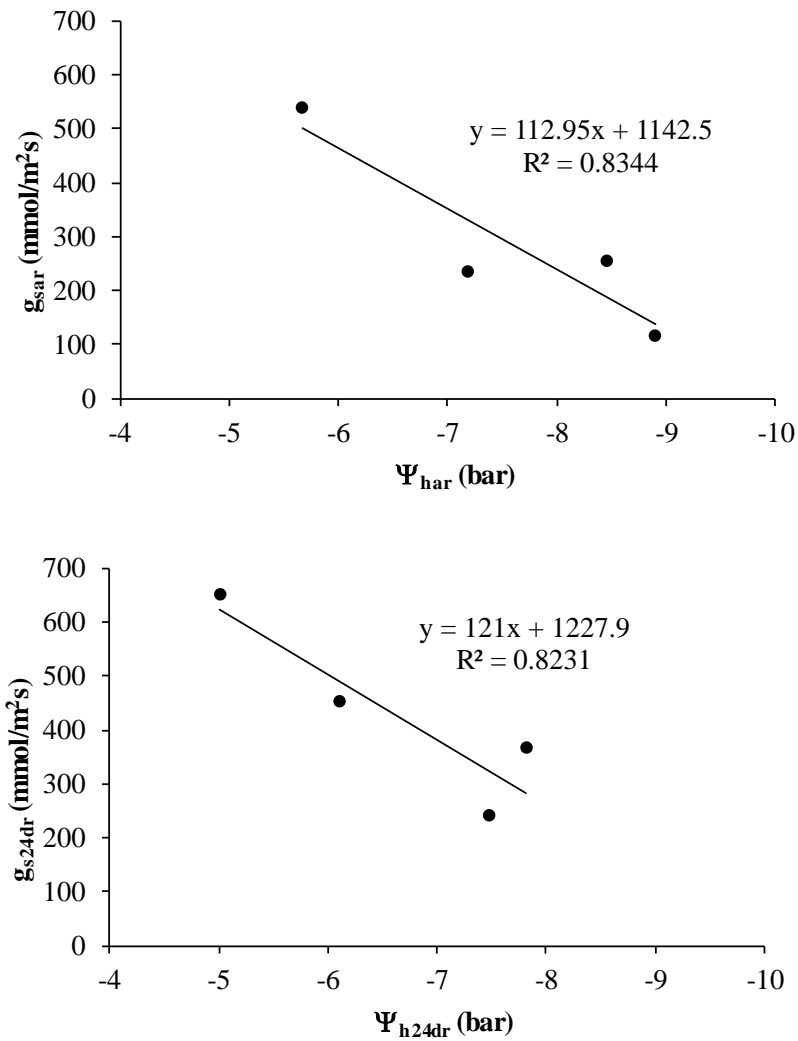


Figura 4.15: Relación de la conductancia estomática de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) antes del riego (g_{sar} , superior) y 24 horas después del riego (g_{s24dr} , inferior), con el potencial hídrico xilemático del mismo momento (Ψ_{har} , y Ψ_{h24dr}), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Fernández et al. (2014) indican que tanto las variaciones del potencial hídrico xilemático como de la conductancia estomática de las hojas, están influenciadas directa o indirectamente por las variables ambientales y las propiedades del suelo; en esta investigación las mediciones realizadas antes de la aplicación del riego muestran la fuerte dependencia existente entre estos dos parámetros biofísicos de las plantas con las características hidrofísicas del suelo (en este caso del potencial matricial). Así mismo, se puede afirmar que las fluctuaciones de humedad en el suelo (Figuras 4.6 y 4.7) 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 valores de Ψ_h 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 varias investigaciones de cultivos bajo riegos reducidos, atribuyeron la disminución de la conductancia estomática en las hojas 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) expresan que todo el proceso de regulación del sistema hídrico de las plantas es controlado por las hojas.

En este estudio es posible deducir que cuando los niveles de restricción hídrica del suelo no llegan a ser suficientemente severos frente a condiciones de riegos reducidos, las plantas pueden activar -en primer lugar- señales físicas como por ejemplo reducción de la conductancia estomática y luego del potencial hídrico xilemático para mantener su régimen hídrico; sin embargo, cuando los niveles de agua en el suelo no son suficientemente ventajosos para un desempeño adecuado del sistema hídrico de la planta, esta responde -en segundo lugar- activando señales químicas, como por ejemplo con incrementos de ABA en el flujo xilemático (parámetro no medido en este estudio), tal como lo demostraron Wakrim et al. (2005). De esta forma, se puede afirmar que los niveles de estrés moderado, reflejados en las mediciones de conductancia estomática en el tratamiento RPR300, están asociados al menor volumen de agua que se aplicó (Figura 4.8), lo que también pudo haber provocado la activación de señales no hidráulicas en las raíces, efecto que puede ser traducido como un incremento de ABA en las hojas, induciendo la reducción de la conductancia estomática.

En otros trabajos (Comstock 2002, Davies et al. 2002, Dodd 2003, Holbrook et al. 2002, Zhang et al. 2001, Simonneau et al. 1998, Snaith y Mansfield 1982, Zhang y Davies 1990) también se han identificado que bajo diferentes niveles de déficit de agua en el suelo, pueden ocurrir cambios en la concentración de ABA y pH del xilema (parámetro no medido en este estudio), los mismos que están relacionados con la reducción de la conductancia estomática.

Wakrim et al. (2005) indican que las variaciones del pH igualmente se pueden explicar por un cambio en la absorción de nitrógeno por las plantas; sin embargo, también indican que las leguminosas son capaces de mantener un equilibrio iónico, y por tanto, un pH estable del

xilema cuando la disminución de aplicación del agua de riego no es severamente deficitaria. Los resultados de esta investigación muestran que se presentaron diferencias estadísticas significativas en el contenido de nitrógeno de las plantas de frijol común (Cuadro 4.3); por lo tanto, es posible haber obtenido variaciones del pH del xilema.

En este sentido, la cantidad de agua suministrada a través de los diferentes tratamientos establecidos, mostraron un importante dominio en el contenido de nitrógeno, donde el tratamiento con menor volumen de agua aplicada (RPR300) presentó el mayor nivel de captación de nitrógeno, mientras que el tratamiento con mayor aplicación de agua (RC500) mostró un efecto inverso. De igual forma, Vera-Nuñez et al. (2001) en el cultivo de cebada demostraron que incrementos en la absorción de nitrógeno, ocurrieron cuando aplicaron menos cantidad de agua, producto de la suspensión programada del riego en una etapa específica del cultivo. Freixas et al. (2011) encontraron que en el cultivo de soya este efecto ocurre por acumulación de ureidos (compuestos nitrogenados exportados desde los nódulos al resto de la planta) en las hojas de las plantas cuando son sometidas a déficit hídrico.

Por otro lado se presentaron diferencias estadísticas en la absorción de potasio, donde el valor más alto correspondió al tratamiento RPR500 (4.07 por ciento), mientras que el valor más bajo fue de 2.60 por ciento para el tratamiento RC500 (Cuadro 4.3). Roberts y Snowman (2000) indican que el aumento y/o reducción de la conductancia estomática está correlacionado con la participación en la captación de potasio, elemento que proporciona la fuerza motriz para el mantenimiento de la turgencia y apertura de los estomas por su efecto osmorregulador (Villalobos, 2006). En este sentido, la condición de transpiración de lujo que mantuvo el tratamiento control (RC500) es posible que haya influenciado en la baja captación de potasio, porque las plantas no tuvieron la necesidad de osmorregular (Cuadro 4.4). De esta forma, Hernández (2013) indica que la apertura o el cierre de los estomas no dependen de una sola señal, sino que se establece de una red de comunicación por parte de diferentes elementos que responden de una forma coordinada a estímulos externos, donde finalmente las plantas se adaptan de la mejor forma posible a situaciones favorables o de estrés.

Cuadro 4.3: Contenidos de nitrógeno (N) y potasio (K) medidos al final de la etapa experimental en las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitópica selectiva, en función de los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500).

Tratamientos	Variables	
	N (%)	K (%)
RPR	3.21	3.53
300	±0.12c	±0.59ab
RC	2.79	3.04
300	±0.07bc	±0.37ab
RPR	2.56	4.07
500	±0.03b	±0.22b
RC	2.04	2.60
500¹	±0.12a	±0.04a
\bar{x}	2.65	3.31
P	ns	***
CV (%)	6.31	13.38

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, ns: no significativo)

CV: coeficiente de variación

^{1/} Tratamiento control

4.5. DINÁMICA DE LAS RELACIONES HÍDRICAS EN LA HOJA DEL FRIJOL (*PHASEOLUS VULGARIS* L) BAJO RIEGO PARCIAL DE RAÍCES (RPR) Y RIEGO CONVENCIONAL (RC), EN UN SISTEMA DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA

Los diagramas de Höfler en los cuatro tratamientos de riego evaluados (Figuras 8a - 8h, anexo 1), describieron la dinámica de las relaciones hídricas en todos los niveles de la hoja de frijol, a medida que perdió o ganó turgencia (entre un momento antes de aplicar el riego y 24 horas después de su aplicación, respectivamente), entre los límites máximos de hidratación y deshidratación para cada momento (emulados en el proceso de construcción de las curvas P-V).

En todos los diagramas de Höfler obtenidos, se aprecia que la intercepción del eje del potencial sobre el eje del contenido relativo de agua (CRA), se ubicó en el punto que representa el inicio de la pérdida de turgor de la hoja ($CRA_{(turgor=0)}$, plasmólisis), situación que permitió observar mejor la variación y respuesta elástica del tejido, que en general, es provocada por la frecuencia y el nivel de restricción del agua de riego (Figuras 8a - 8h, anexo 1). Varios autores (Patakas et al., 2002 y Dichio et al., 2003) expresan que no está demostrada la ventaja ecofisiológica de tener tejidos más elásticos o menos elásticos; sin embargo, indican que el déficit hídrico es el responsable de las restricciones elásticas en las paredes celulares. Del mismo modo, Félix (2011) indica que las variaciones elásticas que se producen en el corto tiempo podrían tener un mayor origen por cambios en el hidrogel de pectina de la pared celular, que por modificaciones en la red de fibras de celulosa. En el caso de esta investigación el efecto se puede observar cuando se comparan los diagramas de Höfler construidos para el momento antes del riego con los diagramas construidos para el momento de 24 horas después del riego (Figuras 8a - 8h, anexo 1). En este sentido, se observa que la restricción de agua en el tratamiento RPR300 (antes de la aplicación del riego) pudo haber provocado rigidez en las paredes celulares del tejido, tal como lo revelan los altos valores del módulo de elasticidad (ϵ_v).

En general, si se compara gráficamente el despeno elástico del tejido antes de la aplicación del riego, se puede observar la ventaja considerable en el tratamiento RPR500 sobre RC500 (Figuras 8b, 8d, 8f, 8h; anexo 1); aun así, Félix (2011) indica que un tejido más elástico

puede mejorar muy poco su turgencia por aumentos de agua simplástica proporcionalmente grandes, sin embargo, está sujeto a perder turgencia solo con pérdidas apreciables de agua en el simplasto (caso RPR500ar); por otro lado, un tejido rígido puede mejorar mucho su turgencia con pequeños aumentos de agua en el simplasto, pero también puede empeorar mucho su situación con una pérdida equiparable de agua (caso RC500ar).

Patakas et al. (2002) también indican que tanto la elasticidad del tejido como el ajuste osmótico ayudan a mantener la hidratación y la turgencia de las plantas, porque tienen la función de evitar el estrés hídrico; mecanismos que también son claves en la apertura y cierre de los estomas.

En este sentido, la disminución de los niveles de agua debido a los tratamientos de riego aplicados a las plantas de frijol, estuvo acompañado también de cambios (disminución) en el potencial osmótico (Ψ_o); respuesta que también ayudó a prevenir la pérdida de turgencia en el momento previo a la aplicación del riego, principalmente cuando se compara RPR500 con el tratamiento control (Cuadro 4.4).

Dentro del mismo contexto, Félix (2011) indica que entre el apoplasto y el simplasto la pared celular (membrana semipermeable que separa ambos espacios), permite que el sistema tienda a equilibrarse, si por ejemplo, el contenido de agua en el apoplasto es mayor que en el simplasto (o lo inverso), por lo tanto, circulará agua en el sentido apoplasto-simplasto; de esta manera, las células consiguen hidratarse a expensas del apoplasto, porque disminuye el potencial osmótico en el simplasto debido a la acumulación de solutos con actividad osmótica, como algunos aminoácidos e iones inorgánicos (Hessini et al., 2009).

De esta forma, en el Cuadro 4.4 se aprecia que los valores de contenido de agua apoplástica ($CA_{Apoplástica}$) fueron mayores antes de la aplicación del riego que 24 horas después, por el momento de deshidratación que están atravesando las plantas; en este sentido, dentro de los momentos previos a la aplicación de riego, un bajo valor en el $CA_{Apoplástica}$ indica que se está estimulando un mayor ingreso de agua desde el apoplasto (72.55 por ciento) hacia el simplasto (27.45 por ciento) en el tratamiento RPR500, cuando se compara con el

tratamiento RC500 (79.37 por ciento en el apoplasto y 20.63 por ciento en el simplasto); lo que evidencia un mecanismo de evasión a la deshidratación celular, motivado por la disminución del potencial osmótico ($\Psi_{O(CRA=1)}$). En el mismo sentido, se aprecia que 24 horas después de aplicar el riego el contenido de agua apoplástica tendió a disminuir (y por ende el contenido de agua en el simplasto tendió a incrementarse) lo que evidencia una tendencia de conseguir un equilibrio entre los dos espacios, por la hidratación a la que son expuestas las células cuando las plantas son irrigadas. En el mismo contexto, Díaz-Abril et al. (2016), Martínez et al. (2007), Patakas et al. (2002), y Bolarin et al. (2001) en el cultivo de pera (*Pyrus communis* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), vid (*Vitis vinifera*) y tomate (*Lycopersicon esculentum*), respectivamente, han informado que por causas debidas al déficit hídrico y otras variables abióticas, las plantas disminuyen su potencial osmótico para impulsar la entrada de agua a las células y evitar la deshidratación.

Por otro lado, también se aprecia que después del riego (24h-dr) en todos los tratamientos aumentó la elasticidad del tejido (al disminuir el valor de ϵ_v); sin embargo, dentro de este momento en RPR300 el tejido de las hojas fue el más inelástico (valor de ϵ_v más alto). Así mismo, en los tratamientos bajo riego parcial de raíces (antes de la aplicación del riego) solo RPR500 llegó a tener el más bajo valor de ϵ_v y ser estadísticamente tan elástico como el control. Mientras que en el caso de $\Psi_{O(CRA=1)}$ sus niveles pueden indicar la presencia de un ajuste osmótico en los tratamientos bajo RPR, porque sus valores fueron significativamente más negativos que en el tratamiento control (Cuadro 4.4). En el mismo contexto, Díaz-Abril et al. (2016) no encontraron evidencias de ajuste osmótico ni elástico en el cultivo de pera (*Pyrus communis* L.) bajo riego deficitario controlado; sin embargo, las diferencias significativas encontradas en el contenido de agua apoplástica sugieren un mecanismo de adaptación al déficit de agua. En esta investigación, se puede afirmar que en el tratamiento RPR500 el otro mecanismo de adaptación o evasión a la deshidratación (en el momento antes del riego), correspondió al mantenimiento de un potencial hídrico letal muy bajo ($\Psi_{O(turgor=0)}$), lo que permitió que un bajo contenido relativo de agua (cuando su potencial de turgor es igual a cero, $CRA_{(turgor=0)}$) mantenga en mejores condiciones hídricas a las plantas de frijol en comparación con el tratamiento sin restricción de agua (RC500), (Cuadro 4.4).

Finalmente, se puede decir que en el tratamiento RPR500 las plantas pudieron poner de manifiesto algunas reglas de coordinación entre las interacciones de los parámetros de las relaciones hídricas y los distintos mecanismos (regulación de la conductancia estomática y/o potencial hídrico xilemático) para evitar, evadir o atenuar situaciones de deshidratación o estrés hídrico en el momento antes de la aplicación del riego. En este sentido, Félix (2011) indica que dos de las interacciones más importantes que definen el modo en que funciona el sistema de regulación hídrica corresponden al $\Psi_{O(CRA=1)}$ y el ε_v , permitiendo que las plantas mantengan la hidratación celular y la turgencia, preservando el metabolismo (como por ejemplo, la asimilación de carbono), la expansión celular y el crecimiento.

Cuadro 4.4: Parámetros de la curva presión-volumen en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) antes de la aplicación del riego (ar) y 24 horas después de su aplicación (24dr) de ocho evaluaciones realizadas en los cuatro tratamientos con riego parcial de raíces (RPR) y riego convencional (RC), en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva.

