

WATER RELATIONS, GAS EXCHANGE, AND YIELD OF PROCESSING TOMATO UNDER REDUCED IRRIGATION*

RELACIONES HÍDRICAS, INTERCAMBIO GASEOSO Y RENDIMIENTO DE TOMATE PARA PROCESO BAJO RIEGO REDUCIDO

Jorge A. Zegbe^{1§} and M. Hossein Behboudian²

¹Campo Experimental Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Calera de V. R., Zacatecas, México. A. P. 18. C. P. 98500. ²Hort Science Group. INR 433. Massey University. Palmerston North, New Zealand. [§]Corresponding author: jzegbe@zacatecas.inifap.gob.mx.

ABSTRACT

Partial root zone drying is a reduced irrigation technology to save water. The objective of this research was on measurement of hitherto unreported values of root water potential along with of processing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under reduced irrigation. Four irrigation treatments were applied: treatment 1, daily full irrigation as control, where both sides of the root system were well watered; treatment 2, daily irrigation on one side of the root system with half the volume of water given to daily full irrigation; treatment 3, full irrigation every other day of both sides of the root system (deficit irrigation); and treatment 4, irrigation on one side of the root system every other day with half the volume of water given to daily full irrigation. Root water potential was the same for both sides of root system in the treatments 2 and 4. Leaf water potential of treatment 2 was the same as that of treatment 1. Partial stomatal closure and lower transpiration and photosynthetic rates were observed in treatment 2 plants compared of treatment 1. Dry mass of fruit was higher in treatments 1 and 2, than in 3 and 4 treatments. It is concluded that any alteration in the physiological parameters of treatment 2 could have resulted from root signals because leaf water potential was the same in the treatments 1 and 2.

Key words: CO₂ assimilation, root and leaf water potential, stomatal conductance, transpiration.

RESUMEN

El riego parcial de la raíz (RPR) es una tecnología de riego reducido para el ahorro de agua. El objetivo de esta investigación; además de otros parámetros relacionados, fue medir valores del potencial hídrico de la raíz (Ψ_{raiz}) que hasta ahora no han sido publicados en tomate para proceso (*Solanum lycopersicum* L.), bajo el régimen de riego reducido. Se aplicaron cuatro tratamientos de riego: tratamiento 1, riego completo diario como testigo, donde ambos lados del sistema radical fueron irrigados adecuadamente; tratamiento 2, riego diario en un solo lado del sistema radical con la mitad del volumen aplicado al tratamiento 1; tratamiento 3, riego completo cada tercer día en ambos lados del sistema radical (riego deficitario); y tratamiento 4, riego cada tercer día en un lado del sistema radical con la mitad del volumen aplicado al tratamiento 1. El potencial hídrico de la raíz fue similar en ambos lados del sistema radical en los tratamientos 2 y 4. El potencial hídrico de la hoja del tratamiento 2 fue igual al observado en el tratamiento 1. Se observó un cierre estomático parcial y tasas bajas de transpiración y fotosíntesis en el tratamiento 2 comparado con el tratamiento 1. La materia seca de la fruta fue más alta en los tratamientos 1 y 2 que en los tratamientos 3 y 4. Se concluyó que cualquier alteración en los parámetros fisiológicos en el tratamiento 2, pudo haber resultado por información enviada desde la raíz, porque el potencial hídrico de la hoja fue igual en los tratamientos 1 y 2.

In research on plant water relations, the assessment of root water potential (Ψ_{root}) is often neglected because roots are less accessible than shoots (Steudle, 2000) and because of the difficulties involved in measurement of Ψ_{root} (Gee *et al.*, 1974). Nevertheless, Ψ_{root} has been measured using a pressure chamber in plants undergoing water deficit (Gee *et al.*, 1974). But this has not been done for plants either in split-root system (SRS) experiments or in partial root zone drying (PRD) research.

The root development of some deciduous trees under SRS was reported to be similar to fully irrigated trees (Poni *et al.*, 1992; Dry *et al.*, 2000). These authors suggested that water moves from roots in wetted soil to roots in drying soil and this was confirmed in grapevines by using deuterium-labelled water (Stoll *et al.*, 2000; Smart *et al.*, 2005).

