

MANEJO DEL RIEGO EN PERA (*Pyrus communis*) cv. WILLIAMS CULTIVADA EN SUELO CON CAPA FREÁTICA POCO PROFUNDA

IRRIGATION MANAGEMENT IN PEAR (*Pyrus communis*) cv. WILLIAMS GROWN IN SOIL WITH A SHALLOW WATER TABLE

Juan Oreste Galeazzi^{1*} y María Cristina Aruani¹

¹ Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Facultad de Ciencias Agrarias, Ruta 151, km 12,5, Cinco Saltos, (C.P. 8303) Río Negro, Argentina. 54 0299 4980005.

*Autor de contacto E-mail: juan.galeazzi@faca.uncoma.edu.ar

RESUMEN

El Alto Valle de Río Negro y Neuquén es una zona de producción frutícola intensiva bajo riego. La presencia de una capa freática poco profunda modifica los contenidos de humedad en el perfil del suelo. El objetivo fue establecer una programación del manejo del riego para pera (*Pyrus communis*) cv. Williams en suelos no salinos con capa freática poco profunda y comparar con el manejo que realiza el productor. Durante tres ciclos consecutivos del cultivo se midieron con sensores la humedad del suelo a tres profundidades y los niveles freáticos. Se cuantificó el flujo capilar por el programa UPflow. Con el programa WinIsareg se realizó un balance hídrico y programación de riegos sin restricciones y en condiciones óptimas de humedad para el cultivo. Se ajustó el balance hídrico al contenido de humedad del suelo registrado por los sensores, producto de los riegos y la influencia de una capa freática poco profunda. La capa freática osciló entre 0,70 m y 1,30 m de profundidad. El flujo capilar varió entre 1,0 mm día⁻¹ a 5,2 mm día⁻¹. La lámina evapotranspirada calculada con WinIsareg fue de 1098 mm con una programación de catorce riegos. La lámina de reposición fue de 409 mm debido a que el aporte capilar compensó el 63% de la evapotranspiración disminuyendo la dotación media de riego de 0,71 L s⁻¹ ha⁻¹ a 0,26 L s⁻¹ ha⁻¹. Los programas WinIsareg y UPflow resultaron herramientas prácticas y confiables para ajustar la programación del riego en presencia de capa freática poco profunda.

Palabras clave: modelos hidrológicos, flujo capilar, programación del riego.

ABSTRACT

The Rio Negro and Neuquén Upper Valley is an intensive fruit producing area under irrigation. The presence of a shallow water table modifies water content in the soil profile. The aim of this trial was to develop an irrigation scheduling program for 'Williams' pears grown on a non-saline soil with a shallow water table, and to compare this management program to the conventional management system applied by the grower. Soil water content was determined during three consecutive crop cycles using sensors; measurements were made at three depths and water tables. The capillary flow was determined using UPflow software. The water balance and irrigation program were performed using WinIsareg software, considering no water restrictions and optimum soil moisture conditions for the crop. The water balance was adjusted to the soil water content recorded by the sensors, resulting from the irrigations performed and the influence of a shallow water table. The water table level fluctuated between 0.70 m and 1.30 m depth. The capillary flow ranged from 1.0 mm day⁻¹ to

5.2 mm day⁻¹. The cumulative evapotranspiration (ET_m) calculated with WinIsareg was 1098 mm with a scheduling program of fourteen irrigations. The net irrigation depth was 409 mm because the capillary contribution balanced 63% of the ET_m, decreasing the average water use from 0.71 L s⁻¹ ha⁻¹ to 0.26 L s⁻¹ ha. WinIsareg and UPflow softwares proved to be reliable to adjust an irrigation scheduling program under shallow water table conditions.

Key words: hydrological models, capillary flux, irrigation scheduling

INTRODUCCIÓN

El Alto Valle de Río Negro y Neuquén es una zona agrícola frutícola intensiva por excelencia que depende exclusivamente del riego. La mayor producción se centra en manzanas (*Pyrus malus* L.) y peras (*Pyrus communis* L.). La superficie implantada con frutales en la Región Patagonia Norte es de 50.993 hectáreas, de las cuales Río Negro participa con el 85% del total de la superficie implantada y Neuquén con el 15% restante (Senasa, 2015).

La fruta es considerada un producto primario para la alimentación, y para lograr las condiciones demandadas por los consumidores de mercados internacionales y nacionales, requiere de una importante interrelación entre los sectores productivos, industriales y de servicios. En lo productivo juegan un rol importante las condiciones ambientales y el suelo. El suelo influye a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Un componente importante a tener en cuenta en los suelos es la presencia de la capa freática, muy común en Alto Valle Río Negro (Galeazzi et al., 2007; Montenegro et al., 2014). La principal variable que define la influencia de la capa freática sobre los cultivos es su profundidad, ya que las raíces absorben el agua directamente de la misma o de la franja capilar (Soppe and Ayars, 2003; Ali et al. 2013). En las regiones áridas y semiáridas es importante tener en cuenta el agua subterránea poco profunda, ya que puede ser considerada como un potencial recurso hídrico para los cultivos (Sepaskhah et al., 2003). Al incorporar este recurso en la programación de los riegos se lograría disminuir la cantidad de riegos a aplicar (Soppe and Ayars, 2003). Shaozhong et al. (2002) comprobaron en Australia que reduciendo el contenido de agua en la zona de raíces, en condiciones de capa freática poco profunda, se logra ahorrar agua sin reducir el rendimiento del cultivo de pera. Comprender y cuantificar la relación profundidad freática y aporte capilar en los suelos de Alto Valle es la clave para incorporar el componente freático en la toma de decisiones en el uso eficiente de los recursos hídricos.

Los modelos hidrológicos de simulación pueden ser utilizados para planificar programas de riego que tiendan a mejorar la eficiencia de aplicación y contribuir al ahorro de agua (Luo and

Sophocleous, 2010). Sin embargo, requieren la validación a las condiciones del sitio donde se van a implementar (Pereira et al., 2003). El programa WinIsareg (Pereira et al. 2003) permite calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o), parametrizar el cultivo y simular el balance hídrico en la zona de exploración radicular. Este modelo ha sido utilizado en varias regiones tales como Valle de Sorraia, Portugal, en la llanura norte de China, Lujan de Cuyo, Mendoza, Argentina, y para varios cultivos hortícolas y frutícolas, contrastando valores simulados de humedad en el suelo con mediciones realizadas a campo (Zairi et al., 2003; Cancela et al., 2006). Chaterlan et al. (2010) calcularon las necesidades de riego para cultivos hortícolas modificando los coeficientes de cultivo (K_c) y obtuvieron un buen ajuste entre los valores de humedad observados a campo y las predicciones del modelo. El programa WinIsareg ha sido diseñado para seleccionar y evaluar programas de riego alternativos y su aplicación en la práctica de campo (Teixeira and Pereira, 1992; Liu et al., 1998).