Ttos	ε_v (MPa)		$\Psi_{0(CRA=1)}$ (bar)		$\Psi_{0(turgor=0)}^3$ (bar)		$CA_{Apoplástica}$ (%)		$CRA_{(turgor=0)}$ (índice)	
	ar	24dr	ar	24dr	ar	24dr	ar	24dr	ar	24dr
RPR	20.73Ab ¹	16.03Bb	-5.70Aa	-5.65Aa	-12.10Aa	-10.92Ba	79.95Ab	71.68Aa	0.89Ab	0.87Bb
300	±1.78	±1.38	±0.24	±0.24	±0.48	±0.54	±1.57	±2.45	±0.01	±0.00
RC	16.80Aab	11.92Ba	-5.02Ab	-4.90Abc	-10.69Ab	-9.51Bb	80.26Ab	66.57Ba	0.90Ab	0.85Bab
300	±0.39	±0.41	±0.29	±0.21	±0.85	±0.36	±2.10	±3.27	±0.01	±0.01
RPR	15.63Aa	10.64Ba	-5.87Aa	-5.46Bab	-12.20Aa	-10.86Ba	72.55Aa	66.51Aa	0.86Aa	0.83Ba
500	±1.25	±0.72	±0.26	±0.33	±0.51	±0.38	±1.24	±2.28	±0.01	±0.01
RC	15.34Aa	10.82Ba	-4.48Ac	-4.23Bc	-9.26Ac	-8.35Bc	79.37Ab	66.29Ba	0.89Ab	0.87Bb
500²	±0.43	±0.63	±0.25	±0.32	±0.45	±0.31	±1.43	±6.07	±0.01	±0.01
\bar{x}	17.13	12.35	-5.27	-5.06	-11.06	-9.91	78.03	67.76	0.89	0.86
P	*	*	***	***	***	***	***	ns	*	*
CV										
(%)	12.57	11.32	4.55	6.53	5.77	4.70	1.75	10.77	1.44	1.32

Cada valor representa la media \pm error estándar (n=4)

^{1/} 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), donde las mayúsculas indican diferencias entre condición de aplicación del riego y las minúsculas indican diferencias entre tratamientos

ns: no significativo

CV: coeficiente de variación

Ttos: Tratamientos

^{2/} Tratamiento control

ε_v : modulo volumétrico de elasticidad

$\Psi_{0(CRA=1)}$: potencial osmótico cuando el CRA es igual a uno

^{3/} $\Psi_{0(turgor=0)}$: potencial osmótico cuando el potencial de turgor es igual a cero (también denominado potencial hídrico letal, o punto de inicio de la plasmólisis)

$CA_{Apoplástica}$: contenido de agua apoplástica

$CRA_{(turgor=0)}$: contenido relativo de agua cuando el potencial de turgor es igual a cero

4.6. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN FRIJOL COMÚN, CULTIVADO EN MACETEROS DE RESPUESTA HIDROGRAVITRÓPICA SELECTIVA BAJO RIEGO CONVENCIONAL Y RIEGO PARCIAL DE RAÍCES

En la Figura 4.16 se puede observar que la producción de vainitas por planta (vp) fue superior en el tratamiento donde se aplicó la mayor cantidad de agua (RC500, 27 vp – 13 L/planta), mientras que la más baja producción ocurrió en el tratamiento con menor agua aplicada (RPR300, 18 vp - 6.7 L/planta); así mismo, se aprecia que en los tratamientos donde fue más similar la aplicación de agua (RPR500, 8.5 L/planta y RC300, 9.4 L/planta) se obtuvieron producciones estadísticamente similares (23.3 y 21.7 vp, respectivamente según el test de Tukey $p \leq 0.05$).

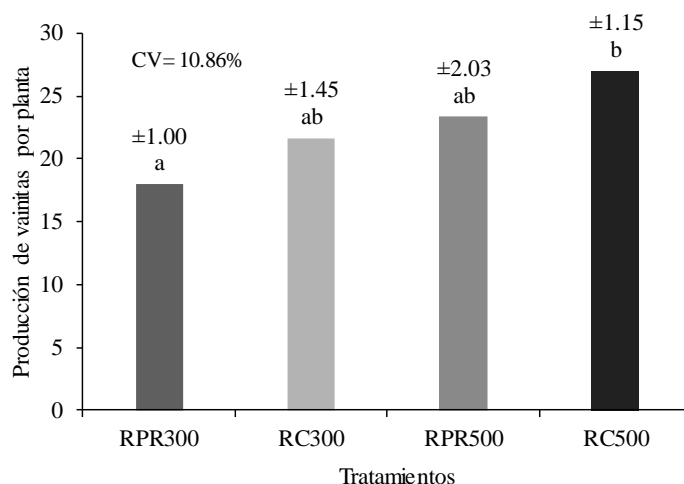


Figura 4.16: Producción de vainitas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) con longitudes entre 10 y 14 cm, cosechadas en plantas cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitópica selectiva, bajo riego parcial de raíces (RPR300 y RPR500) y riego convencional (RC300 y RC500). *error estándar $n=3$. CV, coeficiente de variación. Medias con una letra distinta son significativamente diferentes, test de Tukey $p \leq 0.05$.

Sin embargo, en el Cuadro 4.5 se puede observar que en todos los tratamientos se obtuvo estadísticamente (Tukey $p \leq 0.05$) la misma producción de vainitas por planta cuando se la relaciona con el volumen de agua aplicada (parámetro denominado eficiencia de producción; FAO, 2003); esta situación puede ser explicada por el efecto que las condiciones localizadas de humedad del suelo producidas por un riego convencional y/o un riego parcial de raíces provocan sobre la planta (White, 2007); donde la reducción o incremento del agua aplicada

no responde en la misma proporción a la reducción o incremento de la producción cuando se compara un mismo cultivo con riego convencional versus riego parcial de raíces; condiciones que han sido reportadas por Serna-Pérez et al. (2011) en ají (*Capsicum baccatum*) var ‘Mirasol’ al comparar tratamientos de RPR con RC bajo un sistema de raíz dividida artificialmente.

En este sentido, Renault y Wallender (2000) expresan que cuando se discute acerca de seguridad alimentaria es necesario tener en cuenta todos los criterios de productividad del agua; de esta forma, la FAO (2003) indica que maximizar la productividad del agua no sólo significa maximizar la producción agrícola por volumen de agua, sino también maximizar (en los productos a cosechar) la concentración de elementos favorables para la nutrición humana y animal en general.

Cuadro 4.5: Productividad del agua de riego medida como Eficiencia del Uso del Agua (EUA), Eficiencia del Uso del Agua en Vainitas (EUA_{vainitas}), Eficiencia de Producción de Vainitas (EPV) y Eficiencia de Concentración de Proteínas en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo RPR y RC, cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva.

Tratamientos	EPV (Número de vainitas/L)	EUA (g/L)	EUA _{vainitas} (g/L)	ECP (g/L)
RPR 300	2.69 ±0.15a	3.44 ±0.18c	1.31 ±0.12ab	0.17 ±0.02ab
RC 300	2.30 ±0.15a	2.73 ±0.04b	1.29 ±0.04ab	0.17 ±0.01ab
RPR 500	2.75 ±0.24a	3.17 ±0.14c	1.57 ±0.14b	0.21 ±0.02b
RC 500 ¹	2.08 ±0.09a	2.13 ±0.02a	1.00 ±0.02a	0.14 ±0.00a
\bar{X}	2.46	2.87	1.29	0.17
P	ns	***	***	*
CV (%)	10.60	5.36	10.87	10.69

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, ns: no significativo)

CV: coeficiente de variación

^{1/} Tratamiento control

En este trabajo las plantas de frijol bajo RPR también mostraron ser más eficientes en términos de uso de agua total (EUA) y uso de agua en vainitas (EUA_{vainitas}) con respecto al tratamiento control (Tukey $p \leq 0.05$), mientras que en la investigación de Serna-Pérez et al. (2011) la EUA aunque tendió a incrementarse en los tratamientos con RPR, esta fue estadísticamente igual a la observada en RC. En el mismo sentido, Kang et al. 2001, Kirda et al. 2004, y Dorji et al. 2005 (citados por Serna-Pérez et al., 2011) expresan que la aplicación del RPR en plantas con un hábito de crecimiento indeterminado, induce efectos reductivos sobre el rendimiento, donde finalmente la EUA no puede ser incrementada significativamente.

Estos resultados también indican que el tratamiento RPR500 se destacó por su desempeño en la eficiencia de concentración de proteínas, superando al tratamiento de mayor consumo de agua (RC500) con 1/3 de incremento en los niveles de este parámetro. Cuéllar y Covarrubias (2005) y Moreno (2009) revelan que esta respuesta es el resultado de modificaciones a nivel de actividades enzimáticas, de síntesis de proteínas y fundamentalmente de expresiones genéticas.

De la misma forma, Zegbe et al. (2006) encontraron que la concentración de materia seca en la corteza del fruto y la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) fue estadísticamente superior en los tratamientos bajo riego parcial de raíces, sobre todo cuando éste se aplicó desde la aparición de la primera estructura donde se forma el fruto hasta la cosecha; así mismo, López-Ordaz et al. (2008) bajo un sistema de raíz dividida artificialmente en tomate (*Lycopersicon sculentum* Mill.), encontraron que la firmeza de la pulpa, los $^{\circ}\text{Brix}$, y la conductividad eléctrica del jugo en RPR fue significativamente superior que en RC.

Por otro lado, Yactayo et al. (2013) también encontraron que en el cultivo de papa bajo riego parcial de raíces aplicado por surcos, se conseguía un incremento en la eficiencia de uso del agua sin llegar a reducir la producción, respecto a la aplicación de un tratamiento control donde todos los surcos se regaban de forma simultánea.

Finalmente en el cultivo de vid (*vitis vinifera*) varios autores (Loveys et al., 1998; du Toit et al., 2003; Antolín et al., 2006; De la Hera et al., 2007; Chaves et al., 2007; Bindon et al., 2008; Collins, et al., 2010; De Pau et al., 2011; García et al., 2012, Romero y Martínez-Cutillas, 2012; Romero et al. 2014; Romero et al. 2015; Romero et al. 2016) atribuyen que el riego parcial de raíces ha demostrado un buen desempeño en todos los criterios asociados a la productividad del agua.

V. CONCLUSIONES

Es concluyente que la incorporación de elementos que ayudan al posicionamiento, orientación y desarrollo espacial de las raíces hacia secciones específicas dentro del macetero propuesto, permitieron aumentar el control y la precisión de la aplicación del riego parcial de raíces (RPR); efecto que se vio reflejado en el mantenimiento de adecuados niveles del potencial hídrico xilemático y de la conductancia estomática, principalmente en el tratamiento RPR500 (equivalente a la mitad del volumen de agua del riego convencional, RC), donde las plantas de frijol se potenciaron en términos de eficiencia del uso del agua y en el mejoramiento de parámetros asociados a la calidad de las cosechas.

En el mismo contexto, de estos antecedentes se desprenden las siguientes conclusiones específicas:

- La geometría y las dimensiones de las secciones del macetero propuesto permitieron generar un control de las respuestas hidrogravitrópicas que convencionalmente actúan sobre el sistema radicular de las plantas; consideraciones que facilitaron la aplicación del riego parcial de raíces.
- El CGPRL (compartimiento de germinación de la semilla, iniciación del crecimiento radicular y posicionador de las raíces laterales/principal) fue el elemento que evitó que se realice una división artificial de la raíz pivotante, procedimiento que consiguió eliminar el uso de cámaras de crecimiento controlado.
- El encapsulamiento de la raíz principal en el CGPRL evitó que se formara un patrón de embobinado de las raíces laterales en las SDRL (secciones de desarrollo de raíces laterales), debido a la atenuación del efecto de circumnutación y control del tigmotropismo sobre la raíz pivotante.
- La consideración de dos bases en el macetero propuesto, colocados a dos diferentes niveles, junto con los elementos de drenaje en cada una de ellas, eliminó la posibilidad de acumulación de exceso de agua frente a los OSRL (orificios de salida

de las raíces laterales), efecto que también evitó transferencia horizontal de humedad entre ambas SDRL.

- El control de la aplicación del riego con la curva de retención agua-suelo permitió mantener el estado hídrico de las plantas dependiente de las condiciones atmosféricas, situación que fue comprobada con el valor del R^2 ; principalmente, en las mediciones de potencial hídrico xilemático cuando se relacionaron con el potencial matricial del suelo, antes del riego (0.923) y 24 horas después de la aplicación del riego (0.096).
- La disminución del volumen de agua aplicado influyó en la reducción del potencial hídrico xilemático en los tratamientos con riego parcial de raíces; sin embargo, RPR500 fue el único tratamiento antagonista que evidenció similar amplitud de potencial hídrico xilemático ($\Delta\Psi_h$) al tratamiento control (RC500), junto con el mejor desempeño de sus relaciones hídricas.
- La transpiración de lujo observada en los valores de la conductancia estomática de las plantas en RC500, demuestra que estuvo asociada a una sobrestimación del límite crítico (θ_{vsx}) para la definición del agua aprovechable dentro de la fracción transpirable del sustrato utilizado; efecto que repercutió en la baja captación de nitrógeno y potasio, y en la disminución de los indicadores de productividad del agua.
- Los altos valores del potencial osmótico ($\Psi_{O(CRA=1)}$) en los tratamientos con riego parcial de raíces (RPR300= -5.70 MPa y RPR500= -5.87 MPa) evidenciaron la presencia de un ajuste osmótico con respecto a los tratamientos con riego convencional (RC300= -5.02 MPa y RC500= -4.48 MPa); situación que también favoreció al inicio de la plasmólisis en niveles más altos del potencial hídrico letal [$\Psi_{O(turgor=0)}$], según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).
- El tratamiento RPR500 fue el único que mostró evidencias de evasión del estrés hídrico (antes de la aplicación del riego), debido a una posible coordinación de las interacciones de los parámetros involucrados en sus relaciones hídricas; así mismo, con los diagramas de Höfler se evidenció que el tejido fue tan elástico (15.63 MPa) como el del tratamiento control (15.34 MPa) de acuerdo al test de Tukey ($p \leq 0.05$).
- Aunque la producción de vainitas por planta (vp) fue superior en los tratamientos con mayor volumen de riego (RPR300, 18 vp - 6.7 L/planta; RPR500, 23.3 - 8.5 L/planta; RC300, 21.7 vp - 9.4 L/planta; y RC500, 27 vp - 13 L/planta;), su relación con la cantidad de agua aplicada sitúa a todos los tratamientos en el mismo nivel estadístico

(Tukey $p \leq 0.05$) de eficiencia de producción (EPV), debido a los efectos que las condiciones localizadas de humedad en el suelo potencian sobre las plantas, especialmente cuando son sometidas al riego parcial de raíces.

- Los tratamientos RPR300 y RPR500 fueron los más eficientes en el uso del agua (EUA: 3.44 g/L y 3.17 g/L; y EUA_{vainitas} : 1.31 g/L y 1.57 g/L, respectivamente. Tukey $p \leq 0.05$) cuando es comparado con el tratamiento RC500 (EUA: 2.13 g/L, y EUA_{vainitas} : 1.00 g/L); sin embargo, solo el tratamiento RPR500 mostró la mayor eficiencia en la concentración de proteínas en las vainitas (0.21 g/L, Tukey $p \leq 0.05$).

VI. RECOMENDACIONES

- Ejecutar investigaciones concernientes a verificar el desempeño de otros cultivos que requieran también la utilización de un suelo especializado (como por ejemplo Arando), junto con probar diferentes dimensiones y/o incrementar el número de las secciones de desarrollo de raíces laterales en el macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva.
- Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes soluciones de fertilizantes sobre la modificación de los parámetros nutricionales en frijol común cultivado en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.
- Evaluar los efectos que se pueden producir sobre el potencial hídrico xilemático y la conductancia estomática al fraccionar la aplicación del agua, combinando el principio de riego localizado de alta frecuencia con las dos técnicas utilizadas en este trabajo.
- En futuras investigaciones considerar más niveles en las variaciones del rango de agua aprovechable para las plantas o FATS (fracción de agua transpirable del suelo), con el objetivo de ampliar estadísticamente las diferencias en la eficiencia de producción.
- Monitorear los cambios de ácido abscísico (ABA) y pH en la sabia del xilema de las plantas que se sometan a riego parcial de raíces en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica.
- Realizar investigaciones que ayuden a comprender mejor las posibles reglas de coordinación que expresan las plantas bajo riego parcial de raíces.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrisqueta, 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. *Comput Electron Agric.* 114: 7-13.

Abrisqueta, I. 2010. Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario. Tesis doctoral. Murcia, España, Universidad de Murcia. 244 p.

Adu, M.; Chatot, A.; Wiesel, L.; Bennett, M.; Broadley, M.; White, P.; Dupuy, L. 2014. A scanner system for high-resolution quantification of variation in root growth dynamics of *Brassica rapa* genotypes. *J. Exp. Bot.*, 65(8): 2039-2048. doi:10.1093/jxb/eru048.

Aguirre, C. 2008. Relación planta-agua en paltos (*Persea American Mill*) cv. Hass. Memoria de título Ingeniero Civil Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán-Chile, 95 p.

Aguirre, J.; Kohashi-Shibata, J.; Trejo, C.; Acosta-Gallegos, J. 1999. Respuesta fisiológica del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a la sequía, en un sistema de raíz dividida. *Agronomía Mesoamericana*, 10 (1): 31-36.

Aguilar-Benítez, G.; Peña-Valdivia, C.; García-Nava, J.; Ramírez-Vallejo, P.; Benedicto-Valdés, S.; Molina-Galán, J. 2012. Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia*, 46(1): 37-50.

Álvarez, S.; Navarro, A.; Bañón, S.; Sánchez-Blanco, M.J. 2009. Regulated deficit irrigation in potted *dianthus* plants: effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Sci Hort*, 122: 579-585.

Antolín, M.; Ayari, M.; Sánchez, M. 2006. Effects of partial root-zone drying on yield, ripening and berry ABA in potted Tempranillo grapevines with split roots. *Aust J Grape Wine Res*, 12: 13-20.

Araújo, A.; Magno, A.; Yuudi, F.; Costa, F.; Grandi, M. 2004. Sample size for measurement of root traits on common bean by image analysis. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39(4): 313-318.