Water redistribution within root system (RS) may occur at night when transpiration rate is negligible (Green *et al.*, 2006). We were interested in learning how Ψ_{root} in wetted and drying sides of PRD treatments compare with each other while transpiration is happening during the day. Our other objective was to compare water relations, gas exchange parameters, and yield of processing tomato under PRD and deficit irrigation (DI).

Plants of 'petopride' processing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) were used in an experiment conducted in a naturally-lit glasshouse, with ventilation/heating set points of 25/15 °C, at the Plant Growth Unit, Massey University, Palmerston North (40° 2' S, 175° 4' E), New Zealand. Details of the experimental set up could be found in Zegbe *et al.* (2006). The experiment was conducted from July to December 2001. Seeds were sown on 31 July 2001 and 40-day-old individual tomato plants were transplanted as described in Zegbe *et al.* (2007).

There were four treatments: treatment 1, daily full irrigation (FI) considered as control where both sides of RS were well irrigated; treatment 2, daily irrigation on one side of the RS with half the volume of water given to FI (PRD₁); treatment 3, full irrigation every other day of both sides of the RS (DI); and treatment 4, irrigation on one side of the RS every other day with half the volume of water given to FI (PRD₂). Irrigation design and management, and volumetric soil water content determination are detailed in Zegbe *et al.* (2006; 2007).

Palabras clave: asimilación de CO₂, conductancia estomática, potencial hídrico de raíz y hoja, transpiración.

En la investigación sobre relaciones hídricas de la planta, la evaluación del potencial hídrico de la raíz ($\Psi_{\text{raíz}}$) a menudo no se considera, porque las raíces están menos accesibles que los brotes (Steudle, 2000) y debido a las dificultades involucradas en la medición del $\Psi_{\text{raíz}}$ (Gee *et al.*, 1974). No obstante, $\Psi_{\text{raíz}}$ ha sido medido usando una cámara de presión en plantas sometidas a déficit hídrico (Gee *et al.*, 1974). Sin embargo, esto no se ha hecho para plantas ya sea en experimentos con el sistema radical dividido (SRD) o en investigación con riego parcial de la raíz (RPR).

Se informó que el desarrollo de las raíces de algunos árboles de hoja caduca bajo SRD, fue similar en árboles regados adecuadamente (Poni *et al.*, 1992; Dry *et al.*, 2000). Estos autores sugirieron que el agua se mueve desde las raíces en suelos húmedos y esto fue confirmado en uvas, para vinificación usando agua marcada con deuterio (Stoll *et al.*, 2000; Smart *et al.*, 2005).

La redistribución del agua dentro del sistema radical (SR), puede ocurrir en la noche cuando la tasa de transpiración es insignificante (Green *et al.*, 2006). Se tuvo interés en aprender cómo es el $\Psi_{\text{raíz}}$ en los lados húmedos y secos de los tratamientos con RPR y compararlos entre sí mientras la transpiración está ocurriendo durante el día. Nuestro objetivo fue comparar las relaciones hídricas, los parámetros de intercambio gaseoso y rendimiento de tomate para proceso, bajo RPR y riego deficitario (RD).

Se usaron plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) para proceso cv. 'Petopride' de un experimento conducido en invernadero, con activación de la ventilación/calefacción de 25/15 °C, en la unidad de crecimiento de plantas de la Universidad de Massey, Palmerston North (40°2'S, 175°4'E), Nueva Zelanda. Detalles del establecimiento del experimento pueden ser consultados en Zegbe *et al.* (2006). El experimento fue conducido de julio a diciembre de 2001. Las semillas de tomate se sembraron el 31 de julio y plantas de 40 días de edad fueron trasplantadas como lo describió Zegbe *et al.* (2007).