El programa Upflow (Raes and De Proost, 2003) estima la cantidad de agua que podría moverse en el perfil del suelo desde la capa freática a la superficie del suelo dependiendo de las condiciones ambientales (Raes, 2009). El programa calcula en condiciones de estado estacionario el flujo de agua en equilibrio con la demanda evapotranspiratoria y el contenido de agua en el horizonte superficial del suelo; además considera la tasa de absorción de agua por las raíces. Combinando el uso de los modelos WinIsareg y Upflow, se puede estimar y cuantificar el aporte capilar, la lámina complementaria de riego y el número de riegos a realizar.

El objetivo de este estudio fue establecer una programación del manejo del riego para un cultivo de pera cv. Williams en suelos no salinos con presencia de capa freática poco profunda y comparar con el manejo que realiza el productor.

MATERIALES Y METODOS

Características del sitio

El estudio se llevó a cabo en una parcela de 1 ha, de un huerto comercial, implantado con pera (*Pyrus communis* L.) cv. Williams, conducido en espaldera en un marco de plantación de 4 m

x 2 m (1200 pl ha⁻¹), ubicada a 38°51'11,38" S y 68°2'39,30 O. El período considerado fueron tres ciclos productivos 2013-2014; 2014-2015 y 2015-2016, que se extendieron desde octubre a marzo inclusive. El riego fue por gravedad en melgas de 8 m x 100 m delimitadas por bordos y sin desagüe al pie. La técnica del manejo del riego del establecimiento utilizó caudales entre 30-35 L s⁻¹ con una duración del riego de 11 hs y una infiltración básica entre 6-8 mm h⁻¹.

El material originario del suelo es aluvial, el régimen de humedad corresponde al arídico y el de temperatura es térmico, lo que reflejan las condiciones de déficit hídrico durante todo el año (CIL, 1991). La precipitación media anual del período 2013 a 2016 fue de 317 mm, la temperatura máxima fue de 22°C y la mínima de 6,6°C. En la Tabla 1 se consignan los valores de precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o) correspondiente a los ciclos del cultivo. Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue (38°50'41" S; 68°04'09" O) a 282 msnm, ubicada a 2400 m de la parcela en estudio.

El suelo es de textura franco arcillo limosa en superficie y franco limosa hacia la profundidad, con presencia de capa freática poco profunda, clasificado como Acuicambid típico familia limosa fina, moderadamente bien drenado (Soil Survey Staff, 2014). El espacio entre las hileras de plantas presentó una cobertura de vegetación espontánea compuesta de *Cynodon dactylon* 80%, *Cichorium intybus* 10%, *Trifolium repens* 5 %, *Plantago lanceolata* 5%.

Se colocaron seis (6) sensores (Decagon modelo ECH₂O EC-5, Decagon Devices, Pullman, Washington, USA) para determinar el contenido de humedad del perfil del suelo. Estos fueron ubicados entre dos plantas, sobre la hilera de plan-

tación a 0,20, 0,40 y 0,60 m de profundidad y un sensor específico (Decagon modelo CTD), para medir la profundidad y salinidad de la capa freática durante los ciclos productivos considerados. Los sensores fueron controlados y calibrados en el laboratorio antes de su colocación. Además, los valores de humedad obtenidos de los sensores a campo fueron controlados por el método gravimétrico a través de muestreos periódicos de suelo, tomados con barreno en diferentes sectores del cultivo. Los datos almacenados en el datalogger fueron transformados en 18 promedios decada-rios en correspondencia con los datos disponibles de la evapotranspiración de referencia (ET_o) calculada según Penman Monteith (Montenegro et al., 2017).

Para cada horizonte del suelo se determinaron en laboratorio las constantes hidrofísicas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), las curvas de retención hídrica sobre cinco (5) muestras disturbadas (Richards 1956) y la densidad aparente (método del cilindro). Se realizó el ajuste de la curva de retención hídrica con el modelo Van Genuchten-Mualen ($m = 1-1/n$, programa RETC) (Van Genuchten, 1991). Los parámetros del modelo a ajustar fueron: inversa del potencial de entrada de aire $\alpha = 0,0049$, distribución de tamaño de poros $\lambda = -0,292$ y parámetro empírico que afecta la forma de la curva de retención $n = 1,67$.

El nivel de agotamiento permisible del agua en el suelo (NAP) se determinó teniendo en cuenta las fases de desarrollo del cultivo y la correspondiente evapotranspiración (Allen et al., 2006) fluctuando entre 30% y 50% del agua útil total (CC-PMP). El agua fácilmente aprovechable (AFA) se definió como el contenido de humedad entre CC y el NAP, y está en equilibrio con la evapotranspiración máxima del cultivo (ET_m), es decir sin stress hídrico para la planta.

Tabla 1. Registro de precipitaciones y evapotranspiración de referencia (ET_o) de los ciclos 2013 al 2016.

Table 1. Average rainfall and reference evapotranspiration (ET_o) of the cycles 2013 - 2016.

Meses	Registro de precipitaciones (mm)			ET _o (mm)		
	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2013-2014	2014-2015	2015-2016
Septiembre	16,8	25,4	19,0	84,0	90,0	84,0
Octubre	40,4	51,6	16,6	120,9	114,7	108,5
Noviembre	0,2	9,4	2,4	138,0	147,0	159,0
Diciembre	0,2	8,8	0,4	195,3	170,5	176,7
Enero	0	5,2	21,8	179,8	186,0	155,0
Febrero	3,2	8,0	17,8	128,8	134,4	128,8
Marzo	0,4	0,4	4,0	108,5	117,8	102,3
Total	61,2	108,8	82,0	955,3	960,4	914,3

Se determinó profundidad de enraizamiento colocando en el perfil del suelo un cuadrante de 1 m x 1 m dividido en cuadrículas de 10 cm x 10 cm. La distribución de raíces dentro de cada cuadrícula fue mapeada después de remover una capa delgada de suelo, para poner al descubierto las raíces del cultivo de pera. Se cuantificaron raíces menores a 2 mm y entre 2 a 5 mm (Aruani, 2009). Los porcentajes de raíces a diferentes profundidades se utilizaron para obtener un factor de ponderación a efectos de calcular el valor medio del contenido de humedad en el perfil del suelo en cada una de las 18 décadas. Los potenciales mátricos correspondiente a dichas humedades se obtuvieron utilizando las curvas de retención hídrica.

Al momento de cosecha, se recolectó el total de frutos de cinco (5) árboles seleccionados al azar en cada ciclo. Se pesaron todos los frutos para determinar el rendimiento total y se expresó en t ha^{-1} .