- Atkinson, J.; Rasmussen, A.; Traini, R.; Voß, U.; Sturrock, C.; Mooney, S.; Wells, D.; Bennett, M. 2014. Branching out in roots: uncovering form, function, and regulation. *Plant Physiol*, 166: 538-550.
- Bao, Y.; Aggarwal, P.; Robbins, N.; Sturrock, C.; Thompson, M.; Qi Tan, H.; Tham, C.; Duan, L.; Rodriguez, P.; Vernoux, T.; Mooney, S.; Bennett, M. Dinneny, J. 2014. Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 9319–9324.
- 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 B.*, 108: 278-284. doi: 10.1016/j.snb.2004.12.108.
- Barber, C. (2009). ¿Sustentabilidad o sostenibilidad? <http://www.cnnexpansion.com/actualidad/2009/05/22/sostenibilidad-o-sustentabilidad>
- Behboudian, M.; Singh, Z. 2001. Water relations and scheduling in grapevine. *Hortic Rev (Am Soc Hortic Sci)*, 27: 189-225. doi: 10.1002/9780470650813.ch5.
- Bertsch, F.; Hernández, J.; Arguedas, F.; Acosta, M. 2003. Curvas de absorción de nutrimentos en dos variedades, bribri y sacapobres, de frijol común de grano rojo. *Agronomía Costarricense*, 27(2): 75-81.
- Bindon, K.; Dry, P.; Loveys, B. 2008. Influence of partial root-zone drying on the composition and accumulation of anthocyanins in grape berries (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon). *Aust. J. Grape Wine Res.*, 14: 91-103.
- Bittelli, M.; Flury, M. 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *SSSAJ*, 73(5): 1453-1460.
- Bolarin, M.; Estañ, M.; Caro, M.; Romero-Aranda, R.; Cuartero, J. 2001. Relationship between tomato fruit growth and fruit osmotic potential under salinity. *Plant Sci*, 160(6): 1153-1159.
- Blancaflor, B.; Masson, P. 2003. Plant Gravitropism. Unraveling the ups and downs of a complex process. *Plant Physiol*, 133(4): 1323-1340. doi: 10.1104/pp.103.032169.
- Bleiholder, G. 1996. Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono y dicotiledóneas cultivadas. 2da Ed. Uwe Meier. Grossbeeren, Alemania.

- Bradford, K.; Hsiao, T. 1982. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant Physiol*, 70(5): 1508-1513.
- Brauman, K.; Siebert, S.; Foley, J. 2013. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security — a global analysis. *Environ. Res. Lett.*, 8: 24-30. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024030.
- Brinckmann, E. 2005. ESA hardware for plant research on the International Space Station. *Adv. Space Res.*, 36: 1162-1166. doi: 10.1016/j.asr.2005.02.019.
- Brown, P.; Tanner, C. 1983. Alfalfa osmotic potential: A comparison of the water-release curve and frozen-tissue methods. *Agron. J.*, 75: 91-93.
- Cai, G.; Vanderborght, J.; Klotzsche, A.; van der Kruk, J.; Neumann, J.; Hermes, N.; Vereecken, H. 2016. Construction of minirhizotron facilities for investigating root zone processes. *Vadose Zone J.*, 15(9): 1-13. doi:10.2136/vzj2016.05.0043.
- Camarena, F.; Huaranga, 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.
- Cárdenas-Arroyo, F. 1992. América: tres civilizaciones y numerosas sociedades intermedias. *Revista Credencial Historia*, 34. Bogotá, Colombia. [en línea]. Consultado el 14-12-2015. Disponible en: <http://www.banrepcultural.org/node/32891>
- Casanova, M.; Salazar, O.; Seguel, O.; Noguer, V. 2009. Conductividad hidráulica en monólitos de suelo de Chile central. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.*, 9(3): 210-221.
- Cassab, G.; Eapen, D.; Campos, M. 2013. Root Hydrotropism: An Update. *Am. J. Bot.*, 100(1): 14-24. doi:10.3732/ajb.1200306.
- 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. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, 2: 97–110.
- Chaves, M.; Santos, T.; Souza, C.; Ortuño, M.; Rodrigues, M.; Lopes, C.; Maroco, J.; Pereira, J. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Ann Appl Biol*, 150: 237-252.

Cobos, D.; Chambers, C. 2010. Calibrating ECH₂O Soil Moisture Sensors. Decagon Device, application Note. 7 pp. Consultado el 21-05-2014. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Application%20Notes/13393_Calibrating%20ECH2O%20Probes Print.pdf

Collins, M.; Fuentes, S.; Barlow, E. 2010. Partial root zone drying and deficit irrigation increase stomatal sensitivity to vapor pressure deficit in anisohydric grapevines. *Funct Plant Biol*, 37: 128-138.

Comstock, J. 2002. Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration. *J. Exp. Bot.*, 53: 195-200.

Cornelis, W.; Corluy, J.; Medina, H.; Hartmann, R.; Van Meirvenne, M.; Ruiz, M. 2006. A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage. *Eur. J. Soil Sci.*, 57(2): 258–268. doi: 10.1111/j.1365-2389.2005.00739.x.

Costa, M.; Pham, A.; Pimentel, C.; Pereyra, R.; Zuily-Fodil, Y.; Laffray, D. 2000. Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress. *Environ. Exp. Bot.*, 43: 227-237.

Cuéllar, S.; Covarrubias, A. 2005. Alternativas para enfrentar la sequía en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*). *Revista Claridades Agropecuarias*, 142: 32-41.

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. doi: 10.3389/fspas.2016.00003.

Davies, J.; Wilkinson, S.; Loveys, B. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytol*, 153(3): 449-460.

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. *J. Exp. Bot.*, 51: 1617-1626.

De la Hera, M.; Romero, P.; Gomez-Plaza, E.; Martinez, A. 2007. Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agric. Water Manage.*, 87: 261-274.

- De Pau, L.; Satta, D.; Zucca, L.; Bandino, G.; Mameli, M. 2011. Effects of the irrigation regime and partial root zone drying in Vermentino grapevines in Sardinia, Italy. *Acta Hort*, 889: 83-90.
- 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.
- De Santana, M.; Lemos, L.; de Souza, S.; Campos, T.; da Silva, F.; Borges, R. 2014. Estimated production and evapotranspiration of irrigated bean cultivars. *Eng. Agríc.*, 34(6): 1089-1103.
- Dener, E.; Kacelnick, A.; Shemesh, H. 2016. Pea plants show risk sensitivity. *Current Biology*., 26 (13): 1763-1767. doi:10.1016/j.cub.2016.05.008.
- Dexter, A.; Bird, N. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Tillage Res*, 57(4): 203-212. doi: 10.1016/S0167-1987(00)00154-9.
- Díaz-Abril, D.; Vélez-Sánchez, J.; Rodríguez, P. 2016. Irrigation reduction resistance mechanisms in the rapid fruit growth stage of pears (*Pyrus communis* L.). *Agron. colomb.* 24(1): 25-32. doi: 10.15446/agron.colomb.v34n1.52573.
- Díaz-Abril, D. 2015. Evaluación de la respuesta a la aplicación de riego deficitario controlado en cultivo de pera variedad triunfo de viena (*Pyrus communis* L.). Tesis de Magister en Ingeniería Agrícola. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 103 p.
- Dichio, B.; Xiloyannis, C.; Angelopoulos, K.; Nuzzo, V.; Bufo, S.; Celano, G. 2003. Drought-induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*. *Plant Soil*, 257(2): 381-389.
- Ditengou, F.; Teale, W.; Kochersperger, P.; Flittner, K.; Kneuper, I.; Van der Graaff, E.; Nzienguí, H.; Pinoso, F.; Li, X.; Nitschke, R.; Laux, T.; Palme, K. 2008. The lateral root initiation index: an integrative measure of primordium formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(48): 18818-18823.

- Dodd, I.; Theobald, J.; Bacon, M.; Davies, W. 2006. Alternation of wet and dry sides during partial rootzone drying irrigation alters root-to-shoot signalling of abscisic acid. *Funct. Plant Biol.*, 33(12): 1081-1089.
- Dodd, I. 2003. Hormonal interactions and stomatal responses. *J Plant Growth Regul*, 22: 32-46.
- Donado, D. 2004. Modelo de conductividad hidráulica en suelos. Tesis M.Sc. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 157 p.
- Doria, J. 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31 (1): 74-85.
- Du, S.; Kang, S.; Li, F.; Du, T. 2016. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid northwest China. *Agric. Water Manage.*, *In Press*. doi: 10.1016/j.agwat.2016.05.011.
- Du, T.; Kang, S.; Zhang, J.; Davies, W. 2015. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *J. Exp. Bot.*, 66(8): 2253-2269. doi: 10.1093/jxb/erv034.
- Du, T.; Kang, S.; Zhang, J.; Li, F. 2008. Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China. *Irrig. Sci.* 26: 147-159. doi: 10.1007/s00271-007-0081-0.
- du Toit, P.; Dry, P.; Loveys, B. 2003. A preliminary investigation on partial root-zone drying (PRD) effects on grapevine performance, nitrogen assimilation and berry composition. *South Afr J Enol Vitic*, 24: 43-54.
- Dubrovsky, J.; Soukup, A.; Napsucialy, S.; Jeknic, Z.; Ivanchenko, M. 2009. The lateral root initiation index: an integrative measure of primordium formation. *Annals of Botany*, 103: 807-817. doi: 10.1093/aob/mcn267.
- Dubrovsky, J.; Gambetta, G.; Hernández, A.; Shishkova, S.; González, I. 2006. Lateral root initiation in *Arabidopsis*: Developmental window, spatial patterning, density and predictability. *Annals of Botany*, 97: .903-915. doi: 10.1093/aob/mcj604.
- Eapen, D.; Barroso, M.; Campos, M.; Ponce, G.; Corkidi, G.; Dubrovsky, J.; Cassab, G. 2003. A *no hydrotropic response* root mutant that responds positively to gravitropism in *Arabidopsis*. *Plant Physiol*, 131: 536–546. doi: 10.1104/pp.011841.

Esmon, A.; Pedmale, U.; Liscum, E. 2005. Plant tropisms: providing the power of movement to a sessile organism. *Int. J. Dev. Biol.*, 49: 665-674. doi: 10.1387/ijdb.052028ce.

Evangelista, A.; Lima, L.; da Silva, A.; Martins, C.; Ribeiro, M. 2013. Soil water potential during different phenological phases of coffee irrigated by center pivot. *Eng. Agríc.*, 33(2): 269-278.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2007. World water day: Coping with water scarcity - Challenge of the twenty-first century; chapter producing more with less water [en línea]. Consultado el 10-03-2015. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/docs/escarcity.pdf>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Capítulo 3: Por qué la productividad del agua es importante para el desafío global del agua. [en línea]. Consultado el 17-07-2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s06.htm>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2002. Deficit irrigation practices. [en línea]. Consultado el 14-07-2016. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr22e.pdf>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2000. El estado mundial de la agricultura y alimentación: Los efectos sociales y económicos de la modernización de la agricultura. [en línea]. Consultado el 10-05-2016. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x4400S/x4400s10.htm>

Félix, H. 2011. Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid: modelo vs. experimentos. Tesis doctoral. Mendoza, Argentina, Universidad Nacional de Cuyo. 220 p.

Feng, W.; Lindner, H.; Robbins, N.; Dinneny, J. 2016. Growing out of stress: The role of cell- and organ-scale growth control in plant water-stress responses. *The Plant Cell*, 28: 1769-1782. doi: 10.1105/tpc.16.00182.

Ferl, R.; Wheeler, R.; Levine, H.; Paul, A. 2002. Plants in space. *Curr Opin Plant Biol*, 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. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 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 Soil*, 284: 273-291. doi: 10.1007/s11104-006-0045-9.
- Filgueira, R.; Soracco, C.; Sali, G.; Fournier, Ll. 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *CI. Suelo*, 24(1): 1-10.
- Firn, R.; Wagstaff, C.; Digby, J. 2000. The use of mutants to probe models of gravitropism. *J. Exp. Bot.*, 51(349): 1323-1340.
- Freixas, J.; Torres, C.; Reynaldo, I.; Nápoles, M. 2011. Niveles de ureidos en plantas de soya con diferentes inoculantes y sometidas a déficit hídrico. *Cultivos Tropicales*, 32 (2): 122-135.
- 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.
- García- García, J.; Martínez-Cutillas, A.; Romero, P. 2012. Financial analysis of wine grape production using regulated deficit irrigation and partial root-zone drying strategies. *Irrig Sci*, 30: 179-188.
- Garduño-González, J.; Morales-Rosales, E.; Guadarrama-Valentín, S.; Escalante-Estrada, J. 2009. Biomasa y rendimiento de frijol con potencial ejotero en unicultivo y asociado con girasol. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(1): 33-39.
- Gill, V.; Dale, T. 1985. *Topsoil and civilization*, University of Oklahoma Press; Edition: Rev. Ed (VII-MCMLXXXV).
- Gomes, J.; Barbieri, J. 2004. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. *Cadernos EBAPE.BR*, 2(3): 01-21. doi: 10.1590/S1679-39512004000300002.

- Gómez, L.; Ortiz-Pulido, R.; Lara, C. 2013. Sensibilidad al riesgo durante el forrajeo en los colibríes *Hylocharis leucotis* y *Selasphorus platycercus*. Huitzil, 14 (1): 7-16.
- Gowing, J.; Davies, J.; Jones, G. 1990. A positive rootsourced as an indicator of soil drying in apple, *Malus x domestica* Borkh. J. Exp. Bot., 41(233): 1535-1540.
- Greenspan, M. 2000. Using the leaf porometer in grapes. Advanced Viticulture. [en línea]. Consultado el 16-05-2015. Disponible el: http://www.advancedvit.com/Using_the_leaf_porometer_in_grapes.pdf
- Guedea-Fernández, G.; Arriaga-Frías, A.; De la Cruz-Guzmán, G. 2001. El efecto de maceta y el rizotrófon: una herramienta para la investigación y docencia. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 7(2): 115-121.
- Guevara, A.; Giordano, C. 2015. Hydrotropism in lateral but not in pivotal roots of desert plant species under simulated natural conditions. Plant Soil, 389(1): 257-272. doi 10.1007/s11104-014-2361-9.
- 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. Adv. Space Res., 41: 736-741. doi: 10.1016/j.asr.2007.09.013.
- Harrison, B.; Masson, P. 2008. ARL2, ARG1 and PIN3 define a gravity signal transduction pathway in root statocytes. The Plant Journal, 53: 380-392. doi: 10.1111/j.1365-313X.2007.03351.x.
- Herridge, L. 2014. Veggie Plant Growth System Activated on International Space Station. Cabo Cañaveral, EEUU. NASA's John F. Kennedy Space Center. [en línea]. Consultado el 21-09-2015. Disponible en <https://www.nasa.gov/content/veggie-plant-growth-system-activated-on-international-space-station>
- Hessini, K.; Martínez, J.; Gandour, M.; Albouchi, A.; Soltani, A.; Abdelly, C. 2009. Effect of water stress on growth, osmotic adjustment, cell wall elasticity and water-use efficiency in *Spartina alterniflora*. Environ. Exp. Bot., 67(2): 312-319. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.010.
- Ho, M.; Rosas, J.; Brown, K.; Lynch, J. 2005. Root architecture tradeoffs for water and ph
- Holbrook, N.; Shashidar, R.; James, A.; Munns, R. 2002. Stomatal control in tomato with ABA-deficient roots: response of grafted plants to soil drying. J. Exp. Bot., 53: 1503-1514.

- Hublitz, I.; Henninger, D.; Drake, B.; Eckart, P. 2004. Engineering concepts for inflatable Mars surface greenhouses. *Adv. Space Res.*, 34: 1546-1551. doi: 10.1016/j.asr.2004.06.002.
- Hutton, R.; Loveys, B. 2011. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus—Effects on water use efficiency and fruit characteristics. *Agric. Water Manage.*, 98(10): 1485–1496. doi:10.1016/j.agwat.2011.04.010.
- Jara, J.; Celis J. 1989. Módulo de elasticidad y otros parámetros biofísicos en frijol negro. *Agro-Ciencia*, 5(1): 49-56.
- Jarre, C.; Loor, J.; Vega, E. 2013. Bases técnicas para el riego presurizado. Editorial Dreams Magnet Primera edición. New York, USA. 223p.
- Jensen, C.; Battilani, A.; Plauborg, F.; Psarras, G.; Chartzoulakis, K., Janowiak, F.; Stikic, R.; Jovanovic, Z.; Li, G.; Qi, X.; Lui, F.; Jacobsen, S.; Andersen, M. 2010. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signaling in potatoes and tomatoes. *Agric. Water Manage.*, 98(3): 403-413. doi: 10.1016/j.agwat.2010.10.018.
- Jeudy, C.; Adrian, M.; Baussard, C.; Bernard, C.; Bernaud, E.; Bourion, V.; Busset, H.; Cabrera-Bosquet, L.; Cointault, F.; Han, S.; Lamboeuf, M.; Moreau, D.; Pivato, B.; Prudent, M.; Trouvelot, S.; Truong, H.; Vernoud, V.; Voisin, A.; Wipf, D.; Salon, C. 2016. RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation. *Plant Methods*, 7: 12:31. doi: 10.1186/s13007-016-0131-9.
- 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.
- Jovanovic, Z.; Stikic, R. 2012. Strategies for Improving Water Productivity and Quality of Agricultural Crops in an Era of Climate Change, *Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments*, Dr. Teang Shui Lee (Ed.), ISBN: 978-953-51-0420-9, InTech, [en línea]. Consultado el 25-07-2016. Disponible en: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/34108.pdf>
- Judd, L.; Jackson, B.; Yap, T.; Fonteno, C. 2014. Mini-Horhizotron: An apparatus for observing and measuring root growth of container-grown plant material in situ. *HortScience*, 49(11): 1424-1431.