Se aplicaron cuatro tratamientos de riego: tratamiento 1, riego completo diario como testigo (RC), donde ambos lados del sistema radical (SR) fueron irrigados adecuadamente; tratamiento 2, riego diario en un solo lado del SR con la mitad del volumen aplicado al RC (RPR₁); tratamiento 3,

Water potential of leaf (Ψ_{leaf}) and Ψ_{root} were measured using a Scholander pressure chamber (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, USA). Three replicates per treatment of mature plants were measured on 118 and 136 days after sowing (DAS).

The Ψ_{leaf} was measured on two leaflets before disturbing the plants for Ψ_{root} determinations. For measurement of Ψ_{root} , two root branches from two opposite sides (wetted and drying sides of PRD treatments) were selected. They were excised and carefully removed from the soil minimising root damage and placed in the pressure chamber. All water potential measurements were taken between 09:00 to 11:30 h for each sampling date.

The roots were approximately 25 cm long and had an average diameter of 1.44 ± 0.4 mm; when root damage was noticed, a new root was excised and measured. After Ψ_{leaf} determinations, stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), net photosynthetic rate (A), and photosynthetic photon flux (PPF) were measured with a portable photosynthesis system (LI-6200, Li-Cor Inc., Nebraska, USA) on two mature and exposed leaflets. At harvest, fruits were cut into halves and oven-dried at 85 °C to constant weight to determine their total dry weight.

The data were analysed by a completely randomised model using the ANOVA procedure of Statistical Analysis System software (SAS, 2001-2003). Treatment means were separated by multiple *t* tests at $p \leq 0.05$ and when *F* test of treatments was significant at $p \leq 0.05$. Means separation between wetted and drying part of root system for each PRD treatment was confirmed by orthogonal contrasts. There were 48 plants in the experiment with 24 being used for measurements three replicated plants were sampled.

Volumetric soil water content (θ) was significantly higher in FI plants than in DI and PRD plants (Table 1). The difference in θ between the wet and drying sides of RS in PRD₁ plants was also significant. But θ was the same in the wet and drying side of the RS in PRD₂ plants being similar to that of DI plants (Table 1). After re-watering, θ was still lower in PRD and DI treatments than in FI. We used a potting mixture composed of bark: pumice: peat with a ratio of 6:2:1. Complete re-hydration of this mixture did not occur upon re-watering possibly due to hysteresis as defined by Brady and Weil (2000); this has also been observed in other PRD experiments in tomato (Kirda *et al.*, 2004; Zegbe *et al.*, 2006 and 2007) and in apple (Zegbe *et al.*, 2008).

riego completo cada tercer día en ambos lados del SR (RD); y tratamiento 4, riego cada tercer día en un lado del SR con la mitad del volumen aplicado al RC (RPR₂). El diseño, manejo del riego y la determinación del contenido volumétrico del agua en el suelo están detalladas en Zegbe *et al.* (2006; 2007).

El potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja}) y la raíz ($\Psi_{\text{raíz}}$) fueron medidos usando una bomba de presión tipo Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, USA). Tres repeticiones de plantas adultas por tratamiento se midieron a los 118 y 136 días después de la siembra (DDS).

El Ψ_{hoja} se midió en dos folíolos antes de disturbar las plantas para medir el $\Psi_{\text{raíz}}$; para la determinación del $\Psi_{\text{raíz}}$ se seleccionaron dos raíces laterales de lados opuestos (lado húmedo y seco de los tratamientos con RPR). Las raíces fueron desprendidas y cuidadosamente extraídas del suelo minimizando daños a éstas y luego colocadas en la cámara de presión. Todas las mediciones de potencial hídrico fueron tomadas entre las 9:00 y 11:30 h en cada fecha de muestreo.

Las raíces tuvieron una longitud de 25 cm y un promedio de diámetro de 1.44 ± 0.4 mm; cuando se notó algún daño en la raíz, una nueva raíz fue desprendida y medida. Después de las determinaciones del Ψ_{hoja} , la conductancia estomática (g_s), transpiración (E), fotosíntesis (A) y el flujo de fotones fotosintéticos (FFF), fueron medidos con un sistema portátil de fotosíntesis (LI-6200, Li-Cor Inc., Nebraska, USA), en dos folíolos maduros y expuestos a la radiación solar. En cada fecha de muestreo, los frutos fueron cortados en mitades y secados en estufa a 85 °C a peso constante para determinar el peso seco total de la fruta.