Programa Upflow

Se utilizó el Programa Upflow v 3.2 (Raes, 2009) para cuantificar el flujo capilar (q) expresado en mm día^{-1} . Los datos de entrada al modelo fueron:

a) datos del cultivo: demanda evapotranspiratoria media del período considerado (decadarios) y parámetros de extracción del agua en el suelo por parte del cultivo. La tasa de extracción de agua por las raíces (S_{max}) es asumida por el modelo teniendo en cuenta el tipo de cultivo y profundidad de raíces.

b) datos de suelo: textura, conductividad hidráulica saturada de la capa subsuperficial y contenido de humedad del horizonte superficial del suelo. El modelo Upflow selecciona a partir de la textura del suelo la curva de retención hídrica o los parámetros de Van Genuchten. Los cálculos y procedimientos se basaron en las soluciones presentadas por el modelo Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1991) para las propiedades hidráulicas de los suelos y para el flujo capilar ascendente el procedimiento de De Laat (1980) en régimen permanente o estacionario.

Los valores de la conductividad saturada del suelo (K_s) fueron obtenidos del Estudio Integral del Río Negro (CIL, 1991), determinados por el método Auger Hole (Ernst, 1950), el método inverso del sondeo y por el método del infiltrómetro del cilindro.

c) profundidad de la capa freática.

Ascenso capilar

Se calculó el ascenso capilar a partir de la Ley de Darcy para la zona no-saturada. Si bien el movimiento del agua en la zona no-saturada es

variable el cálculo del ascenso se simplificó asumiendo flujo constante o estacionario en períodos cortos de tiempo. Por lo tanto la ecuación utilizada fue:

$$q = -K_{(\theta)} \left[\frac{h_2 - h_1}{z_2 - z_1} + 1 \right] \quad (1)$$

dónde: q es el flujo capilar (m día^{-1}), $K_{(\theta)}$ es la conductividad hidráulica no saturada (m día^{-1}), h es el potencial del agua en el suelo y z es el ascenso capilar, ambos expresados en metros.

La conductividad hidráulica no saturada $K_{(\theta)}$ está en función del contenido de humedad del suelo y a su vez éste es una función de la tensión expresada en altura de la columna de agua, según el modelo desarrollado por Van Genuchten (1980):

$$K(\theta) = \frac{\left[(1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1} \right]^2}{\left[1 + |\alpha h|^n \right]^{m(\lambda+2)}} * K_s \quad (2)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (-)$$

dónde: K_s es la conductividad saturada (m s^{-1}); h es la tensión de agua en el suelo (m); α , λ , y n son parámetros físicos adimensionales según el tipo de suelo (Wösten et al., 2001).

Se calculó el ascenso capilar (z) utilizando la ecuación 1. Con los valores de tensión del agua en el suelo (h) que fueron obtenidos de las curvas de retención hídrica, los valores de velocidad de flujo (q) obtenidos por el modelo Upflow y la conductividad hidráulica no saturada obtenida a partir de la ecuación 2, se graficaron las curvas para un suelo franco limoso. Teniendo en cuenta la profundidad de la capa freática y el ascenso capilar (z) calculado, se estimó la profundidad a la que llegó el límite superior de la franja capilar a lo largo del ciclo del cultivo.

Programa WinIsareg

Se utilizó el programa WinIsareg v 1.3.1 (Pereira et al., 2003) para determinar el balance hídrico y programación de riego. Los datos de entrada que utilizó el programa fueron: la ETo con un 90% de probabilidad de ocurrencia calculada por Montenegro et al. (2017); variables de suelo: textura, CC y PMP, y variables de cultivo: coeficiente de cultivo (K_c) correspondiente a cada fase de desarrollo, profundidad de enraizamiento y NAP. Las fases del cultivo consideradas fueron: brotación-floración que se extendió desde la tercera década de septiembre a la segunda de octubre; la fase de crecimiento del fruto que se extendió hasta la segunda década de diciembre; la fase de pleno desarrollo del fruto y cosecha

hasta la última de febrero, y finalmente la fase de senescencia desde marzo hasta fines de abril (Requena, 2001). Este programa además permitió la entrada de datos medidos del contenido de humedad del suelo.

El WinIsareg se utilizó en tres escenarios característicos: a) balance hídrico y programación del riego en condiciones óptimas para el cultivo, sin restricciones, b) balance hídrico en condiciones reales del sitio con presencia de capa freática poco profunda, y c) ajuste de la programación del riego en condiciones reales.

a) Condiciones óptimas

Se realizó un balance hídrico en condiciones óptimas, es decir sin restricciones hídricas para el desarrollo del cultivo, utilizando la ETo (Montenegro et al., 2017) y coeficientes de cultivo (Kc) obtenidos localmente en lisímetros (Requena, 2016). Como resultado se obtuvo la ETm con un 90% de probabilidad de ocurrencia, cantidad de riegos, fecha de realización, lámina neta de aplicación de cada riego y dotación máxima.

b) Condiciones reales.

En este balance hídrico se siguió un procedimiento iterativo que minimice las diferencias en el contenido de agua en el suelo entre los valores calculados y los medidos por los sensores durante el ciclo del cultivo. El grado de asociación entre estos valores fue calculado mediante el coeficiente de correlación (ρ) y el coeficiente de variación del error (RMSE) que mide la bondad del ajuste. Esto se logró ajustando los coeficientes de cultivo (K_c) y los NAP. Estos Kc están en equilibrio con el estado actual de la humedad del suelo. Para esta simulación también se consideraron los riegos realizados por el productor y los valores medios de humedad del suelo ponderados por el porcentual de raíces según profundidad. El balance hídrico obtenido correspondió al promedio de los tres ciclos productivos.

C) Ajuste de la programación

Con los Kc obtenidos en el inciso b se simuló la programación de riegos con la condición que el

contenido de humedad del suelo durante el ciclo de cultivo se encuentre siempre dentro del AFA. Se obtuvo la evapotranspiración actual, la cantidad de riegos, fecha de realización, lámina neta de aplicación de cada riego y dotaciones de riego media y máxima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de humedad obtenidos por los sensores en condiciones de campo se correlacionaron positivamente con los valores medidos por el método gravimétrico ($r = 0,75$; $p < 0,05$; $n = 10$). Los valores medios de humedad registrados por los sensores, correspondientes a los tres ciclos fueron: a 0,20 m de profundidad 28,8 m³/m³ con una desviación estándar (σ) de 2,62; a 0,40 m 36,5 m³/m³ con un σ de 2,58 y a 0,60 m 43,8 m³/m³ y σ de 1,85. Los valores de salinidad de la capa freática no variaron significativamente entre los ciclos por lo tanto el promedio fue de 1,6 dS m⁻¹, fluctuando entre 0,9 dS m⁻¹ como mínimo y 2,2 dS m⁻¹ como máximo.