- Khalil, A.; Grace, J. 1993. Does xylem sap ABA control the stomatal behavior of water stressed sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings? *J. Exp. Bot.*, 44(7): 1127-1134. doi: 10.1093/jxb/44.7.1127.
- Kiss, J.; Kumar, P.; Millar, K.; Edelmann, R.; Correll, M. 2009. Operations of a spaceflight experiment to investigate plant tropisms. *Adv. Space Res.*, 44: 879-886. doi: 10.1016/j.asr.2009.06.007.
- Kiss, J. 2000. Mechanisms of the early phases of plant gravitropism. *Crit Rev Plant Sci*, 19: 551-573.
- Kriedemann, P.; Goodwin, I. 2003. Irrigation Insights No.3 Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying. Land & Water Australia, Canberra.
- 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. Santa María, RS Brasil, Universidad Federal de Santa María. 92 p.
- Lanna, A.; Taeko, S.; Rios, T.; Pereira, R.; de Figueiredo, M. 2016. Physiological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes, water stress induced with contrasting response towards drought. *Aust J Crop Sci*, 10(1): 1-6.
- Lanza, M. 2008. Identificación de genes que participan en el desarrollo de la arquitectura radicular en *Arabidopsis thaliana*. Tesis doctoral. Madrid, España, Universidad Autónoma de Madrid. 142 p.
- Leib, B.; Caspari, H.; Redulla, C.; Andrews, P.; Jabro, J. 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrig. Sci.*, 24(2): 85-99. doi: 10.1007/s00271-005-0013-9.
- 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.
- Loveys, B.; Stoll M.; Dry, P.; McCarthy, M. 1998. Partial rootzone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *The Australian Grapegrower and Winemaker*, 404a: 108-113.

- Lv., G.; Kang, Y.; Li, L.; Wan, S. 2010. Effect of irrigation methods on root development and profile soil water uptake in winter wheat. *Plant Physiol*, 28(5): 387-398. doi: 10.1007/s00271-009-0200-1.
- Martínez, J.; Silva, H.; Ledent, J.; Pinto, M. 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Eur J Agron*, 26(1): 30-38. doi:10.1016/j.eja.2006.08.003.
- Martínez, J. 2006. Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas áridos. *Polis*, 14: 2-12.
- Mencuccini, M.; Mambelli, S.; Comstock, J. 2000. Stomatal responsiveness to leaf water status in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a function of time day. *Plant Cell Environ*, 23: 1109-1118.
- Metin, S.; Yazar, A.; Tekin, S. 2011. Effects of partial root zone drying and deficit irrigation on yield and oil quality of sunflower in a mediterranean environment. *Irrig. and Drain.*, 60: 499-508. doi: 10.1002/ird.607.
- Migliaccio, F.; Tassone, P.; Fortunati, A. 2013. Circumnutation as an autonomous root movement in plants. *Am. J. Bot.*, 100(1): 4-13.
- Migliaccio, K.; Morgan, K.; Fraisse, C.; Vellidis, G., J.H. Andreis 2015. Performance evaluation of urban turf irrigation smartphone app. *Comput Electron Agric*, 118: 136-142.
- Miklas, P.; Kelly, J.; Beebe, S.; Blair, M. 2006. Common bean breeding for resistance against biotic and abiotic stresses: From classical to MAS breeding. *Euphytica*. 147: 105-131. doi: 10.1007/s10681-006-4600-5.
- Millar, A. 1993. Manejo de agua y producción agrícola. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, oficina en Chile. 556p.
- Monje, O; Stutte, G.; Goins, G.; Porterfield, D.; Bingham, G. 2003. Farming in space: environmental and biophysical concerns. *Adv. Space Res.*, 31(1): 151-167.
- Moraes-Dallaqua, M.; Massa, C.; Domingos, J. 2000. Anatomia de ápices radiculares de feijão cv. carioca submetidos a níveis de boro em solução nutritiva. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 57(3): 425-430.

- Moreno, L. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agron. colomb.*, 27 (2): 179-191.
- Moriwaki, T.; Miyazawa, Y.; Kobayashi, A.; Takahashi, H. 2013. Molecular mechanisms of hydrotropism in seedling roots of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae). *Am. J. Bot.*, 100(1): 25-34. doi: 10.3732/ajb.1200419.
- Morrow, R.; Bula, R.; Tibbitts, T.; Dinauer, W. 1994. The ASTROCULTURE™ flight experiment series, validating technologies for growing plants in space. *Adv. Space Res.* 14(11): 29-37.
- Niabu, C.; Gibbs, D.; Coates, C. 2008. Branching out in new directions: the control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist*, 179: 595-614. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02472.x.
- Nóbrega, J.; Tantravahi, V.; Rao, R.; de M. Beltrão, N.; Filho, F. 2001. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, 5(3): 437-443.
- Nunes, R.; Mazzei, F.; Oliveira, A.; Corrêa da Silva, B.; Massi, T.; de Menezes, M.; Fernandes, E.; Michael, D.; Campostrini, E. 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. *Sci Hort*, 183: 13-22. doi: 10.1016/j.scienta.2014.12.005.
- Ojeda, M.; Pire, R. 1996. Densidad de raíces en vid sometidas a diferentes láminas de riego por goteo. *Proc. Interamer. Soc. Trop. Hort.* 40: 219-223.
- Oki, T.; Kanae, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313 (5790): 1068–1072. doi: 10.1126/science.1128845.
- Olivares, E. 2005. Efecto de la sequía sobre la eficiencia fotoquímica del PSII en *N. dombeyi* (Mirb.) Oerst.. Memoria de título Licenciatura en Ciencias Biológicas, Universidad Austral de Chile, Valdivia-Chile, 62 p.
- Paltineanu, C.; Septar, L.; Moale, C.; Nicolae, S.; Nicola, C. 2013. Peach response to water deficit in a semi-arid region. *Int. Agrophys* 27:305-311. doi: 10.2478/v10247-012-0099-2.

- Passini, T.; Christoffoleti, P.; Ubukata, I. 2003. Competitivy of the common-bean plant relative to the weed alexandergrass [*brachiaria plantaginea* (link) hitch.]. *Sci. Agric.* (Piracicaba, Braz.), 60 (2): 259-268.
- Passioura, J.; Angus, J. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron*, 106: 37-75.
- Passot, S.; Gnacko, F.; Moukouanga, D.; Lucas, M.; Guyomarc'h, S.; Moreno, B.; Atkinson, J.; Belko, M.; Bennett, M.; Gantet, P.; Wells, D.; Guédon, Y.; Vigouroux, Y.; Verdeil, J.; Muller, B.; Laplaze, L. 2016. Characterization of pearl millet root architecture and anatomy reveals three types of lateral roots. *Front. Plant Sci.* 7(829): 1-11. doi: 10.3389/fpls.2016.00829.
- Patakas, A.; Nikolaou, N.; Zioziou, E.; Radoglou, K.; Noitsakis, B. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Sci*, 163(2): 361-367.
- Peralta, M. 2008. Pendientes de crecimiento en el desarrollo vertical de ornamentales en paredes vivas. Tesis M.Sc. Montecillo, México, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. 86 p.
- Pimentel, C. 2004. A relação da planta com a água. EDUR -Editora Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-, Soropédica-RJ. 191p.
- Polanía, J.; Idupulapati, M.; Beebe, S.; García, R. 2009. Desarrollo y distribución de raíces bajo estrés por sequía en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema de tubos con suelo. *Agron. colomb.*, 27(1): 25-32.
- Poorter, H.; Bühler, J.; Dusschoten, D. van; Climent, J.; Postma, J. 2012. Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Funct. Plant Biol.*, 39: 839-850. doi: 10.1071/FP12049.
- Prado, K.; Maurel, C. 2013. Regulation of leaf hydraulics: from molecular to whole plant levels. *Front. Plant Sci.*, 4(255): 1-14. doi: 10.3389/fpls.2013.00255.
- Prakash, C. 2001. The genetically modified crop debate in the context of agricultural evolution. *Plant Physiol.* 126: 8-15.

- 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. *J. Exp. Bot.*, 6(8): 2325-2334.
- Quezada, C.; Sandoval, M.; Serri, H.; Barra, L.; Rillon, S.; Barriga, R. 2014. Efecto de diferentes niveles de riego en el rendimiento de rosa mosqueta (*Rosa canina* L.), en la zona Centro-Sur de Chile. *Agro sur*, 42(2): 19-27.
- Quintero, M.; Molina, O. 2006. Los costos ambientales en la actividad agrícola. *Actualidad Contable FACES*. 9 (12): 109-117.
- Renault, D.; Wallender, W. 2000. Nutritional water productivity and diets: from 'crop per drop' towards 'nutrition per drop'. *Agric. Water Manage.*, 45: 275-296.
- Rezene, Y.; Gebeyehu, S.; Zelleke, H. 2013. Morpho-physiological response to post-flowering drought stress in small red seeded common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Journal of Plant Studies*, 2(1): 42-53. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/jps.v2n1p42>.
- Robbins, N.; Dinneny, J. 2015. The divining root: moisture-driven responses of roots at the micro- and macro-scale. *J. Exp. Bot.*, 66(8): 2145–2154. doi: 10.1093/jxb/eru496.
- Roberts, S.; Snowman, B. 2000. The effects of ABA on channel-mediated K⁺ transport across higher plant roots. *J. Exp. Bot.*, 51(350): 1585-1594.
- Romero, P.; García-García, J.; Fernández-Fernández, J.; Gil, R.; del Amor, F.; Martínez-Cutillas, A.; 2016. Improving berry and wine quality attributes and vineyard economic efficiency by long-term deficit irrigation practices under semiarid conditions. *Sci Hort*, 203: 69-85. doi: 10.1016/j.scienta.2016.03.013.
- Romero, P.; Gil, R.; Fernández-Fernández, J.; del Amor, F.; Martínez-Cutillas, A.; García-García, J. 2015. Improvement of yield and grape and wine composition in field-grown Monastrell grapevines by partial root zone irrigation, in comparison with regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manage.*, 149: 55-73. doi: 10.1016/j.agwat.2014.10.018.
- 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. *Funct. Plant Biol.*, 41(11): 1087-1106. doi: 10.1071/FP13276.

- 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. *Irrig. Sci.*, 30 (5): 377–396. doi: 10.1007/s00271-012-0347-z.
- Romero-Arenas, O.; Damián, M.; Rivera, J.; Báez, A.; Huerta, M.; Cabrera, E. 2013. The nutritional value of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and its importance for feeding of rural communities in Puebla-Mexico. *Int. Res. J. Biological Sci.* 2(8): 59-65.
- Rosales, M.; Ocampo, E.; Rodríguez-Valentín, R.; Olvera-Carrillo, Y.; Acosta-Gallegos, J.; Covarrubias, A. 2012. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. *Plant Physiol Biochem*, 56: 24-34. doi: 10.1016/j.plaphy.2012.04.007.
- Sánchez, I.; Catalán, E.; Gonzales, G.; Estrada, J.; García, D. 2006. Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura Técnica en México*, 32 (3): 333-340.
- Sánchez-Urdaneta, A.; Colmenares, C.; Peña-Valdivia, C.; Marrugo, A., Urdaneta, M. 2011. Efecto del potencial de agua del sustrato en la germinación de maíz (*Zea mays* L.). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 28(Supl. 1): 51-61.
- Saruhan, N.; Sağlam, A.; Demiralay, M.; Kadioğlu, A. 2012. Apoplastic and symplastic solute concentrations contribute to osmotic adjustment in bean genotypes during drought stress. *Turk J. Biol.* 36: 151-160. doi: 10.3906/biy-1101-177.
- Sauter, A.; Davies, W.; Hartung, W. 2001. The long-distance abscisic acid signal in the droughted plant: the fate of the hormone on its way from root to shoot. *J. Exp. Bot.*, 52(363): 1991-1997. doi: 10.1093/jexbot/52.363.1991.
- Savić, S.; Stikića, R.; Vucelić, B.; Bogičevića, B.; Jovanović, Z.; Hadži-Tašković, V. 2008. Comparative effects of regulated deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on growth and cell wall peroxidase activity in tomato fruits. *Sci Hort*, 117(1): 15-20.
- Schlosser, C.; Strzepek, K.; Xiang, G.; Gueneau, A.; Fant, C.; Paltsev, S.; Rasheed, B.; Smith-Greico, T.; Blanc, É.; Jacoby, H.; Reilly, J. 2014. The Future of Global Water Stress: An Integrated Assessment. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report No. 254. (en línea). Consultado el 19-05-2016. Disponible en: http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt254.pdf

- Sepaskhah, A.; Ahmadi, S. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production* 4(4): 241-258.
- Serna, A.; Zegbe, J.; Mena, J. 2011. Rendimiento y calidad de chile seco 'mirasol' cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1): 19-24.
- Serna-Pérez, A.; Zegbe, J.; Mena-Covarrubias, J. 2011. Rendimiento y calidad de chile seco 'Mirasol' cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 17 (1): 19-24.
- Silva, D.; Beeson, R., Jr. 2011. A large-volume rhizotron for evaluating root growth under natural-like soil moisture conditions. *HortScience*, 46(12): 1677-1682.
- Simonneau, T.; Barrieu, P.; Tardieu, F. 1998. Accumulation rate of ABA in detached maize roots correlates with root water potential regardless of age and branching order. *Plant Cell Environ*, 21: 1113-1122.
- Snaith, P.; Mansfield, T. 1982. Stomatal sensitivity to abscisic acid: can it be defined? *Plant Cell Environ*, 5: 309-311.
- Stadelmann, E. 1984. The derivation of the cell wall elasticity function from the cell turgor potential. *J. Exp. Bot.*, 35(6): 859-868. doi: 10.1093/jxb/35.6.859.
- Stedel, E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *J. Exp. Bot.*, 51(350): 1531-1542.
- Stikic, R.; Popovic, S.; Srdic, M.; Savic, D.; Jovanovic, Z.; Prokic, Lj.; Zdravkovic, J. 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulg. J. Plant Physiol*, special issue: 164-171.
- Stoll, M.; Loveys, R.; Dry, R. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *J. Exp. Bot.*, 51: 1627-1634.
- Szymanowska, J.; Lipowczan, M. 2014. Growth rate distribution in the forming lateral root of arabidopsis. *Annals of Botany*, 114: 913-921.
- Tahi, H.; Wahbi, S.; Wakrim, R.; Aganchich, B.; Serraj, R.; Centritto, M. 2007. Water relations, photosynthesis, growth and water use efficiency in tomato plants subjected to partial rootzone drying and regulated deficit irrigation. *Plant Biosystems*, 141(2): 265-274.

- Takahashi, H. 2007. How do plants grow in microgravity? *In*: Memories of The 28th Space Station Utilization Workshop, “KIBO, opening a New Frontier”. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Tokio, Japan p 1. [en línea]. Consultado el 09-04-2016. Disponible en: http://global.jaxa.jp/article/special/kibo/takahashi_e.html
- Takahashi, H. 1997. Hydrotropism: The current state of our knowledge. *J. Plant Res.*, 110: 163-169.
- Takahashi, H. 1994. Hydrotropism and its interaction with gravitropism in roots. *Plant Soil*, 165(2): 301-308.
- Takahashi, H.; Scott, T. 1991. Hydrotropism and its interaction with gravitropism in maize roots. *Plant Physiol*, 96: 558-564.
- Takahashi, H.; Miyasawa, Y.; Fujii, N. 2009. Hormonal interactions during root tropic growth: hydrotropism versus gravitropism. *Plant Mol Biol.*; 69(4): 489-502. doi: 10.1007/s11103-008-9438-x.
- Takahashi, H.; Takano, M.; Fujii, N.; Yamashita, M.; Suge, H. 1996. Induction of hydrotropism in clinorotated seedling roots of Alaska pea, *Pisum sativum* L. *J. Plant Res.*, 109(1095): 335-337.
- Takahashi, N.; Yamazaki, Y.; Kobayashi, A.; Higashitani, A.; Takahashi, H. 1996. Hydrotropism interacts with gravitropism by degrading amyloplasts in seedling roots of *Arabidopsis* and Radish. *Plant Physiol*, 132(2): 805-810. doi: 10.1104/pp.018853.
- 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 Sci.*, 9(72): 1-16.
- Tang, L.; Li, Y.; Zhang, J. 2010. Partial rootzone irrigation increases water use efficiency, maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area. *Agric. Water Manage.*, 97(10): 1527–1533. doi:10.1016/j.agwat.2010.05.006.
- Tian, H.; De Smet, I.; Ding, Z. 2014. Shaping a root system: regulating lateral versus primary root growth. *Trends Plant Sci*, 19(7): 426-431. doi: 10.1016/j.tplants.2014.01.007.
- Trincado, J. 2005. Relaciones agua-planta en paltos (*Persea American Mill*) cv. Hass, sector Peumo, provincia Cachapoal, VI región. Memoria de título Ingeniero Civil Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán-Chile, 80 p.