Los datos fueron analizados en un modelo completamente aleatorio usando el procedimiento ANOVA del sistema de análisis estadístico (SAS, 2001-2003). Las medias de tratamiento fueron separadas por la prueba múltiple de *t* con $p \leq 0.05$ y cuando la prueba de *F* fue significativa con $p \leq 0.05$. La separación de medias entre la parte húmeda y seca del sistema radical fueron confirmadas por contrastes ortogonales. En total hubo 48 plantas en el experimento donde 24 plantas fueron utilizadas para estas mediciones.

El contenido volumétrico del agua en el suelo (θ), fue significativamente mayor en las plantas con RC que en plantas con RD y RPR (Cuadro 1). La diferencia en θ entre los lados húmedos y secos del SR de las plantas con RPR₁ fue también significativa. Pero estadísticamente la θ fue el

Table 1. Effect of irrigation treatments on some variables of soil and plant.
Cuadro 1. Efecto de tratamientos de riego en algunas variables de suelo y planta.

Treatments	θ (m ³ m ⁻³)	Ψ_{root} (MPa)	Ψ_{leaf} (MPa)	g_s (mol m ⁻² s ⁻¹)	E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	A ($\mu\text{mol CO}_2$ m ⁻² s ⁻¹)
118 days after sowing						
FI	0.15 a	-0.23 a	-0.62 a	1.3 a	7.9 a	6.1 a
PRD ₁ -Wet	0.12 b	-0.18 a	-0.72 a	1.2 a	8.9 a	7.1 a
PRD ₁ -Drying	0.06 c	-0.29 a				
DI	0.02 d	-0.31 a	-0.86 a	1 a	8.4 a	7.2 a
PRD ₂ -Wet	0.06 d	-0.59 b	-1.17 b	0.5 b	6.2 b	4.3 b
PRD ₂ -Drying	0 d	-0.61 b				
PPF	470 ±70.4					
136 days after sowing						
FI	0.16 a	-0.13 a	-0.62 a	4.1 a	19.5 a	11.2 a
PRD ₁ -Wet	0.17 a	-0.26 ab	-0.62 a	2.9 ab	16.6 a	7.7 ab
PRD ₁ -Drying	0.05 b	-0.34 ab				
DI	0.09 c	-0.47 bc	-0.73 ab	2.6 ab	16.1 a	7.1 b
PRD ₂ -Wet	0.04 c	-0.48 bc	-0.91 b	1.6 b	16 a	4.6 b
PRD ₂ -Drying	0 c	-0.65 c				
PPF	867 ±75.3					

θ = volumetric soil water content; Ψ_{root} = root water potential; Ψ_{leaf} = leaf water potential; g_s = stomatal conductance; E= transpiration; A= net photosynthetic rate; PPF= photosynthetic photon flux; ±= standard deviation. Different letters within columns indicate significant differences by LSD Fisher's test at $p \leq 0.05$.

On 118 and 136 days after sowing (DAS), Ψ_{root} tended to be lower in DI and in the drying side of PRD₁ plants than that of FI plants (Table 1). Both sides of the RS in PRD₂ had a significantly lower Ψ_{root} than that of FI and PRD₁ treatments. Ψ_{root} of PRD plants tended to be lower in drying side than in the wetted side of the RS, but the difference was not significant using the orthogonal contrast analysis ($p \leq 0.05$). On both sampling dates, plants in PRD₂ (which was the most water stressed treatment) had the lowest Ψ_{leaf} , g_s , E, and A of all the treatments (Table 1).