Los valores de las constantes hidrofísicas y de los diferentes niveles de agotamiento permisible del agua en el suelo (NAP) se detallan en la Tabla 2. Los contenidos de agua del suelo a CC y PMP son similares en todo el perfil, lo que demuestra su homogeneidad. Los porcentajes de humedad a los diferentes niveles críticos del agua útil (NAP) correspondieron a los períodos de mínima, media y máxima evapotranspiración del cultivo, fueron en las fases de brotación-floración y senescencia del 50%, y en las fases de crecimiento del fruto, pleno desarrollo del fruto y cosecha entre el 40% y 30%, respectivamente.

Los contenidos de humedad promedios decadiarios a diferentes profundidades se visualizan en la Fig. 1. En la profundidad de 0,20 m el contenido de humedad del suelo se encontró dentro del agua fácilmente aprovechable desde el inicio del ciclo hasta la segunda década de noviembre. Los altos contenidos de humedad en el suelo a comienzo del ciclo se debieron a la entrada de agua por las precipitaciones ocurridas a fines de setiembre y principio de octubre que oscilaron

Tabla 2. Contenidos de agua volumétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP) y niveles permisibles del agua en el suelo (NAP).

Table 2. Volumetric water content at field capacity (CC), wilting point (PMP), and acceptable levels of water depletion in the soil (NAP).

Profundidad (m)	CC (%)	PMP (%)	Densidad aparente (mg m ⁻³)	NAP 50%	NAP 40%	NAP 30%
0,20	40,5	18,9	1,35	29,7	31,9	34,0
0,40	39,8	15,2	1,43	27,5	29,9	32,3
0,60	39,8	15,2	1,43	27,5	29,9	32,3

entre 30 y 50 mm y a las prácticas generalizadas de control de heladas tardías primaverales mediante riegos por inundación y/o aspersión (Tassara, 2005). En lo que resta del ciclo el contenido de humedad se encontró siempre por debajo del NAP a excepción del momento de cada riego. Los riegos realizados por el productor fueron seis distribuidos en las siguientes décadas: tercera de octubre, segunda de noviembre, primera y tercera de diciembre, segunda de enero y el último riego en la segunda década de marzo.

En la profundidad de 0,40 m el contenido de humedad del suelo fue algo mayor al de capacidad de campo desde el inicio del ciclo hasta la segunda década de noviembre coincidente con lo observado a 0,20 m. A partir de allí el contenido de humedad se encontró siempre por encima del NAP. Mientras que a 0,60 m de profundidad los niveles de humedad fueron muy superiores al de capacidad de campo durante todo el ciclo de cultivo, situación que se repitió en los tres ciclos estudiados. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Montenegro et al. (2014) en un cultivo de manzano en la zona de Alto Valle.

Para obtener el contenido de humedad promedio en la zona de raíces se utilizó un factor de ponderación que dependió del porcentaje de raíces. Las raíces activas del cultivo considerado se

encontraron dentro de los 0,70 m (Aruani, 2009) de las cuales, el 30% se distribuyó a 0,20 m de profundidad, el 32% se encontró a 0,40 m, el 23% a 0,60 m y el 15% restante a 0,70 m. Los potenciales mátricos correspondientes a dichos contenidos de humedad promedio fluctuaron entre 40 y 100 kPa en los meses de octubre a enero inclusive y se encontraron dentro del AFA. En los meses de febrero y marzo los potenciales oscilaron entre 130 y 150 kPa manifestando cierto grado de stress hídrico. Molina-Ochoa et al. (2015) determinaron que disminuyendo el potencial hídrico en la fase de crecimiento rápido del fruto a 101 kPa no se observaron diferencias significativas en los rendimientos.

Los niveles freáticos (NF) oscilaron entre 0,70 m y 1,30 m de profundidad (Fig. 2). La elevación más significativa de la capa freática se produjo en octubre debido a la reposición del agua en el suelo por riegos y las prácticas de control de heladas tardías (Tassara, 2005). Los niveles freáticos más profundos se observaron en la fase de cosecha consecuentemente con la disminución de los riegos, práctica que se realiza a fin de evitar que interfieran con dicha actividad. Estas fluctuaciones de la capa freática incidieron en el contenido de humedad del suelo (Fig. 2). Según FAO (1985) y experiencias locales (FCA UNCo-INTA) la pro-

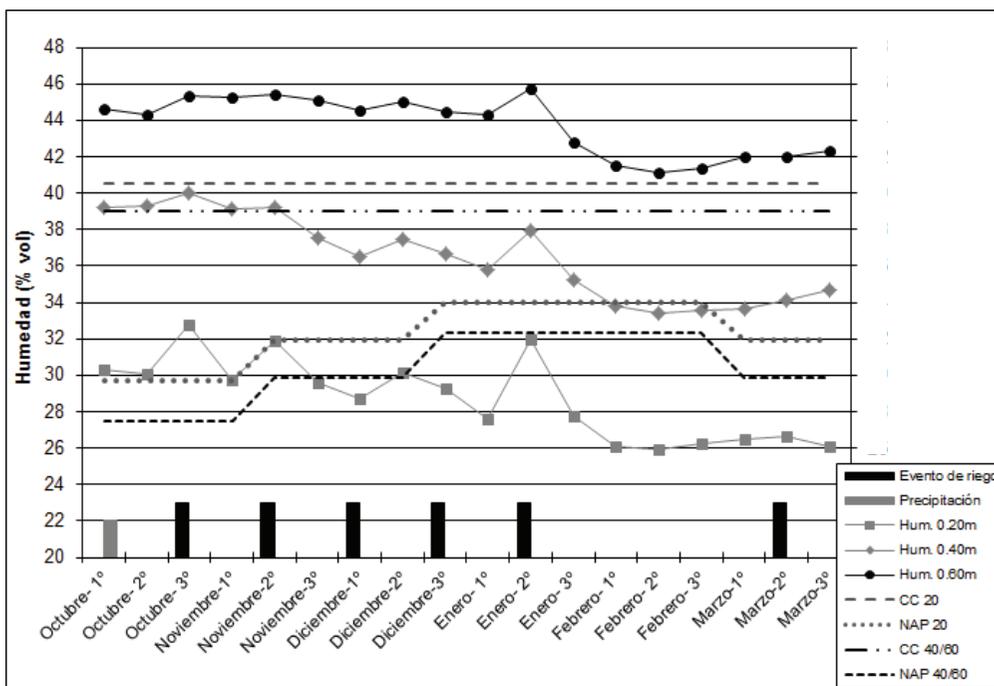


Fig. 1. Contenido de humedad promedios decadiarios a 0,20, 0,40 y 0,60 m de profundidad y niveles de agotamiento permisible (NAP).