- Tsutsumi, D.; Kosugi, K.; Mizuyama, T. 2003. Root-System development and water-extraction model considering hydrotropism. *Soil Sci. Soc. American Journal*, 67(2): 387-401. doi:10.2136/sssaj2003.3870.
- Tyree, M.; Hammel, T. 1972. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique. *J. Exp. Bot.*, 23(1): 267-282, doi: 10.1093/jxb/23.1.267.
- USGS (U.S. Geological Survey), 2016. The world's water [en línea]. Consultado el 20-05-2016. Disponible en: <http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>
- Valenzuela, H. 2011. Caracterización del potencial hídrico xilemático a mediodía en diez especies frutales. Memoria de título de ingeniero agrónomo, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago. 37 p.
- Vega, E. y Mejía, A. 2015. Prototipo (macetero) para el riego parcial de raíces (RPR). *Eng. Agríc., En prensa.*
- Vellidis, G.; Liakos, V.; Andreis, J.; Perry, C.; Porter, W.; Barnes, E.; Morgan, K.; Fraisse, C.; Migliaccio, K. 2016. Development and assessment of a smartphone application for irrigation scheduling in cotton. *Comput Electron Agric*, 127: 249-259.
- Vera-Núñez, J.; Grageda-Cabrera, O.; Vuelvas-Cisneros, M.; Peña-Cabriales, J. 2001. Absorción de nitrógeno (^{15}N) por el cultivo de cebada en relación con la disponibilidad de agua en "El Bajío", Guanajuato, México. *Terra*, 20: 57-64.
- Vernieri, P.; Lenzi, A.; Figaro, M.; Tognoni, F.; Pardossi, A. 2001. How the roots contribute to the ability of *Phaseolus vulgaris* L. to cope with chilling-induced water stress. *J. Exp. Bot.*, 52(364): 2199-2206.
- Vieira, R.; Carneiro, J.; Lynch, J. 2008. Root traits of common bean genotypes used in breeding programs for disease resistance. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43(6): 7007-712.
- Villalobos, E. 2006. Fisiología de los cultivos tropicales: fijación simbiótica del nitrógeno. Vol. 3, primera edición, 38 p. Editorial Universidad de Costa Rica, San José.
- 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.). *Agric. Ecosyst. Environ.*, 106: 275-287. doi:10.1016/j.agee.2004.10.019.

- White, J.; Castillo, J. 1992. Evaluation of diverse shoot genotypes on selected root genotypes of common bean under soil water deficits. *Crop Sci.* 32, 762-765.
- White, S. 2007. Partial rootzone drying and deficit irrigation in cotton for use under large mobile irrigation machines. Tesis doctoral. Toowoomba, Australia, University of Southern Queensland. 196 p.
- Wolverton, C.; Kiss, J. 2009. An update on plant space biology. *Gravitational and Space Biology.*, 22 (2): 13-20.
- Wyatt, S.; Kiss, J. 2013. Plant tropisms: from Darwin to the International Space Station. *Am. J. Bot.*, 100(1): 1-3. doi: 10.3732/ajb.1200591.
- Xie, K.; Wang, X.-X.; Zhang, R.; Gong, X.; Zhang, S.; Mares, V.; Gavilán, C.; Posadas, A.; Quiroz, R. 2012. Partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 134: 20–25. doi:10.1016/j.scienta.2011.11.034.
- Yactayo, W.; Ramírez, A.; Gutiérrez, R.; Mares, V.; Posadas, A.; Quiroz, R. 2013. Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. *Agric. Water Manage.*, 123: 65-70. doi: 10.1016/j.agwat.2013.03.009.
- 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. *Sci Hort*, 145: 76–83. doi: 10.1016/j.scienta.2012.07.026.
- York, L.; Nord, E.; Lynch, J. 2013. Integration of root phenes for soil resource acquisition. *Front Plant Sci*, 4: 1-15. doi: 10.3389/fpls.2013.00355.
- Yuge, K.; Shigematsu, K.; Anan, M. Yoshiyuki, S. 2012. Effect of crop root on soil water retentivity and movement. *AJPS*, 3: 1782-1787. doi: 10.4236/ajps.2012.312A218.
- Zarebanadkouki, M.; Kim, Y.; Carminati, A., 2013. Where do roots take up water? Neutron radiography of water flow into the roots of transpiring plants growing in soil. *New Phytologist*, 199 (4): 1034-1044. doi: 10.1111/nph.12330.
- Zegbe, J.; Behboudian, M.; Lang, A.; Clothier, B. 2006. Responses of ‘Petopride’ processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrig Sci.* 24: 203-210. doi: 10.1007/s00271-005-0018-4.

Zegbe, J.; Behboudian, M.; Lang, A.; Clothier, B. 2005. Respuesta del manzano cv. 'Pacific RoseTM' al riego parcial de raíz. *In: Memorias del XI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas*. Chihuahua, México. p 240-243.

Zhang, J.; Davies, W. 1990. Changes in the concentration of ABA in xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth. *Plant Cell Environ*, 13: 277-285.

Zhang, S.; Outlaw, W.; Aghoram, K. 2001. Relationship between changes in the guard cell abscisic-acid content and other stress-related physiological parameters in intact plants. *J. Exp. Bot.*, 53: 301-308.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

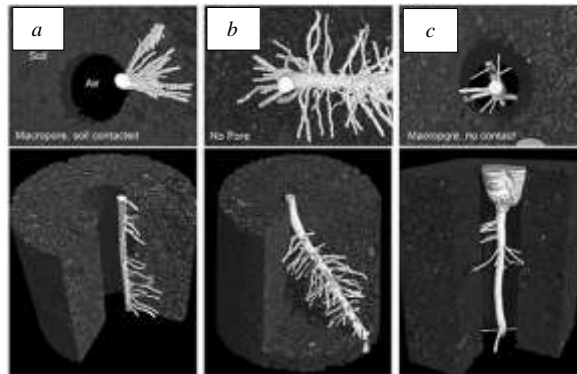


Figura 1: Vista en planta (superior) y lateral (inferior) de imágenes generadas en MicroCT del crecimiento de raíces de maíz en un sustrato de suelo: *a*) la raíz principal está creciendo de forma vertical en un espacio donde una sección de su eje está en contacto con el suelo húmedo y otra con el aire, y solo emite raíces laterales en la sección en adyacente al suelo húmedo. *b*) la raíz principal emite raíces laterales alrededor de todo su eje vertical porque está en contacto con el suelo húmedo. *c*) la raíz principal está creciendo prácticamente en el aire y apenas logra emitir raíces laterales. Fuente: Bao et al., 2014.



Figura 2: Medición del diámetro en el eje polar de la semilla de frejol común (*Phaseolus vulgaris* L.) Var. Red Klaud para el diseño de la cama de germinación en el CGPRL.

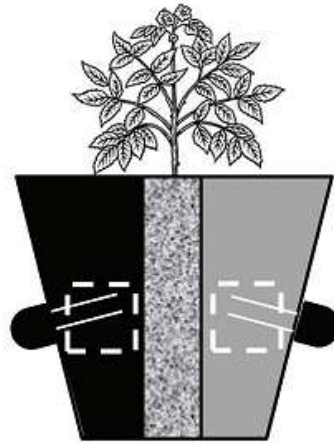


Figura 3: Configuración de un macetero propuesto para aplicación de riego parcial de raíces (RPR) en papa (*Solanum tuberosum* L.). El área gris representa el compartimento húmedo y el negro el compartimento seco donde crecen las raíces laterales; la sección central donde crece la raíz principal, y de aspecto granulado representa una capa de grava que separa los compartimentos húmedo y seco. También se representan las ubicaciones de los sensores para medir la humedad del suelo (semi-círculos negro). Fuente: Puértolas et al. (2015).



Figura 4: Saturación con agua del suelo contenido en la SDRL (lado izquierdo) del macetero de respuesta hidrogravitrópica selectiva para verificar alguna evidencia de transferencia horizontal de humedad hacia la SDRL opuesta (lado derecho).

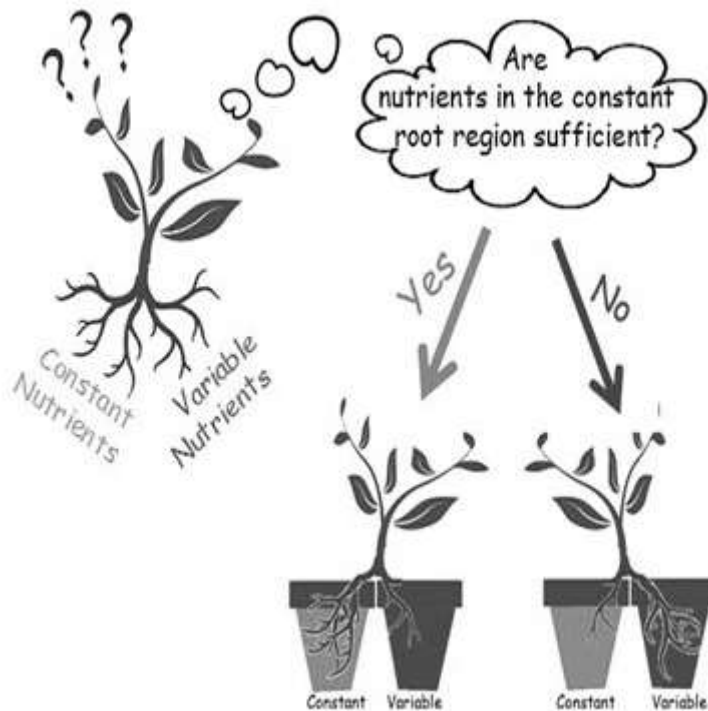


Figura 5: Resumen grafico de la evaluación a la sensibilidad al riesgo (aversión y/o propensión) en el sistema radicular de plantas de arvejas (*Pisum sativum*) cuando fue dividido en dos partes: Las plantas mostraron "aversión al riesgo", lo que significa que crecieron más raíces en el macetero denominado constante, cuando la concentración media de nutrientes fue constante y suficiente durante todo el experimento. I mostraron "propensión al riesgo", lo que significa que crecieron más raíces en el macetero denominado variable, cuando la concentración media de nutrientes fue impredecible. Fuente: Dener et al. (2016).

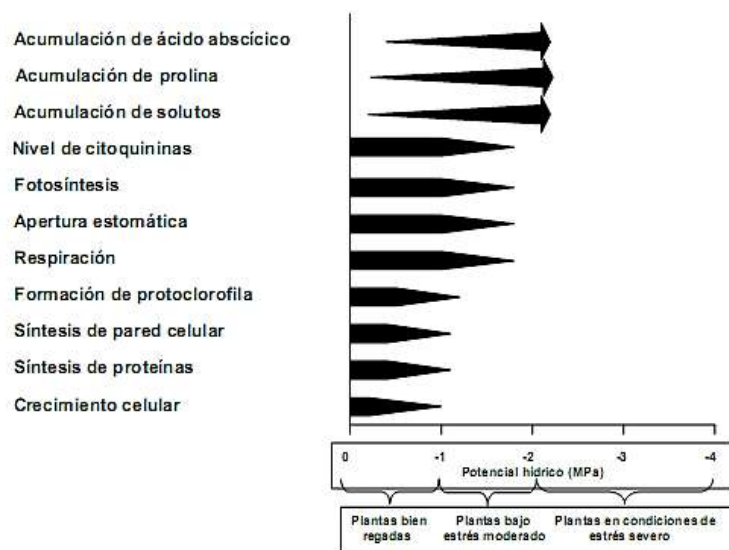


Figura 6: Efectos de la sensibilidad al déficit hídrico de diferentes cultivos reflejados en los valores del potencial hídrico xilemático. Fuente: Bradford y Hsiao (1982).

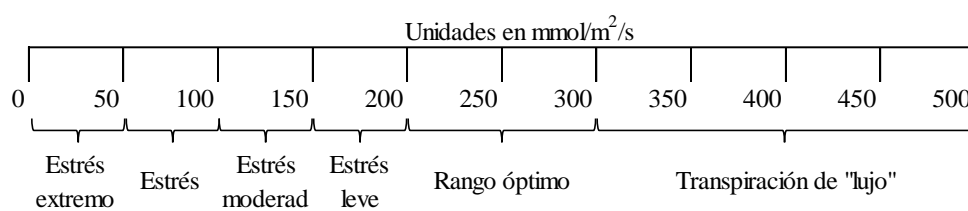


Figura 7: Escala referencial de valores de conductancia estomática para definir niveles de transpiración. Fuente: Greenspan (2000).

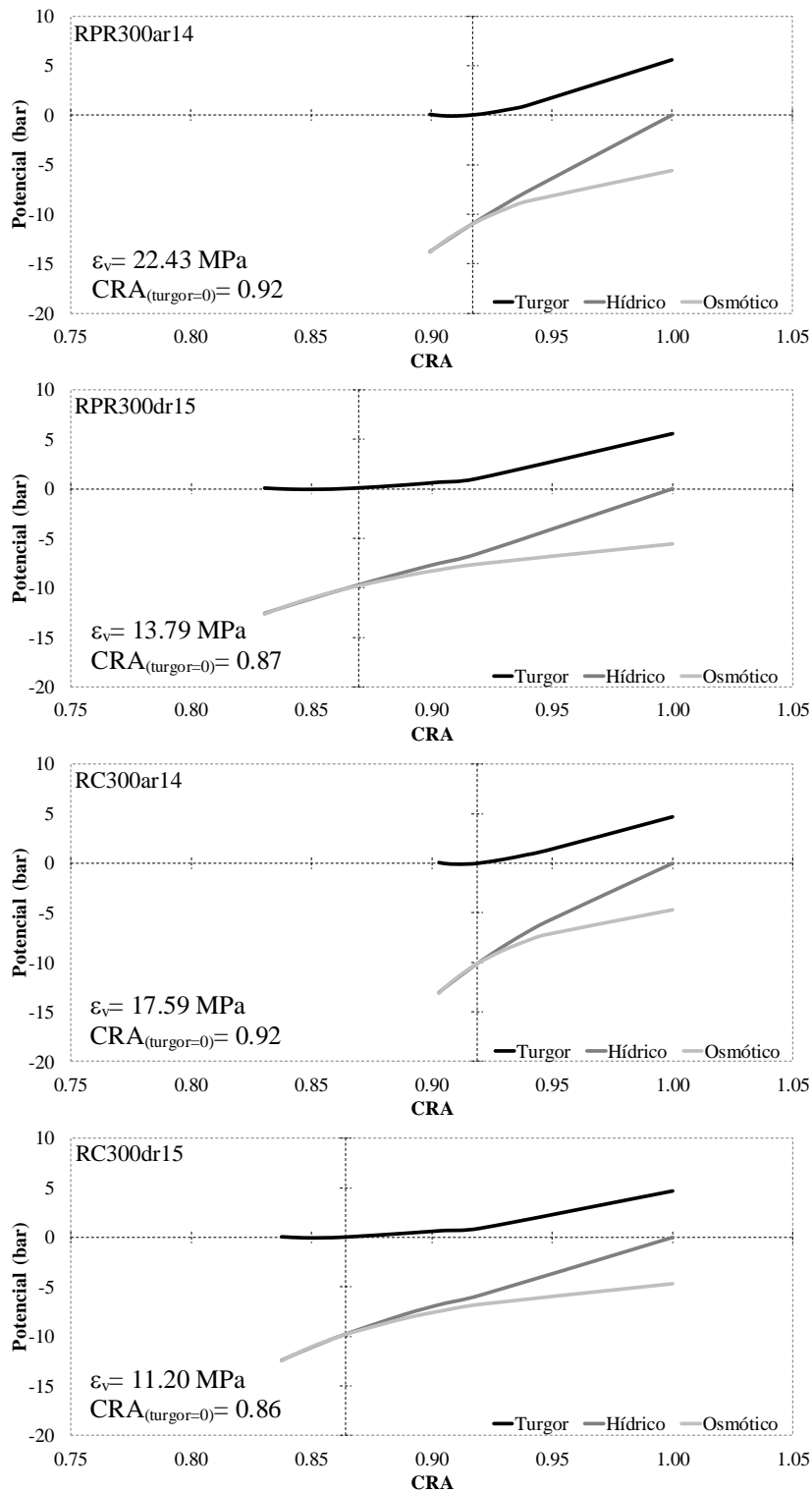


Figura 8a: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 14-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 15-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.