On 118 DAS; g_s , E, and A were the same in DI, PRD₁, and FI plants. This was due to low solar radiation at measurement time (Behboudian *et al.*, 1994). Radiation was twice higher on 136 DAS than on 118 DAS and in the former day, compared to the FI plants, DI and PRD₂ plants had a lower Ψ_{leaf} accompanied by a reduction in g_s , E, and A (Table 1). The PRD₁ plants had the same Ψ_{leaf} as FI plants suggesting that Ψ_{leaf} of PRD₁ plants must have equilibrated with the irrigated part of RS (Green *et al.*, 2006; Skaggs *et al.*, 2006). But reductions of g_s by 30%, E by 15%, and A by 31% (opposite to Tan *et al.*, 1981) could be due to signals produced in non irrigated RS (Dry *et al.*, 2000).

mismo en el lado húmedo y seco del SR en las plantas con RPR₂ siendo similar al observado en plantas con RD (Cuadro 1). Después de volver a regar la θ continuó siendo bajo en los tratamientos con RPR y RD que en RC. Se utilizó un medio de cultivo compuesto por corteza de árbol, piedra pómez y turba en una proporción de 6:2:1 respectivamente. No se observó una rehidratación completa del medio de cultivo después de volver a regar, debido posiblemente a un efecto histerético del suelo descrito por Brady y Weil (2000). Este fenómeno ha sido también observado en otros experimentos con tomate (Kirida *et al.*, 2004; Zegbe *et al.*, 2006; 2007) y con manzano (Zegbe *et al.*, 2008).

A 118 y 136 días después de la siembra (DDS), el Ψ_{raiz} tendió a ser bajo en las plantas con RD y el lado seco de las plantas con RPR₁ que aquél en plantas con RC (Cuadro 1). En ambos lados del SR de las plantas con RPR₂ el Ψ_{raiz} fue significativamente bajo que el observado en los tratamientos con RC y RPR₁. El Ψ_{raiz} de las plantas con RPR tendió a ser bajo en el lado seco que en el lado húmedo del SR, pero la diferencia no fue significativa de acuerdo con el análisis de contrastes ortogonales ($p < 0.05$). En ambas fechas de muestreo de todos los tratamientos, las plantas

This result is compatible with the assumption that PRD treatment maintains a higher Ψ_{leaf} and dry mass of fruit (DMF) than DI treatments even if both are being irrigated with the same amount of water. The DMF values in this experiment (LSD= 89.7 g) were 452.3, 425.2, 291.7, and 217.2 for FI, PRD₁, DI, and PRD₂, respectively. PRD₁ will therefore be a better reduced irrigation strategy to adopt.

In conclusion, Ψ_{root} for both sides of RS were the same for PRD treatment and Ψ_{leaf} in less severe PRD treatment (PRD₁) equilibrated with wet side of the RS being the same as fully watered controls. Any aberrations in the physiological properties of PRD₁ could have resulted from root signals.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially supported by the Secretaría de Educación Pública (SEP)-PROMEP-México; Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ); Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en México. We thank Jorge Omar and Miriam Zegbe for their help and support.

LITERATURE CITED

- Behboudian, M. H.; Lawes, G. S. and Griffiths, K. M. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd). *Scientia Hort.* 60:89-99.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 2000. Elements of the nature and properties of soil. Prentice-Hall Inc. New Jersey, USA. 559 p.
- Dry, P. R.; Loveys, B. R. and Düring, H. 2000. Partial drying of the rootzone of grape. II Changes in the pattern of root development. *Vitis*. 39:9-12.
- Gee, G. W.; Liu, W.; Olgang, H. and Janes, B. E. 1974. Use of pressure bomb measurements to estimate root water potentials. *Agron. J.* 66:75-78.
- Green, S. R.; Kirkham, M. B. and Clothier, B. E. 2006. Roots uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agric. Water Manage.* 86:165-176.

con RPR₂ (tratamiento con el mayor grado de déficit hídrico) registraron los valores más bajos de Ψ_{hoja} , g_s , E y A (Cuadro 1).