Fig. 1. Water content average values over 10-day-periods at 0.20, 0.40 and 0.60 m depth and acceptable levels of water depletion in the soil (NAP).

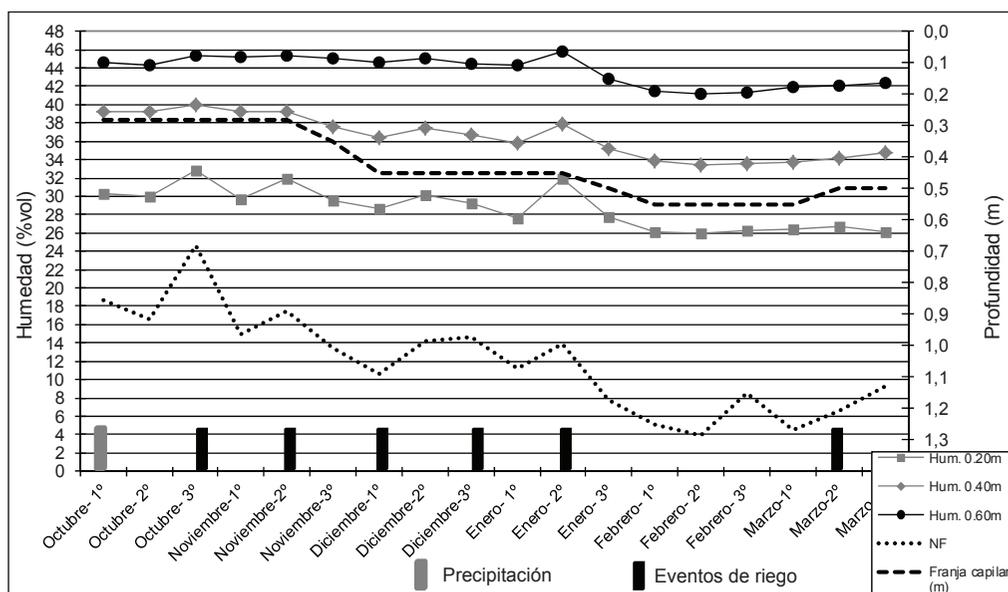


Fig. 2. Contenido de humedad promedio decadiario a 0,20, 0,40 y 0,60 m y profundidad de la capa freática y franja capilar.

Fig. 2. Water content average values over 10-day-periods at 0.20, 0.40 and 0.60 m depth, water table depth and capillary layer depth.

fundidad crítica del nivel freático para suelos de textura media y cultivos frutícolas oscila entre 1,40 – 1,60 m.

La magnitud del flujo capilar varía según la profundidad de la capa freática, la demanda evapotranspiratoria del cultivo y el contenido de humedad del horizonte superficial del suelo (Raes, 2009). En este estudio los valores de K_s variaron entre $0,6 \text{ m día}^{-1}$ a $1,0 \text{ m día}^{-1}$ para el horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente. El flujo capilar fue de $1,0 \text{ mm día}^{-1}$ y $2,2 \text{ mm día}^{-1}$ en octubre y entre $3,4 \text{ mm día}^{-1}$ y $5,2 \text{ mm día}^{-1}$ desde noviembre hasta marzo inclusive. El aporte total del flujo capilar en el período considerado fue de 677 mm.

La franja capilar, de espesor variable, es la zona por encima de la capa freática donde se mantienen las condiciones de casi saturación y va disminuyendo progresivamente hacia la superficie y puede abastecer parcial o totalmente la demanda evapotranspiratoria del cultivo (Grassi, 1998). En la Fig. 3 se observan las curvas que permitieron estimar la altura del ascenso capilar (z) para un suelo de textura franco limosa. Los valores de tensión del agua en el suelo (h) y del flujo capilar (q) corresponden a las variaciones estacionales medioambientales. El límite superior de la franja capilar a lo largo del ciclo del cultivo osciló entre 0,30 y 0,55 m de profundidad, estimado a partir de las mediciones de la profundidad de la capa freática y el ascenso capilar (z) (Fig. 2).

Durante el periodo considerado la franja capilar se encontró siempre por encima de 0,60 m de profundidad. En octubre y noviembre llegó hasta los 0,30 m de profundidad, consecuencia de los aportes de agua por precipitaciones y riegos. A partir de la tercera década de noviembre y hasta el final del ciclo la franja capilar se mantuvo entre los 0,40 y 0,55 m de profundidad. Estas fluctuaciones de la franja capilar están en correspondencia con los datos medidos por los sensores de humedad del suelo (Fig. 2).

Programa WinIsareg

En el cálculo del flujo y ascenso capilar fue imprescindible conocer la demanda evapotranspiratoria (ET_m) del cultivo. Con el programa WinIsareg se obtuvo dicha ET_m cuando se simuló el cálculo del balance hídrico y programación del riego en condiciones óptimas y sin restricciones. El coeficiente de cultivo (K_c) representa la demanda de agua y varía según las fases fenológicas (Allen et al., 2006). En este escenario planteado los K_c utilizados fueron 0,34 en la fase inicial del cultivo, 1,21 para el período estival de máxima evapotranspiración y en la fase final el K_c 1,10 (Requena, 2016). La lámina total evapotranspirada (ET_m) obtenida a partir del balance hídrico fue de 1098 mm y una programación resultante de 14 riegos (Fig. 4). La lámina neta de riego promedio fue de 78 mm, que correspondió a una dotación