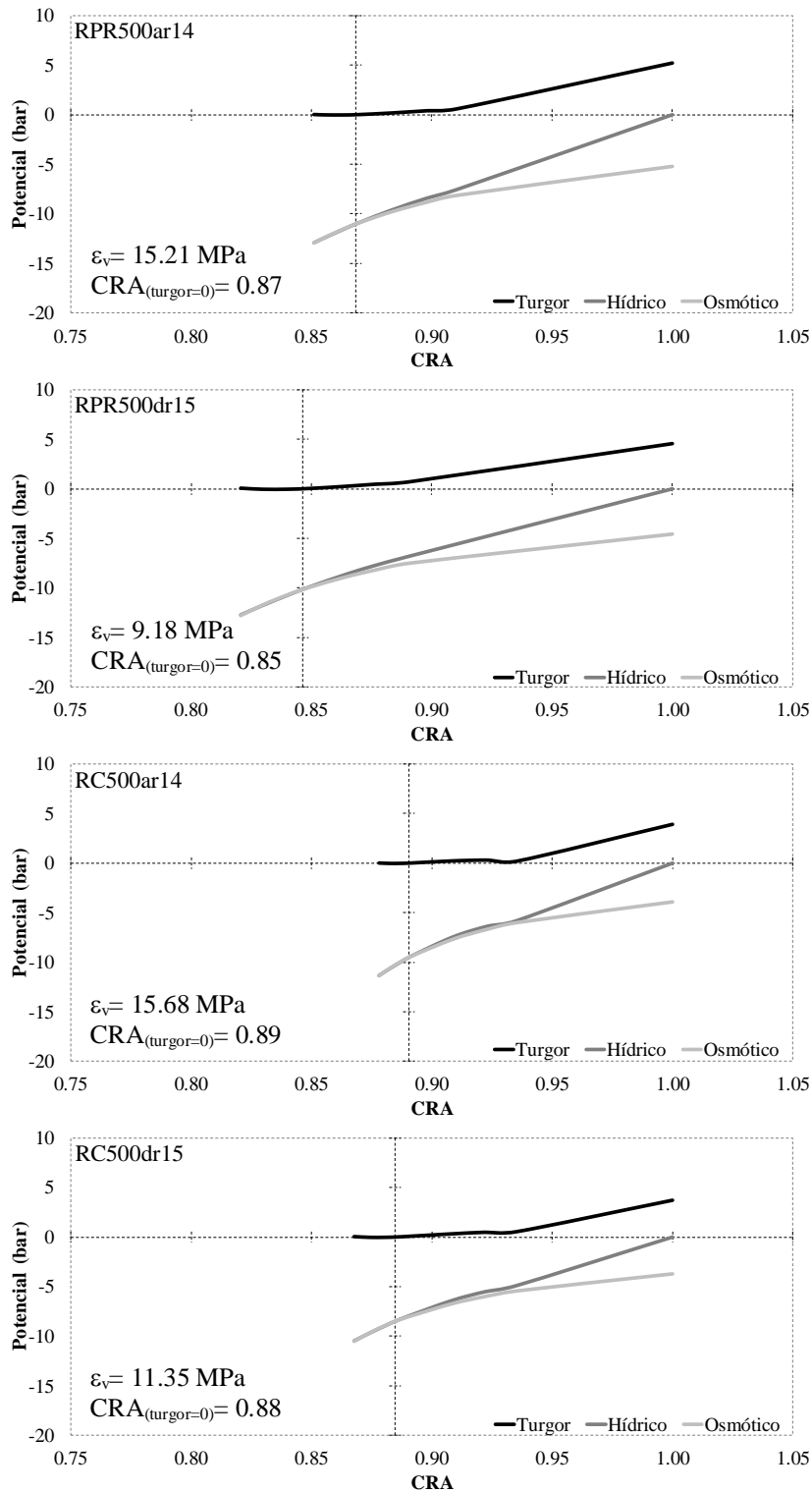


Figura 8b: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($\text{CRA}_{(\text{turgor}=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 14-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 15-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.

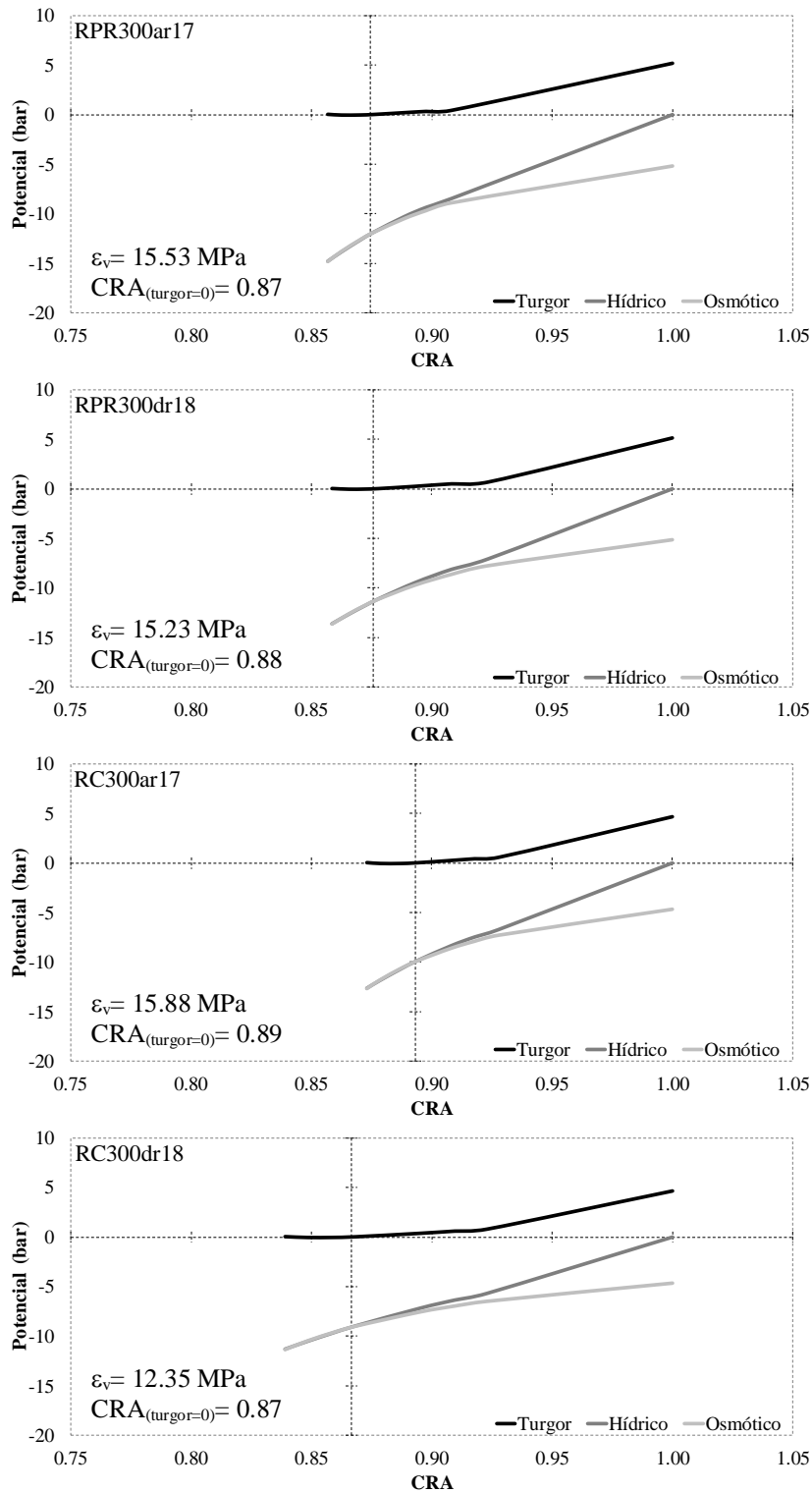


Figura 8c: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($\text{CRA}_{(\text{turgor}=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 17-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 18-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.

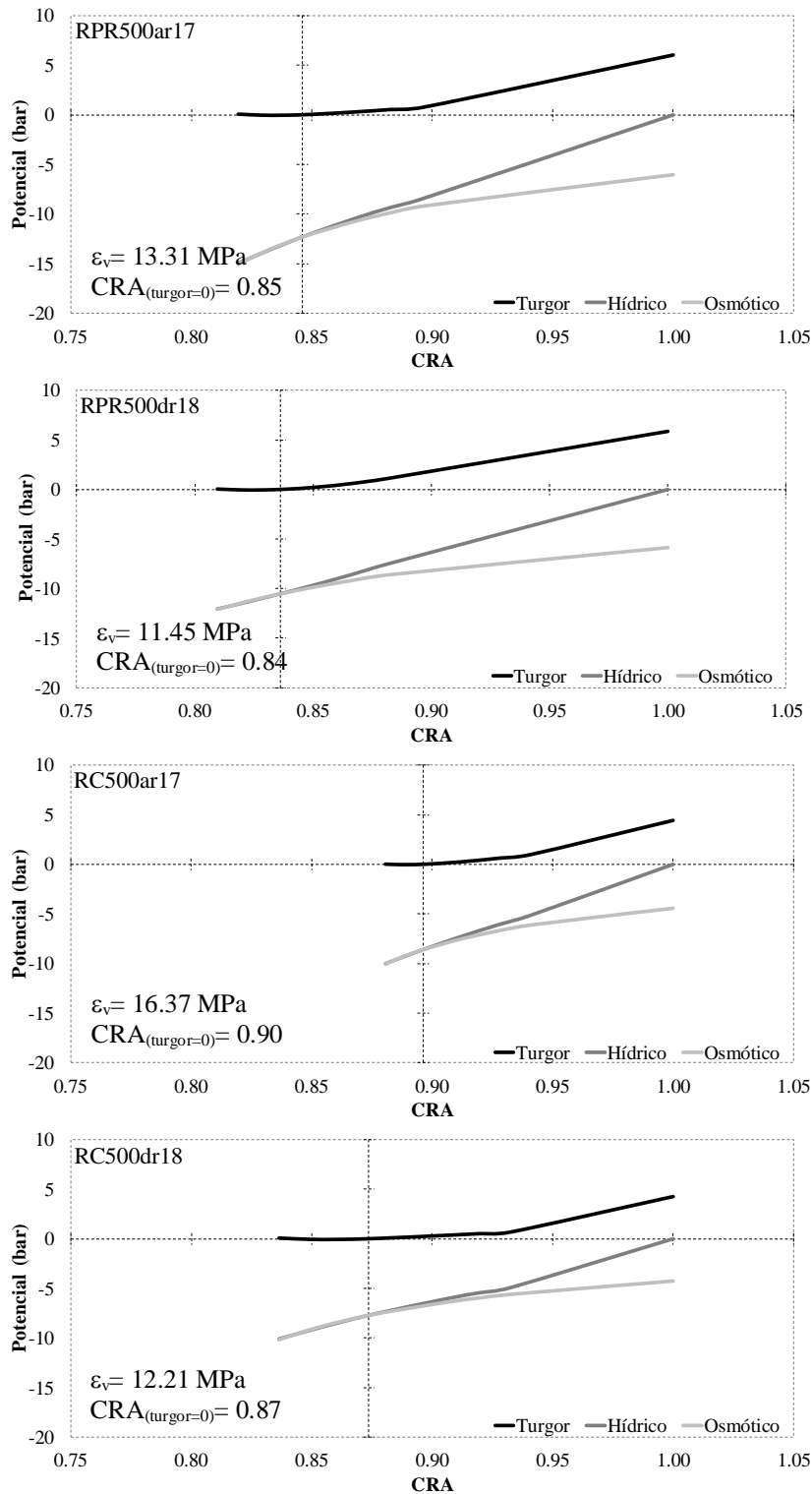


Figura 8d: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 17-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 18-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.

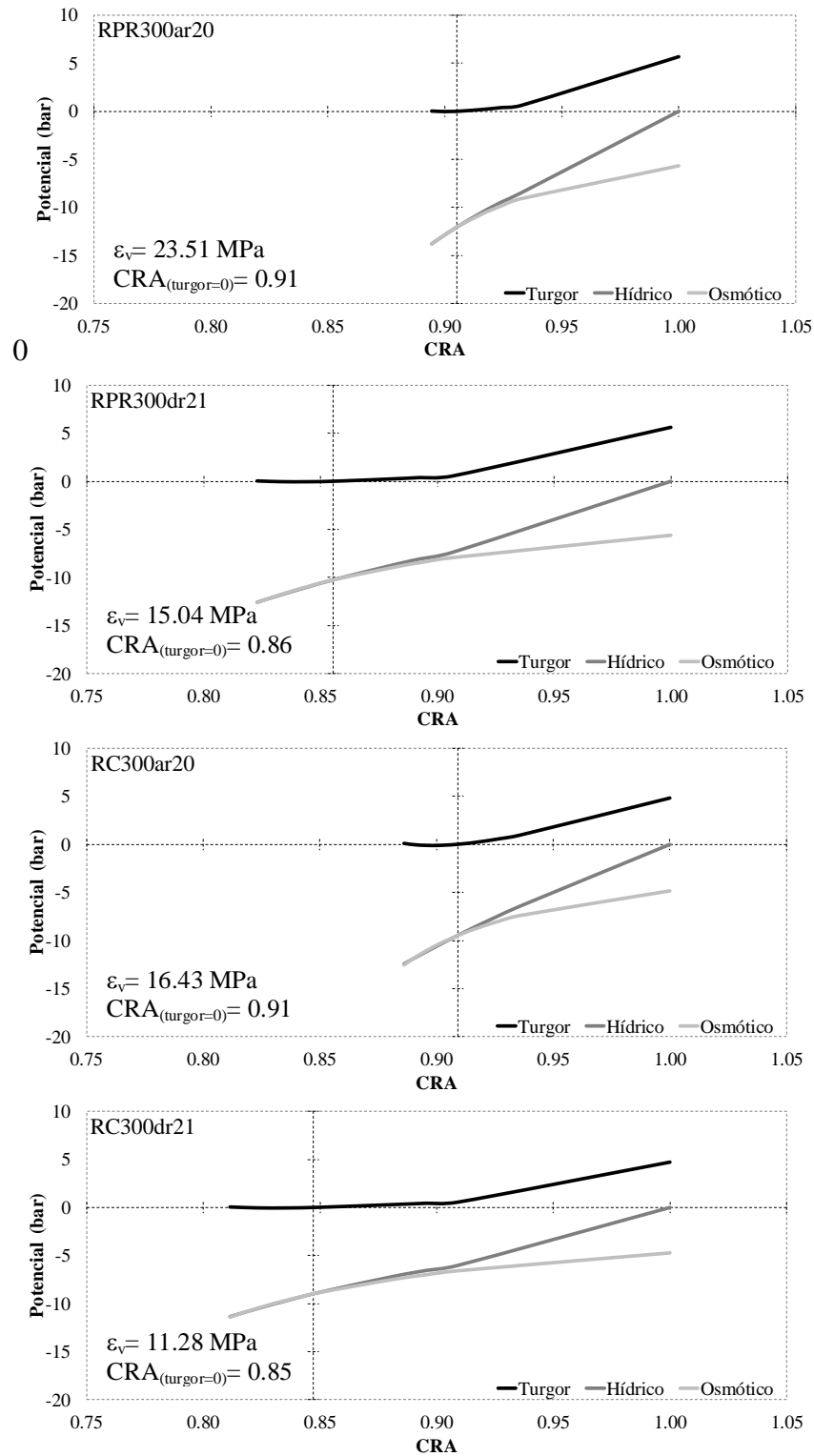


Figura 8e: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitropica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 20-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 21-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.

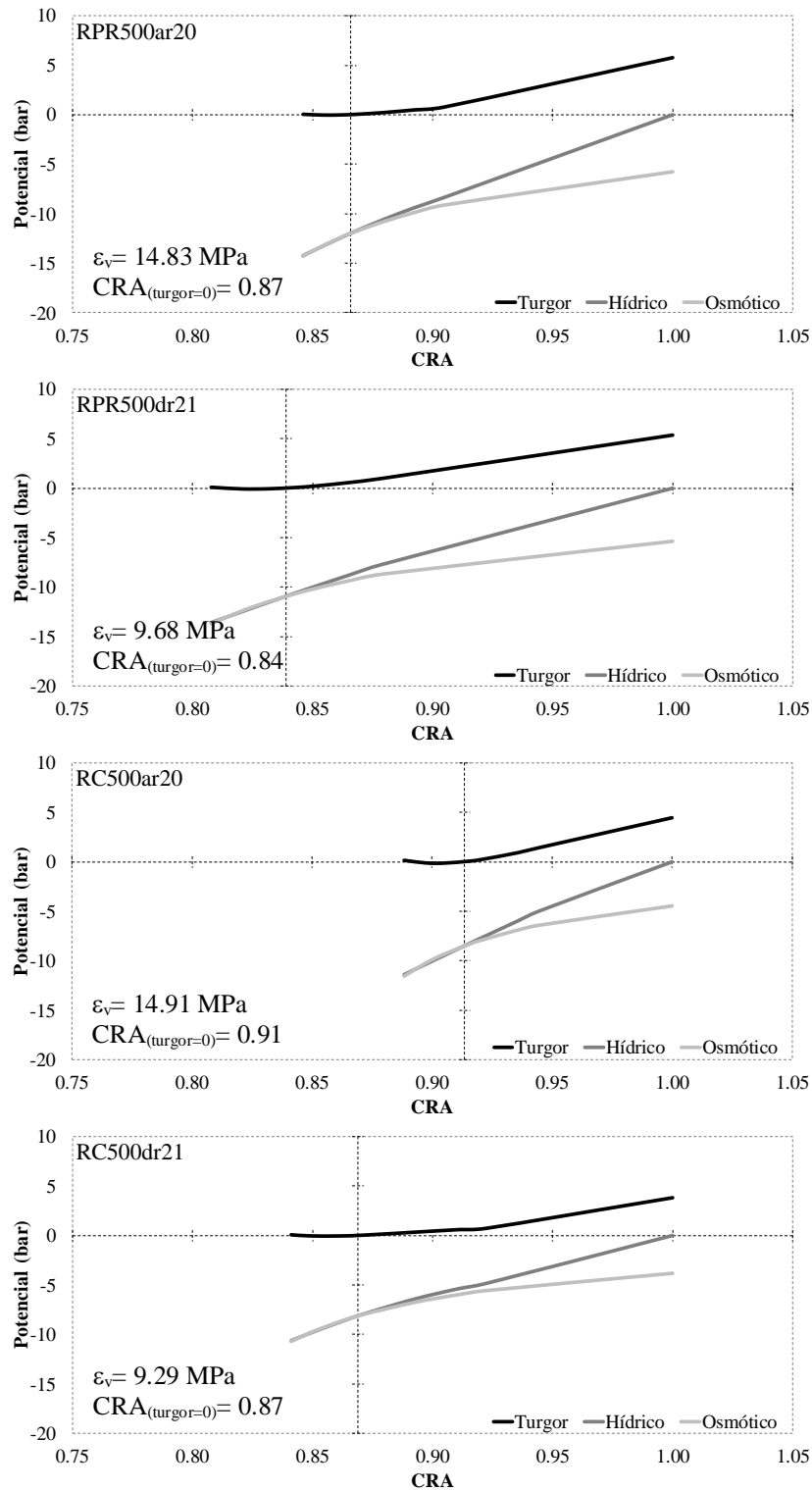


Figura 8f: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 20-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 21-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.