A 118 DDS; g_s , E y A, fueron iguales en las plantas con RD, RPR₁ y RC. Esto se debió a una baja radiación solar al momento de tomar las mediciones (Behboudian *et al.*, 1994). La radiación fue dos veces más alta a los 136 DDS que a los 118 DDS y en ese día, en comparación con plantas bajo RC, las plantas con RD y RPR₂ tuvieron un bajo Ψ_{hoja} acompañado con una reducción en g_s , E y A (Cuadro 1). Las plantas con RPR₁ y RC registraron el mismo Ψ_{hoja} sugiriendo que el Ψ_{hoja} de las plantas con RPR₁ debió equilibrarse con la parte irrigada del SR (Green *et al.*, 2006; Skaggs *et al.*, 2006). Sin embargo, las reducciones de g_s en 30%, E en 15% y A en 31% contrario a Tan *et al.* (1981), pudo ser debido a señales producidas en la parte no irrigada del SR (Dry *et al.*, 2000).

Este resultado es coincidente con la hipótesis que el tratamiento de RPR mantiene Ψ_{hoja} y un peso seco de la fruta (PSF) más altos que el tratamiento con RD, aún cuando ambos hayan sido irrigados con la misma cantidad de agua. Los valores del PSF en este experimento (DMS= 89.7 g) fueron 452.3, 425.2, 291.7, y 217.2 para el RC, RPR₁, RD y RPR₂, respectivamente. Por consiguiente, el RPR₁ sería una mejor estrategia de riego reducido para adoptarse.

En conclusión, el Ψ_{raiz} en ambos lados del SR fueron iguales en los tratamientos con RPR y el Ψ_{hoja} en el tratamiento con RPR₁ se equilibró con el lado húmedo del SR, siendo igual a las plantas testigo con riego completo. Cualquier alteración en las variables fisiológicas del RPR₁, se debió al resultado de señales enviadas desde la raíz.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada parcialmente por la SEP-PROMEP; Universidad Autónoma de Zacatecas; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en México. Agradecemos a Jorge Omar y Miriam Zegbe por su ayuda y apoyo.

Fin de la versión en español



- Kirda, C.; Cetin, M.; Dasgan, Y.; Topcu, S.; Kaman, H.; Ekici, B.; Derici, M. R. and Ozguven, A. I. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 69:191-201.
- Poni, S.; Tagliavini, M.; Neri, D.; Scudellari, D. and Toselli, M. 1992. Influence of root pruning and water stress on growth and physiological factors of potted apple, grape, peach and pear trees. *Sci. Hortic.* 52:223-236.
- Skaggs, T. H.; Van Genuchten, M. Th.; Shouse, P. J. and Poss, J. A. 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agric. Water Manage.* 86:140-149.
- Smart, D. R.; Carlisle, E.; Goebel, M. and Nuñez, B. A. 2005. Transverse hydraulic redistribution by grapevines. *Plant Cell Environ.* 28:157-166.
- Statistical Analysis System (SAS). 2001-2003. SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA.
- Stedle, E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *J. Exp. Bot.* 51:1531-1542.
- Stoll, M.; Loveys, B. and Dry, P. 2000. Hormonal changes induced by partial root zone drying of irrigated grapevines. *J. Exp. Bot.* 51:1627-1634.
- Tan, C. S.; Cornelisse, A. and Buttery, B. R. 1981. Transpiration, stomatal conductance, and photosynthesis of tomato plants with various proportions of root system supplied with water. *J. Amer. Soc. Hortic. Sci.* 106:147-151.
- Zegbe, J. A.; Behboudian, M. H. and Clothier, B. E. 2006. Responses of 'Petopride' processing tomato to partial root zone drying at different phenological stages. *Irrig. Sci.* 24:203-210.
- Zegbe, J. A.; Behboudian, M. H. and Clothier, B. E. 2007. Response of tomato to partial root zone drying and deficit irrigation. *Rev. Fitotec. Mex.* 30:125-131.
- Zegbe, J. A.; Behboudian, M. H.; Clothier, B. E. and Lang, A. 2008. Postharvest performance of cv. 'Pacific RoseTM', apple grown under partial root zone drying. *HortScience.* 43:952-954.