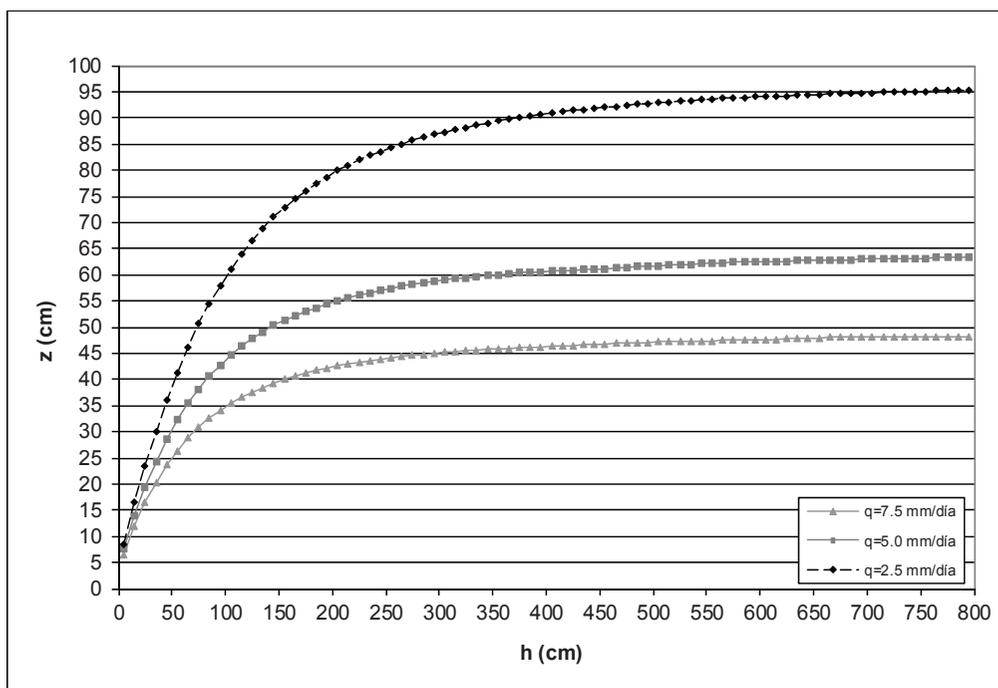


Fig. 3. Curvas de ascenso capilar (z) en función de la tensión del agua en el suelo (h) y de la velocidad del flujo capilar estacionario (q).

Fig. 3. Curves of capillary ascent (z) according to the tension of water in the soil (h) and speed of the stationary capillary flow (q).

media de $0,71 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y máxima de $0,98 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. En la zona de Alto Valle esta lámina de 1098 mm , es la lámina que evapotranspira un monte frutal de pera en plena producción sin restricciones para el desarrollo, con rendimiento estándar de 50 t ha^{-1} (Villarreal and Santagni, 2004).

En el cálculo del balance hídrico y programación del riego con presencia de capa freática poco profunda, escenario planteado en nuestro estudio, los valores de K_c utilizados en la calibración del modelo resultaron inferiores (Tabla 3) a los K_c experimentales correspondientes a un cultivo en condiciones de máximo rendimiento (Requena, 2016). Estos K_c menores se utilizaron para ajustar el balance hídrico simulado a los valores medidos de humedad promedio del suelo durante el ciclo de cultivo, logrando una correlación significativa ($r = 0,80$) con un coeficiente de variación del error de $3,5\%$ (Fig. 5). El balance hídrico simulado en estas condiciones reflejó las variaciones del contenido de humedad medidos por los sensores a diferentes profundidades del perfil de exploración de las raíces (Fig. 1).

Al comienzo del ciclo, desde octubre hasta la segunda quincena de diciembre y con los tres primeros riegos efectuados, el agotamiento del agua en el suelo no llegó al límite inferior del AFA (NAP), por lo que se podrían haber ampliado los

intervalos de riego. Este contenido de humedad en el suelo es favorable para que el fruto alcance el 80% de su peso final (Requena, 2001). A partir de la segunda década de enero y hasta fines de marzo se manifestó cierto grado de stress ya que los niveles de humedad del suelo se encontraron por debajo del NAP. Shaozhong et al. (2002) encontraron que en condiciones de stress de agua los perales mejoraron sustancialmente el uso eficiente del agua en condiciones de capa freática poco profunda. La eficiencia en este caso se traduce en la extracción del agua condicionada por la presencia de la franja capilar. Por otra parte, se evita un crecimiento vegetativo de la planta no deseado al disminuir el consumo de agua al final del ciclo del cultivo (Requena, 2001).

En este escenario el riego debería incorporar 409 mm que el modelo calcula como lámina evapotranspirada, complementando lo aportado por la capa freática. Esto se logró a través de una programación de seis riegos efectivamente realizados y distribuidos uno en octubre, uno noviembre, dos en diciembre, uno en enero y uno en marzo. La lámina neta promedio de cada riego fue de 68 mm con una dotación media de $0,26 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y una máxima de $0,60 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Al comparar los balances hídricos en condiciones óptimas y en condiciones reales se observó

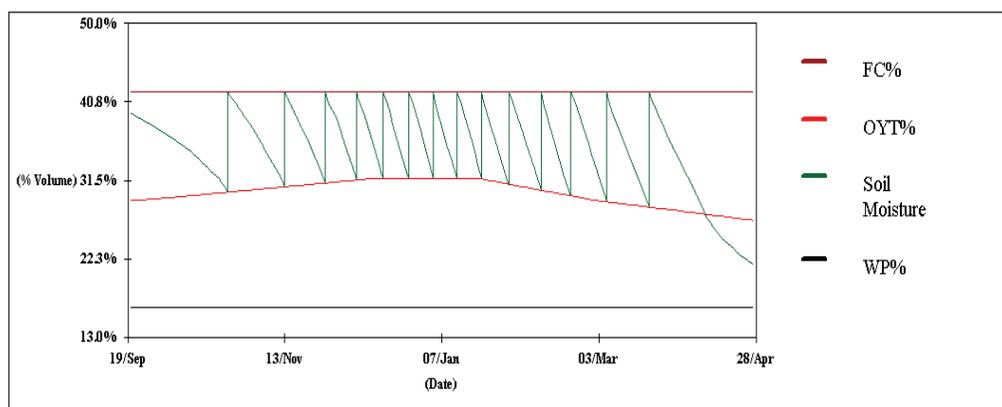


Fig. 4. Programación del riego en condiciones óptimas y con capa freática profunda.
FC% = capacidad de campo; OYT% = NAP; WP% = punto de marchitez permanente

Fig. 4. Irrigation scheduling under optimum conditions and shallow water table.

FC% = field capacity; OYT% = NAP; WP% = permanent wilting point

Tabla 3. Fecha de las fases de desarrollo del cultivo y parámetros utilizados en la calibración del modelo.

Table 3. Dates of crop growth stages and parameters used in the calibration of the model.

Fases del cultivo	Fecha	Kc	NAP
Brotación-floración	21/09 al 15/10	0,1	0,50
Crecimiento del fruto	15/10 al 15/12	0,50 – 0,60	0,40
Pleno desarrollo y cosecha	16/12 al 28/02	0,20 – 1,00	0,30
Senescencia	01/03 al 30/04	0,10 – 0,80	0,50

Kc: coeficientes de cultivo; NAP: nivel de agotamiento permisible

una diferencia entre las láminas evapotranspiradas y en el número de riegos a aplicar. Esta diferencia en las láminas se debió a que en el balance bajo condiciones reales la simulación con el programa WinSareg no contempla el aporte capilar al contenido de humedad del suelo cuando éste se encuentra dentro del AFA (Liu et al., 2006). Sin embargo, se observó a través de los datos de humedad del suelo medidos a campo y las estimaciones realizadas con el programa Upflow que el ascenso capilar se manifestó en todo el ciclo y compensó una fracción importante de la ETm. A través de un procedimiento indirecto utilizando el aporte del flujo capilar de 677 mm, obtenido por el programa Upflow, se deduce que se deberá agregar una lámina neta total de 421 mm para completar los requerimientos hídricos del cultivo en condiciones óptimas (ETm = 1098 mm). La diferencia en la estimación de las láminas de riego complementarias por ambos procedimientos puede deberse a ciertas simplificaciones propias de los modelos utilizados. En los ciclos analizados se midieron los rendimientos del cultivo (Aruani, 2010; Aruani et al., 2014) que fueron coincidentes con el valor estándar mencionado de 50 t ha⁻¹,

lo que demuestra que con menor frecuencia de riegos se logró mantener esos rendimientos y la ETm.