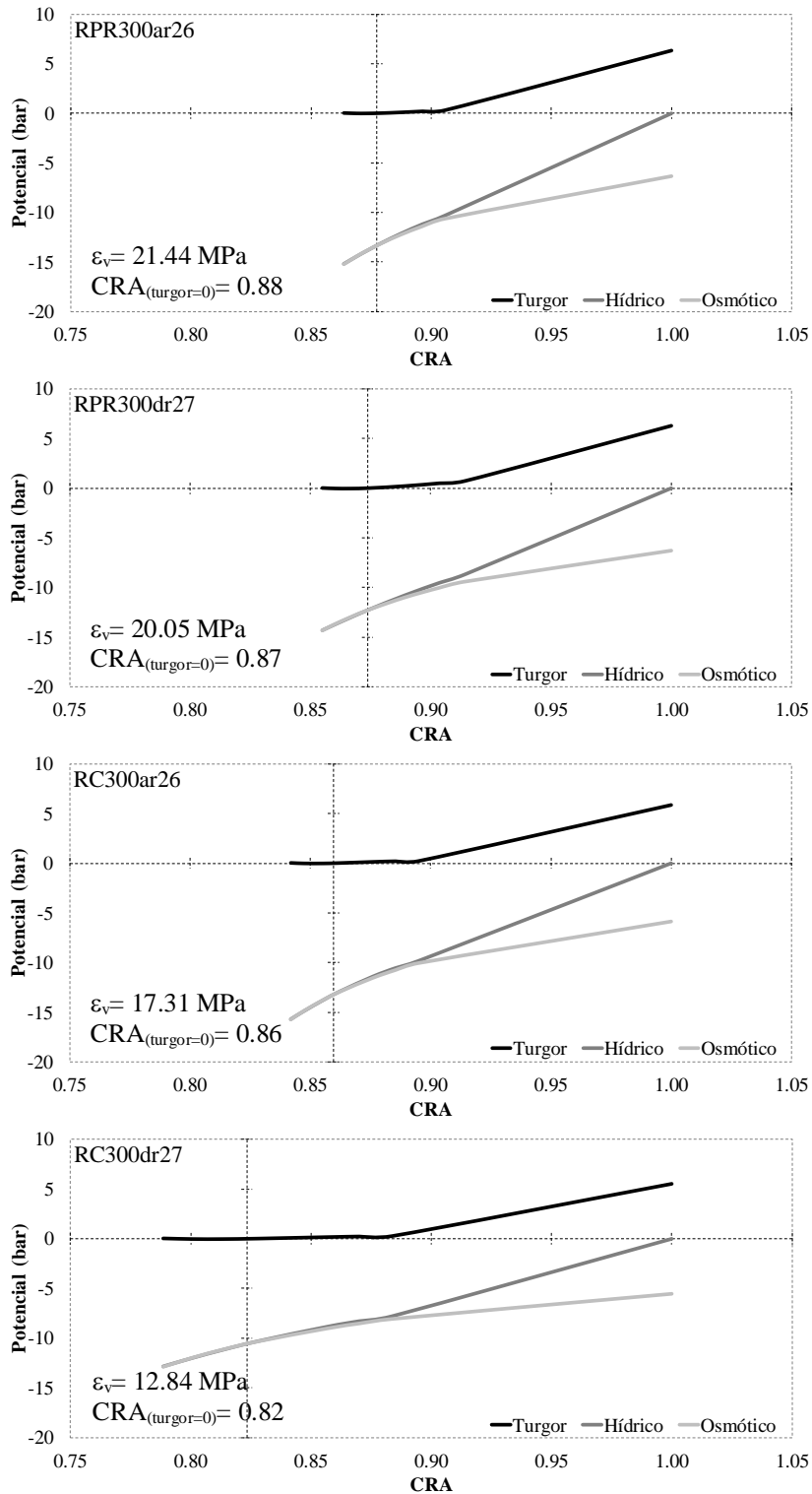


Figura 8g: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 26-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 27-11-2014), donde se aplicó 0.3 litros de agua.

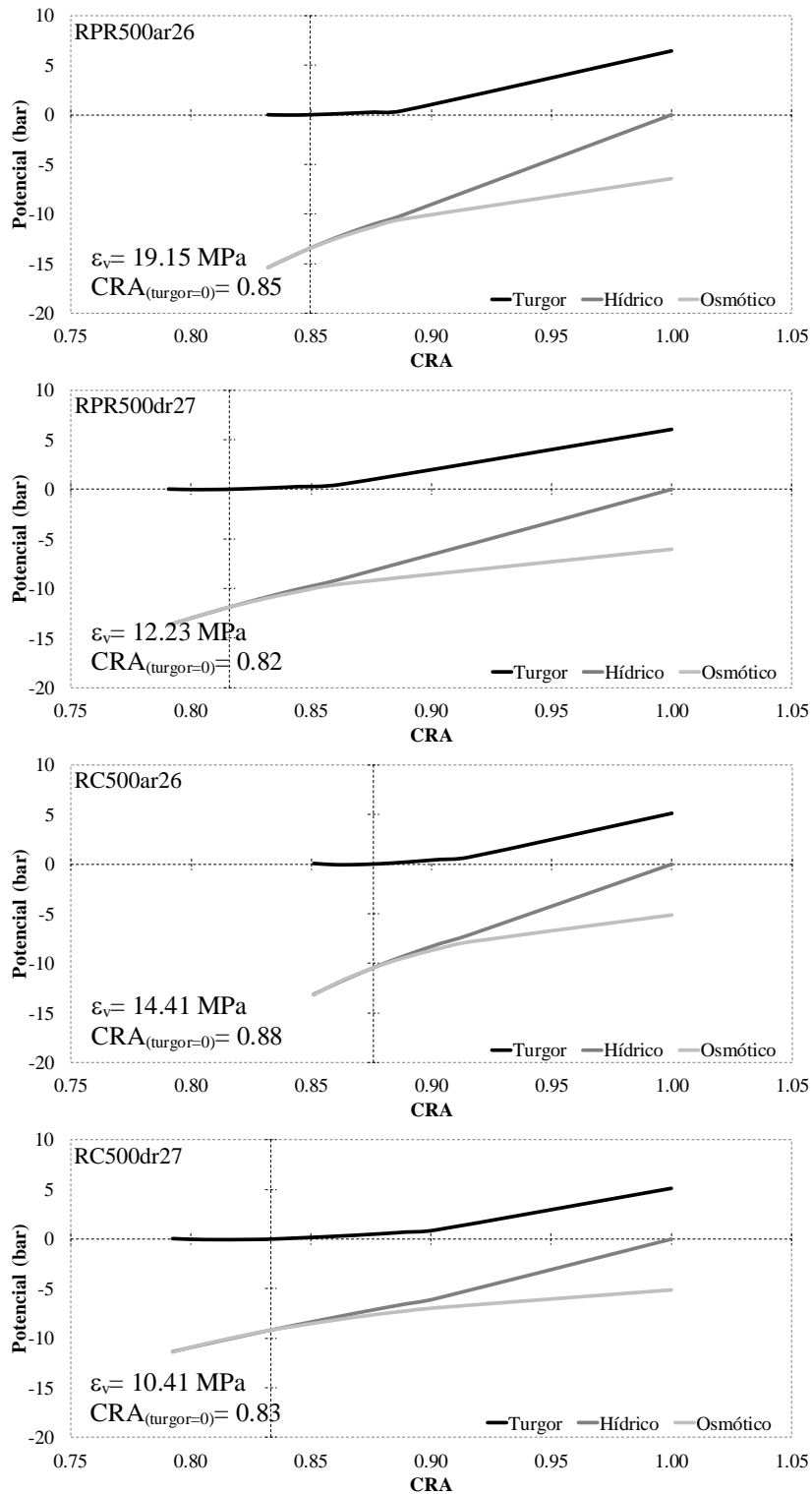


Figura 8h: Diagramas de Höfler con el respectivo valor del módulo de elasticidad (ϵ_v) y contenido relativo de agua a turgor cero ($CRA_{(turgor=0)}$) de las hojas de plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva bajo los tratamientos RPR y RC antes del riego (ar, 26-11-2014) y 24 horas después del riego (dr, 27-11-2014), donde se aplicó 0.5 litros de agua.



INFORME DE ENSAYO LENA N° 1228/2014

CLIENTE : CRISTIAN VEGA PONCE
NOMBRE DEL PRODUCTO : Vainita Verde 300 X 1
(Denominación responsabilidad del cliente)
MUESTRA : PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
FECHA DE RECEPCIÓN : 03-12-2014
FECHA DE ANALISIS : Del 03/12/14 al 22/12/14
CANTIDAD DE MUESTRA : 834 gramos
PRESENTACION : de la muestra en Bolsas de Papel
IDENTIFICACION : AQ-1228/2014

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO

ANALISIS	Resultados
a.- HUMEDAD, %	88.74
b.- PROTEINA TOTAL (N x 6.25), %	1.46
c.- GRASA, %	0.14
d.- FIBRA CRUDA, %	1.46
e.- CENIZA, %	0.83
f.- ELN, %	7.32

ELN - EXTRACTO LIBRE DE NITROGENO

Métodos utilizados:
a.- AOAC (2005), 950.46 c.- AOAC (2005), 2003.05
b.- AOAC (2005), 984.13 d.- AOAC (2005), 962.09
e.- AOAC (2005), 942.05

Atentamente,

Ing. Gloria Palacios Pardo
Jefe del Laboratorio de Evaluación
Nutricional de Alimentos

La Molina, 22 de Diciembre del 2014



INFORME DE ENSAYO LENA N° 1229/2014

CLIENTE : CRISTIAN VEGA PONCE
NOMBRE DEL PRODUCTO : Vainita Verde 300 X 2
(Denominación responsabilidad del cliente)
MUESTRA : PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
FECHA DE RECEPCIÓN : 03-12-2014
FECHA DE ANALISIS : Del 03/12/14 al 22/12/14
CANTIDAD DE MUESTRA : 964 gramos
PRESENTACION : de la muestra en Bolsas de Papel
IDENTIFICACION : AQ-1229/2014

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO

ANALISIS	Resultados
a.- HUMEDAD, %	86.28
b.- PROTEINA TOTAL (N x 6.25), %	1.55
c.- GRASA, %	0.18
d.- FIBRA CRUDA, %	1.54
e.- CENIZA, %	0.83
f.- ELN, %	7.62

ELN - EXTRACTO LIBRE DE NITROGENO

Métodos utilizados:
a.- AOAC (2005), 950.46 c.- AOAC (2005), 2003.05
b.- AOAC (2005), 984.13 d.- AOAC (2005), 962.09
e.- AOAC (2005), 942.05

Atentamente,

Ing. Gloria Palacios Pardo
Jefe del Laboratorio de Evaluación
Nutricional de Alimentos

La Molina, 22 de Diciembre del 2014



INFORME DE ENSAYO LENA N° 1230/2014

CLIENTE : CRISTIAN VEGA PONCE
NOMBRE DEL PRODUCTO : Vainita Verde 500 X 1
(Denominación responsabilidad del cliente)
MUESTRA : PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
FECHA DE RECEPCIÓN : 03-12-2014
FECHA DE ANALISIS : Del 03/12/14 al 19/12/14
CANTIDAD DE MUESTRA : 1.098 kg
PRESENTACION : de la muestra en Bolsas de Papel
IDENTIFICACION : AQ-1230/2014

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO

ANALISIS	Resultados
a.- HUMEDAD, %	88.51
b.- PROTEINA TOTAL (N x 6.25), %	1.50
c.- GRASA, %	0.35
d.- FIBRA CRUDA, %	1.53
e.- CENIZA, %	0.88
f.- ELN, %	7.43

ELN - EXTRACTO LIBRE DE NITROGENO

Métodos utilizados:
a.- AOAC (2005), 950.46 c.- AOAC (2005), 2003.05
b.- AOAC (2005), 984.13 d.- AOAC (2005), 962.09
e.- AOAC (2005), 942.05

Atentamente,

Ing. Gloria Palacios Pardo
Jefe del Laboratorio de Evaluación
Nutricional de Alimentos

La Molina, 19 de Diciembre del 2014



INFORME DE ENSAYO LENA N° 1231/2014

CLIENTE : CRISTIAN VEGA PONCE
NOMBRE DEL PRODUCTO : Vainita Verde 500 X 2
(Denominación responsabilidad del cliente)
MUESTRA : PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
FECHA DE RECEPCIÓN : 03-12-2014
FECHA DE ANALISIS : Del 03/12/14 al 19/12/14
CANTIDAD DE MUESTRA : 1.110 kg
PRESENTACION : de la muestra en Bolsas de Papel
IDENTIFICACION : AQ-1231/2014

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO

ANALISIS	Resultados
a.- HUMEDAD, %	89.79
b.- PROTEINA TOTAL (N x 6.25), %	1.43
c.- GRASA, %	0.12
d.- FIBRA CRUDA, %	1.49
e.- CENIZA, %	0.84
f.- ELN, %	8.33

ELN - EXTRACTO LIBRE DE NITROGENO

Métodos utilizados:
a.- AOAC (2005), 950.46 c.- AOAC (2005), 2003.05
b.- AOAC (2005), 984.13 d.- AOAC (2005), 962.09
e.- AOAC (2005), 942.05

Atentamente,

Ing. Gloria Palacios Pardo
Jefe del Laboratorio de Evaluación
Nutricional de Alimentos

La Molina, 19 de Diciembre del 2014

Figura 9: Resultados de análisis químicos en las vainitas de frijol cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.



INFORME DE ANALISIS FOLIAR

SOLICITANTE : CRISTHIAN VEGA PONCE
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
MUESTRA DE : PLANTAS DE FREJOL
REFERENCIA : H.R. 47857
BOLETA : 11652
FECHA : 16/12/2014

N. Lab	CLAVE DE CAMPO	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Na %	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Fe ppm	B ppm	M.S. %
5220	R1 300 x 1	3.23	0.29	3.00	1.60	0.37	0.10	0.01	104	9	21	292	69	18.85
5221	R2 300 x 1	3.00	0.27	2.89	1.85	0.39	0.09	0.01	105	9	25	324	77	18.12
5222	R3 300 x 1	3.40	0.31	4.70	1.95	0.51	0.09	0.01	93	9	28	342	67	16.79
5223	R1 300 x 2	2.77	0.27	2.42	2.03	0.46	0.11	0.01	115	8	20	308	79	18.17
5224	R2 300 x 2	2.82	0.28	3.00	2.48	0.58	0.09	0.01	121	9	31	308	98	16.39
5225	R3 300 x 2	2.69	0.27	3.70	2.26	0.53	0.11	0.01	116	9	36	924	75	16.58



Dr. Sady García Bendezu
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Telefax: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



INFORME DE ANALISIS FOLIAR

SOLICITANTE : CRISTHIAN VEGA PONCE
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
MUESTRA DE : PLANTAS DE FREJOL
REFERENCIA : H.R. 47857
BOLETA : 11652
FECHA : 16/12/2014

N. Lab	CLAVE DE CAMPO	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Na %	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Fe ppm	B ppm	M.S. %
5226	R1 500 x 1	2.81	0.27	3.70	2.40	0.55	0.13	0.01	116	10	31	367	82	16.94
5227	R2 500 x 1	2.58	0.29	4.05	1.82	0.42	0.12	0.01	104	9	22	327	76	17.59
5228	R3 500 x 1	2.50	0.29	4.46	1.85	0.41	0.13	0.01	99	10	26	323	80	17.10
5229	R1 500 x 2	2.27	0.31	2.61	1.99	0.44	0.13	0.01	96	9	23	318	73	18.72
5230	R2 500 x 2	1.86	0.29	2.53	1.99	0.46	0.12	0.01	87	8	24	378	72	18.90
5231	R3 500 x 2	1.89	0.29	2.65	1.96	0.51	0.16	0.01	121	8	19	279	79	18.49



Dr. Sady García Bendezu
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Telefax: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 10: Resultados de análisis químicos en las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas en los maceteros de respuesta hidrogravitrópica selectiva.

Cuadro 1: Clasificación aproximada del estado energético del agua del suelo y su significado fisiológico en el cultivo del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Categoría	Estado energético (kPa)	Clasificación del régimen hídrico	Comportamiento fisiológico del cultivo
0	0-33	Exceso	Crecimiento limitado por falta de oxígeno. Producción nula.
I	33-100	Óptimo	Crecimiento y desarrollo normal. Producción máxima.
II	100-200	Limitado	Crecimiento y desarrollo limitado por otros factores. Producción variable.
III	200-500	Crítico	Crecimiento y desarrollo alterado. El cultivo sufre daños fisiológicos y morfológicos. Producción reducida.
IV	500-2000	Dañino	Serias alteraciones en los tejidos. El cultivo se deseca. Producción nula.
V	>25000	Letal	Sin crecimiento

Fuente: Camarena et al. (2009)

ANEXO 2

Procedimiento y memoria de cálculo para determinar la curva presión-volumen (P-V) según la metodología de Brown y Tanner (1983), los parámetros de P-V (potencial osmótico a turgor máximo, potencial osmótico a turgor cero (también denominado potencial hídrico xilemático letal), contenido hídrico relativo a turgor cero, porcentaje de agua apoplástica) según la propuesta de Tyree y Hammel (1972); y el módulo de elasticidad del tejido según la metodología de Stadelmann (1984), en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.): Ejemplo para el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Las bases teóricas para este procedimiento asumen que el conjunto de células que forman el tejido foliar se comportan como una célula promedio, donde el potencial hídrico xilemático (Ψ_h) es igual a la suma de los potenciales osmótico (Ψ_π) y de turgor (Ψ_t):

$$\Psi_h = \Psi_\pi + \Psi_t \quad [1]$$

Proceso 1. Representación de los pares ordenados de datos sobre el eje peso/potencial hídrico xilemático medido, obtenidos con la balanza analítica AND modelo EJ-200 (d=0.01g) y la bomba Schölander Soilmoisture modelo 3005F01 respectivamente (Figura1).