Así mismo, se pretendió mejorar la programación del riego realizada por el productor con el fin de evitar los momentos de estrés que se produjeron durante la segunda década de enero y hasta fines de marzo. Por lo tanto, se planteó la condición que el balance hídrico se mantuviera dentro del AFA. Para ello, con los Kc obtenidos de la calibración en condiciones reales se simuló una programación de riego para máximos rendimientos (Fig. 6). Con esta simulación la lámina evapotranspirada resultante fue semejante a la obtenida en condiciones reales. La cantidad de riegos fue la misma pero con una distribución diferente: dos en noviembre, uno en diciembre y tres en enero.

El déficit hídrico que se observa a partir del 31 de marzo no afectaría al cultivo ya que se encuentra en la fase de senescencia (Fig. 6). Es frecuente en la zona que este déficit sea compensado por un riego de fin de temporada que muchos productores realizan para efectuar lavado de sales que puedan acumularse en el perfil.

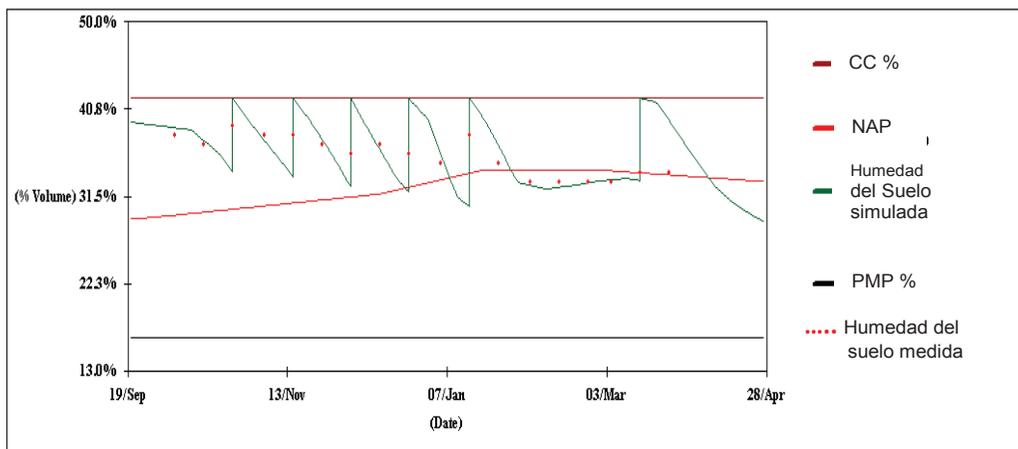


Fig. 5. Comparación de los contenidos de humedad en el suelo ($m^3 m^{-3}$) medidos y simulados para la calibración del modelo.

Fig. 5. Comparison between observed and simulated soil water content for the calibration of the model.

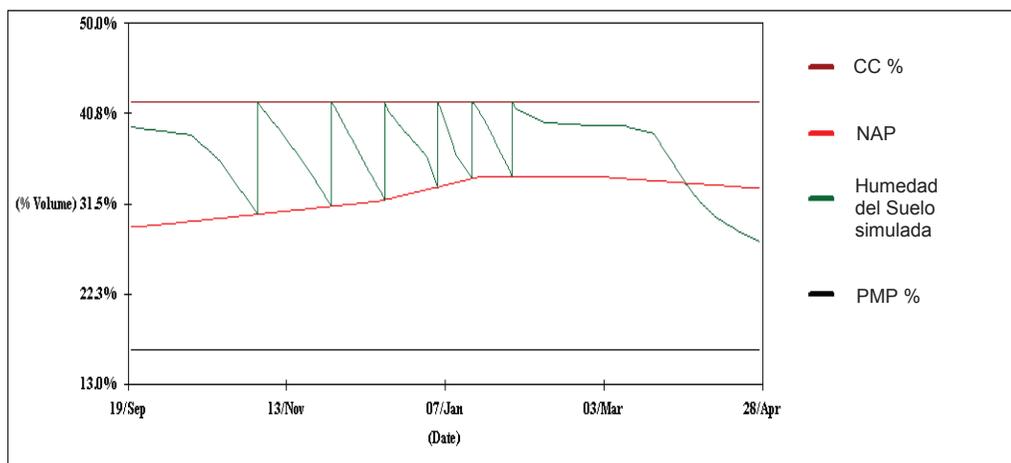


Fig. 6. Distribución del contenido de agua en el suelo ($m^3 m^{-3}$) simulado para máximos rendimientos.

Fig. 6. Distribution of soil water content ($m^3 m^{-3}$) simulated for maximum yields.

CONCLUSIONES

El uso de los programas WinIsareg y UPflow resultaron herramientas prácticas y confiables para determinar la programación del riego en condiciones de capa freática poco profunda.

El aporte del flujo capilar representó el 63% del requerimiento hídrico del cultivo de pera en el periodo analizado, como consecuencia se redujo la dotación media de riego de $0,71 L s^{-1} ha^{-1}$ a $0,26 L s^{-1} ha^{-1}$.

Los rendimientos obtenidos en condiciones de capa freática poco profunda fueron similares al valor de referencia en la zona. Esto refuerza la información obtenida en el balance hídrico que la cantidad de riegos realizados por el productor

fue apropiada para esta situación.

Los Kc ajustados en condiciones reales pueden ser orientativos para ser utilizados en programaciones de riego con capa freática poco profunda.

El ascenso capilar estimado a partir de curvas obtenidas a través del modelo desarrollado por Van Genuchten fue coherente con los valores medidos de humedad del suelo.

LITERATURA CITADA

Ali, M. H., I. Abustan, and S. Islam. 2013. Simulations of upward flux from shallow water table using Upflow model. J. Nat. Resour. Dev. 3:123-127. N° doi: 10.5027/jnrd.v3i0.12.

- Allen, R.G., L.S. Pereira, y D. Raes. 2006. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. 174 p. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- Aruani, M.C. 2010. Pera Williams: suelos que la sustentan. Boletín electrónico de la FCA - UNCo 2(7):1-5. Disponible en <https://sites.google.com/site/boletinfaunco/numeros-publicados/vol-2-nro-7-jul-2010> (Consulta 19 diciembre 2017)
- Aruani, M.C. 2009. Raíces: condiciones del suelo que afectan su crecimiento. Boletín Electrónico de la FCA - UNCo 1(5):1-5. Disponible en <https://sites.google.com/site/boletinfaunco/numeros-publicados/vol-1-nro-5-dic-2009> (Consulta 19 diciembre 2017).
- Aruani, M.C, P.D. Reeb, and N.E. Barnes. 2014. Influence of soil properties on yield and fruit maturity at harvest of 'Williams' pear. Chilean J. Agric. Res. 74(4):460-467.
- Cancela, J.J., S. Cuesta, X. Neira, and L. Pereira. 2006. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of Northern Spain. Biosystems Eng. 94(1):151-63. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.02.010
- Chaterlan, Y., C. Duarte, M. León, L.S. Pereira, P.R. Teodoro, y R.R. García. 2010. Determinación de coeficientes de cultivo para cultivos hortícola en Cuba, a través de la simulación de balance hídrico y experimentos de campo. Rev. Cie. Téc. Agr. 9(1):90-95.
- CIL. 1991. Estudio para el Aprovechamiento Integral del Río Negro. Etapa II. Informe final. 643 p. Consorcio Inconas Latinoconsult (CIL), Buenos Aires, Argentina.
- Ernst, L.F. 1950. A new formula for the calculation of the permeability factor with the auger hole method. T.N.O. Groningen 1950. Translated from the Dutch by H. Bouwer, Cornell Univ., Ithaca, N. Y. 1955, USA.
- De Laat, P.J.M. 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water-table. Applied to a regional sub-surface flow problem. 126 p. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC), Doctoral thesis. Wageningen, The Netherlands.
- FAO. 1985. Elementos para el proyecto de drenajes. 40 p. Estudio Riego y Drenaje N° 38. Roma, Italia.
- Galeazzi, J., P. Pesan, J. Muñiz, V. Signorelli, y J. Quiroga. 2007. Análisis del comportamiento de los niveles freáticos en un área piloto del Alto Valle de Río Negro. 10 p. En IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural y I Mercosur. 19-22 Setiembre. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Grassi, C.J. 1998. Fundamentos del riego. 3^{era} ed. 393 p. CIDIAT, Venezuela
- Liu, Y., L. Teixeira, J. Zhang, and L. Pereira. 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. Agric. Water Manage. 36:233-246.
- Liu, Y., L.S. Pereira, and R.M. Fernando. 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. Agric. Water Manage. 84:27-40. doi:10.1016/j.agwat.2006.01.018.
- Luo, L., and M. Sophocleous. 2010. Seasonal groundwater contribution to crop-water use assessed with lysimeter observations and model simulations. Journal of Hydrology 389 (3-4):325-335. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.011
- Molina-Ochoa, M.J., J.V. Vélez-Sánchez, y P. Rodríguez. 2015. Efecto del riego controlado en las tasas de crecimiento de fruto de pera (*Pyrus communis* L.) variedad Triunfo de Viena. Rev. Colomb. Cienc. Agric. 9(2):234-246. doi: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4179>
- Montenegro, A., J. Galeazzi, y A.R. Muñoz. 2017. La evapotranspiración de referencia y la programación del riego en el Alto Valle (RN). p. 420-421. En XXVI Congreso Nacional del Agua. 20-23 Setiembre. Plaza de la Música, Córdoba, Argentina. Disponible en <https://drive.google.com/file/d/0B3FXQhYESxy7S-HBoOTR4aVdPRG8/view> (Consulta noviembre 15 2017).
- Montenegro, A., J. Galeazzi, G. Polla, y V. Aramayo. 2014. Manejo del riego en un monte frutal con niveles freáticos críticos. Aplicación del modelo de balance hídrico WinIsareg. 9 p. En 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 23-26 Setiembre. Santa Fe, Argentina. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Santa Fe, Argentina.
- Pereira, L.S., P.R. Teodoro, P.N. Rodrigues, and J.L. Teixeira. 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. p. 161-180. In Rossi, G., A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Raes, D., and P. De Proost. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. Agricultural Water Management 62(2):79-91.

- Raes, D.K. 2009. Upflow v 3.2. Water movement in a soil profile from a shallow water table to the topsoil (capillary rise). 21 p. Katholieke Universiteit Leuven University, Department of Earth and Environmental Sciences, Leuven, Belgium.
- Requena, A. 2001. Peras, riego y calidad. Lo importante no es la cantidad de agua sino cuando es aplicada. Rompecabezas Tecnológico. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle 29:18-21.
- Requena, A., V. Ponce, L. Sánchez, y E. Castillo. 2016. Riego por goteo en frutales en producción. Peras Abate Fetel y Beurré D'Anjou. Revista F&D. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle 78:34-39.
- Richards, L.A. 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Sci. Am. Proc.* 20:301-303.
- Senasa. 2015. Anuario estadístico 2015. Centro Regional Patagonia Norte. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anuario_estadistic_2015.pdf (Consulta 27 noviembre 2017).
- Shaozhong, K., H. Xiaotao, I. Goodwin, and P. Jerrie. 2002. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Scientia Horticulturae* 92(3-4):277-291. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00300-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00300-4)
- Sepaskhah, A.R., A. Kanooni, and M.M Ghasemi. 2003. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. *Agricul. Water Manag.* 58:67-79.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Soppe, R.W.O., and J.E. Ayars. 2003. Characterizing ground water use by safflower using weighing lysimeters. *Agricul. Water Manag.* 60:59-71. [doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00149-X)
- Tassara, M. 2005. Defensa contra heladas. *Revista F&D. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle* 45:20-24.
- Teixeira, J.L., and L. Pereira. 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin* 41:29-48.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44:892-898.
- Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. 85 p. US Salinity Laboratory, Riverside, California, USA.
- Villarreal, P., y A. Santagni. 2004. Pautas tecnológicas: frutales de pepita. Manejo y análisis económico financiero. Estación Experimental Agropecuario Alto Valle. Centro Regional Patagonia Norte. 132 p. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-pautas_pepita.pdf (Consulta 16 diciembre 2017).
- Wösten, J.H.M, Y.A. Pachepsky, and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydro.* 251(3-4):23-150.
- Zairi, A., H.E.I. Amami, A. Slatni, L. Pereira, P.N. Rodríguez, and T. Machado. 2003. Doping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. p. 181-201. In Rossi, G., A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, and A. Zairi (eds.). *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.