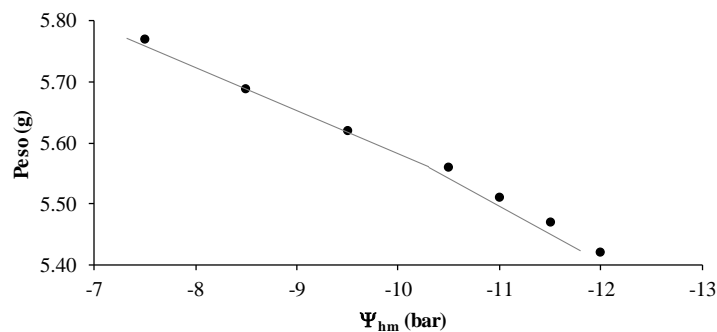


Figura 1: Curva típica presión-volumen que relaciona el potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) con el peso en una hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) obtenida bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

En la figura 1 se observa que en cierto punto existe un cambio en la pendiente de la curva que se forma con los datos graficados; este cambio se manifiesta generalmente al alcanzar el límite plasmolítico. Aun así, muchas veces el punto de inicio de la plasmólisis no se aprecia con claridad en este gráfico, sin embargo, al finalizar los cálculos con el procedimiento de Brown y Tanner (1983), se puede generar el diagrama de Höfler donde es

posible observar con mayor facilidad el inicio de este fenómeno, gracias a la visualización al mismo tiempo de los potenciales de turgor, osmótico e hídrico.

Proceso 2. Determinación del peso de hoja de frijol a turgor máximo, obtenido con la ecuación ajustada a la recta en el primer tramo de la curva de la Figura 1 antes de que se inicie el proceso de plasmólisis (Figura 2).

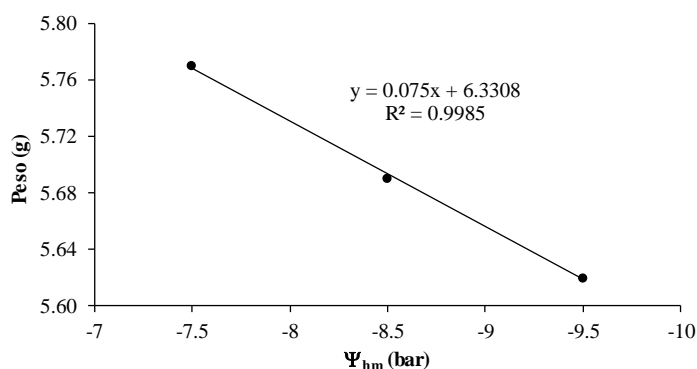


Figura 2: Generación de la ecuación para determinar el peso de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a máximo turgor con los tres primeros puntos de la curva de la figura 1 bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

En la Figura 2 y representa el peso de la hoja (g) y x el potencial hídrico xilemático medido (bar); por lo tanto, en la ecuación:

$$y = 0.075x + 6.3308 \quad [2]$$

Luego reemplazamos x por 0 (cero) que representa el potencial hídrico xilemático a máximo turgor; en este sentido, el peso de la hoja a máximo turgor corresponde a:

$$y = 6.3308 \text{ g}$$

Proceso 3. Determinación del Contenido Relativo de Agua (CRA) de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014) con la ecuación:

$$CRA = \frac{(PF-PS)}{(PMT-PS)} \quad [3]$$

Donde,

PF: peso fresco de la hoja (g), mostrados en el Cuadro 1.

PS: peso seco de la hoja (1.55 g) después de someterla a 70 °C durante 24 horas.

PMT: peso a máximo turgor (g).

Cuadro 1: Peso Fresco (PF) de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) obtenido con la balanza analítica AND EJ-200 (d=0.01g) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

PF (g)
5.77
5.69
5.62
5.56
5.51
5.47
5.42

Reemplazando los valores en Ec.3 para el primer valor del Cuadro 1:

$$CRA = \frac{(5.77 - 1.55)}{(6.33 - 1.55)}$$

Obtenemos:

$$CRA = 0.88$$

Finalmente se repite el procedimiento para todos los valores de PF (Cuadro 1), obteniendo los resultados que se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Contenido Relativo de Agua (CRA) de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

CRA (adimensional)
0.88
0.87
0.85
0.84
0.83
0.82
0.81

Proceso 4. Corrección de los valores de potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) con el Contenido Relativo de Agua (CRA) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

En la Figura 3 se muestra la ecuación que se ajusta para dos datos de la relación entre el potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) y el Contenido Relativo de Agua (CRA).

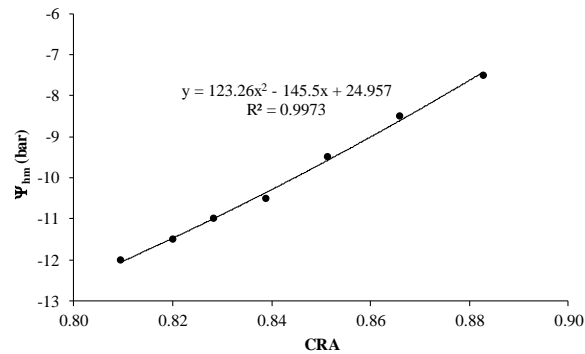


Figura 3: Potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm}) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), en función de su contenido relativo de agua (CRA) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

$$y = 123.26x^2 - 145.5x + 24.957 \quad [4]$$

Donde,

y: potencial hídrico xilemático medido (Ψ_{hm} , bar).

x: Contenido Relativo de Agua (CRA, adimensional).

Reemplazando los valores en Ec.4 para el primer valor del Cuadro 2:

$$y = 123.26 \times (0.88^2) - 145.5 \times (0.88) + 24.957$$

Obtenemos:

$$y = -7.44 \text{ bar}$$

Finalmente se repite el procedimiento para todos los valores de CRA (Cuadro 2), obteniendo los resultados que se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Potencial hídrico xilemático ajustado (Ψ_h) según el contenido relativo de agua (CRA) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Potencial hídrico xilemático ajustado (Ψ_h , bar)
-7.44
-8.61
-9.58
-10.37
-10.99
-11.48
-12.06

Proceso 5. Determinación del potencial osmótico (Ψ_π) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014), obtenido con la ecuación ajustada a la recta en el segundo tramo de la curva de la Figura 1 (Figura 4); sección donde se manifiesta el fenómeno de la plasmólisis.

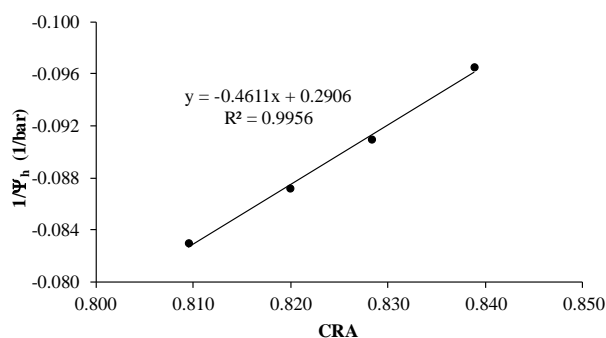


Figura 4: Generación de la ecuación para determinar el potencial osmótico (Ψ_π) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionando Ψ_h^{-1} (equivalente a Ψ_π^{-1}) y CRA con datos de la sección de la curva de la figura 1 donde se produce el fenómeno de plasmólisis bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Olivares (2005), indica que si el conjunto de sustancias osmóticamente activas dentro de la célula permanece cualitativa y cuantitativamente constante, es posible deducir, a partir de la ley de los gases ideales, una función lineal entre el recíproco del potencial osmótico y el CRA; en este sentido:

$$\Psi_\pi^{-1} = a \text{ CRA} + b \quad [5]$$

donde,

$$a = \frac{-W_t}{RT\phi n} \quad [6]$$

y

$$b = \frac{W_a}{RT\phi n} \quad [7]$$

donde,

W_t : cantidad de agua en el tejido a turgor máximo.

W_a : cantidad de agua apoplástica total en el tejido.

R : constante de los gases ideales.

T : temperatura absoluta.

ϕn : coeficiente osmótico por número de sustancias en el tejido.

Considerando la ecuación de la Figura 4:

$$y = -0.4611x + 0.2906 \quad [8]$$

donde,

y : Ψ_h^{-1} (bar^{-1})

-0.4611 : parámetro a en Ec.5

x : CRA

0.2906 : parámetro b en Ec.5

Reordenando la Ec.8, el potencial osmótico queda definido con la siguiente ecuación:

$$\Psi_\pi = \frac{1}{0.2906 - 0.4611CRA} \quad [9]$$

Reemplazando en Ec.9 CRA con el valor de 1 (que corresponde para CRA a turgor máximo):

$$\Psi_\pi = \frac{1}{0.2906 - 0.4611 \times (1)}$$

obtenemos:

$$\Psi_{\pi} = -5.87 \text{ bar (a turgor máximo)}$$

Finalmente se repite el procedimiento para todos los valores de CRA (Cuadro 2), obteniendo los resultados que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Potenciales osmóticos (Ψ_{π}) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Potencial osmótico (Ψ_{π} , bar)
-8.59
-9.20
-9.81
-10.40
-10.95
-11.43
-12.10

Proceso 6. Determinación del potencial de turgor (Ψ_t) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Despejando Ψ_t de Ec.1 obtenemos:

$$\Psi_t = \Psi_h - \Psi_{\pi} \quad [10]$$

Remplazando en Ec.10 los primeros valores calculados de Ψ_h y Ψ_{π} :

$$\Psi_t = 0 - (-5.87)$$

obtenemos:

$$\Psi_t = 5.87 \text{ bar}$$

Finalmente se repite el procedimiento para todos los valores de potencial hídrico xilemático ajustado (Cuadro 3) y potencial osmótico (Cuadro 4), obteniendo los resultados que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Potencial de turgor (Ψ_t) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Potencial de turgor (Ψ_t , bar)
1.15
0.59
0.23
0.03
-0.05 \approx 0
-0.04 \approx 0
0.04 \approx 0

Luego, es posible construir el diagrama de Höfler que relaciona los datos de los potenciales Ψ_h , Ψ_π , y Ψ_t cuadros 3, 4 y 5 versus los datos del CRA mostrados en el Cuadro 2 (Figura 5).

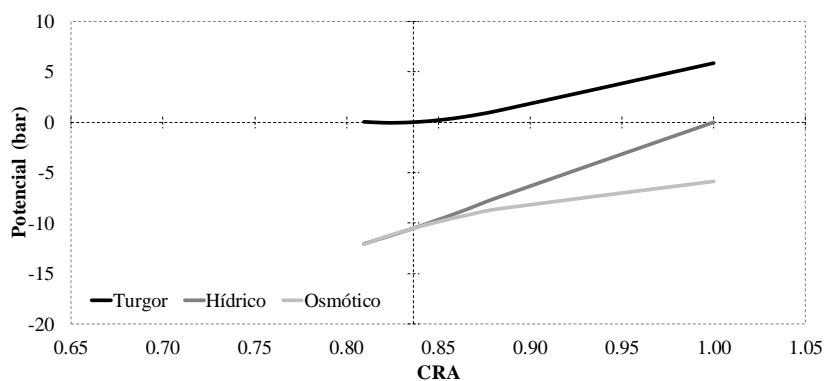


Figura 5: Diagrama de Höfler de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014), donde el eje del potencial cruza al eje del CRA en el punto de turgor cero.

Proceso 7. Determinación del potencial osmótico (Figura 6) y contenido relativo de agua (Figura 7) a turgor cero en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Para ambas determinaciones se realiza una regresión lineal entre dos datos donde el potencial de turgor este cercano a cero, se ajusta una recta y luego se extrapola haciendo $\Psi_t = 0$.

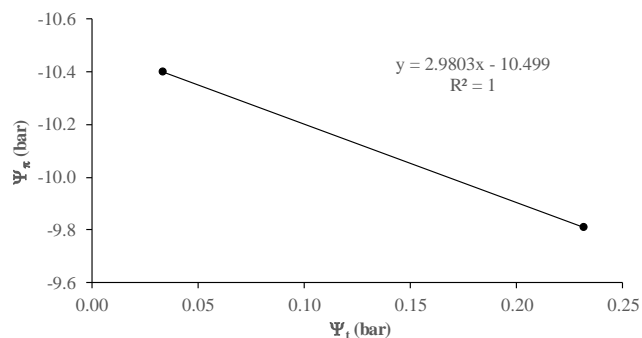


Figura 6: Potencial osmótico (Ψ_π) en función del potencial de turgor (Ψ_t) de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

En la Figura 6 se muestra la ecuación que se ajusta los dos datos de la relación entre el potencial osmótico (Ψ_π) y potencial de turgor (Ψ_t):

$$y = 2.9803x - 10.499 \quad [11]$$

donde,

y: Ψ_π (bar)

x: Ψ_t (bar)

Remplazando $\Psi_t = 0$, obtenemos:

$$\Psi_\pi = 2.9803 \times (0) - 10.499$$

$$\Psi_\pi = -10.499 \text{ bar}$$

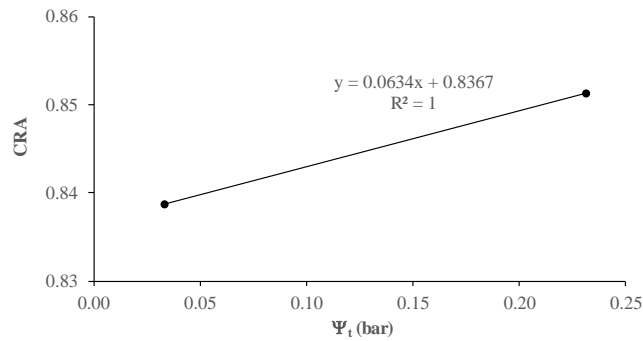


Figura 7: Contenido relativo de agua (CRA) en función del potencial de turgor (Ψ_t) de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

En la Figura 7 se muestra la ecuación que se ajusta los dos datos de la relación entre el contenido relativo de agua (CRA) y potencial de turgor (Ψ_t):

$$y = 0.0634x + 0.8367 \quad [12]$$

donde,

y: CRA

x: Ψ_t (bar)

Remplazando $\Psi_t = 0$, obtenemos:

$$CRA = 0.0634 \times (0) + 0.8367$$

$$CRA = 0.8367$$

Proceso 8. Determinación del porcentaje hídrico apoplástico (PHA) y simplástico (PHS) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

El PHS se calculó a partir de la extrapolación que relaciona $1/\Psi_h$ y CRA (Ec. 8) en la Figura 4, donde el punto $1/\Psi_h = 0$ es la fracción de agua simplástica que al multiplicarla por cien se transforma en PHS:

$$y = -0.4611x + 0.2906$$

Reemplazando $y = 0$ y despejando x , obtenemos:

$$x = \frac{0.2906}{0.4611} * 100$$

Por lo tanto:

$$PHS = \frac{0.2906}{0.4611}$$

$$PHS = 63\%$$

En el mismo contexto PHA, se obtiene con la siguiente expresión:

$$PHA = 100 - PHS \quad [13]$$

Reemplazamos PHS en Ec.13:

$$PHA = 100 - 63$$

obtenemos:

$$PHA = 37\%$$

Proceso 9. Determinación del módulo de elasticidad (ε_v , bar) en el tejido de la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014), según la metodología de Stadelmann (1984).

Stadelmann (1984) citado por Hernández y Jara (2009) derivó ε_v de una función dependiente directamente del potencial de turgor máximo (Ψ_{tm}) e inversamente proporcional al CRA

respectivo, y un coeficiente de regresión (β) como factor de proporción. De esta forma, el módulo de elasticidad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_v = -\Psi_{tm} \times \beta \times \frac{1}{CRA^{\Psi_{tm}}} \quad [14]$$

El parámetro β se relaciona con la sensibilidad de cambios de elasticidad y el grado de saturación de agua, puede ser calculado como el coeficiente de regresión a partir de una serie de cálculos individuales de pares de datos de Ψ_t y CRA con la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{\sum_{n=1} [(\frac{1}{CRA_n} - 1) \times (\ln \Psi_{tn} - \ln \Psi_{tm})]}{\sum_{n=1} (\frac{1}{CRA_n} - 1)^2} \quad [15]$$

Reemplazando los valores de CRA (Cuadro 2) y Ψ_t (Cuadro 5) desde la condición de turgor máximo hasta un punto antes de turgor cero, obtenemos los valores presentados en el Cuadro 6:

Cuadro 6: Valores del numerador y denominador de la ecuación 15 para obtener el parámetro B del módulo de elasticidad (Ψ_t) en la hoja de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo el tratamiento RPR500 después de la aplicación del riego (18-11-2014).

Valores del numerador		Valores del denominador	
	0		0
	-0.216		0.018
	-0.355		0.023
	-0.564		0.031
	-0.993		0.037
Σ	-2.129	Σ	0.109
			-19.523

Luego este resultado junto con los otros dos datos los reemplazamos en la Ec. 14 y finalmente obtenemos el módulo de elasticidad (ε_v):

$$\varepsilon_v = -5.87 \times (-19.523) \times \frac{1}{1}$$

$$\varepsilon_v = 114.50 \text{ bar } \text{ ó } 11.45 \text{ MPa}$$