

ESTIMATION OF LEACHING FLOW USING A GEE PASSIVE CAPILLARY LYSIMETER UNDER CONTROLLED CONDITIONS

ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE LIXIVIACIÓN USANDO EL LÍSIMETRO CAPILAR PASIVO GEE BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Braulio Lahuate^{1,2*}, Diego Rivera^{2,3,4}, José Arumi^{2,3,4}, Marco Sandoval⁵

¹Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias INIAP, Ecuador. (blahuate@yahoo.com), (blahuate@udec.cl). ²Universidad de Concepción, Departamento de Recursos Hídricos, Chillán, Chile. ³Centro del Agua para la Agricultura, Universidad de Concepción, San Fernando, Chile. ⁴Laboratorio de Políticas Comparadas en Gestión de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Chillán, Chile. ⁵Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.

ABSTRACT

Knowledge of the dynamic of water in the soil is essential to estimate both the movement of nutrients from the unsaturated to the saturated zone and groundwater contamination. The objective of this study was to compare drained water data from a Gee Passive Capillary Lysimeter (GPCL; Decagon Devices Inc, Pullman, USA) with model simulations in a soil column. Two experiments were set with the GPCL with different sensor settings and initial moisture content. Preliminary evaluation of the measured data was compared with data simulated by a soil-water model (CRITERIA BdP). The first experiment (GPCL1, soil column with disturbed soil and dry soil as initial condition) generated reliable data. The second experiment (GPCL2, soil column with disturbed soil with wet soil as initial condition and different water application rates) showed variations in the moisture content at all depths for an application rate of 5 mm d⁻¹ due to the propagation pressure waves. This result poses warning for the calibration of infiltration models since neither the Darcian flow theory nor the simplified theories, such as the Green-Ampt method, do not include the effects of pressure waves. Monitoring moisture by capacitance sensors (ECHO20, Decagon Devices Inc, Pullman, USA) in both experiments determined the soil water storage, and allowed completing the water balance equation by providing information on the variations of the soil water content. Both moisture content and drainage were adequately simulated by water balance model as compared against measured data.

RESUMEN

El conocimiento de la dinámica del agua en el suelo es esencial para estimar el movimiento de los nutrientes desde la zona no saturada a la saturada y la contaminación de aguas subterráneas. El objetivo de este estudio fue comparar los datos de aguas drenadas de el lisímetro capilar pasivo Gee (GPCL; Decagon Devices Inc., Pullman, EE.UU.) con simulaciones de modelos en una columna de suelo. Dos experimentos se realizaron con el GPCL con diferentes configuraciones de los sensores y contenido de humedad inicial. La evaluación preliminar de los datos medidos se comparó con los datos simulados por un modelo de suelo-agua (CRITERIA BdP). El primer experimento (GPCL1, de columna de suelo con suelo removido y suelo seco como condición inicial) generó datos confiables. El segundo experimento (GPCL2, de columna de suelos con suelo removido y suelo húmedo como condición inicial y diferentes tasas de aplicación de agua) mostró variaciones en el contenido de humedad en todas las profundidades para una tasa de aplicación de 5 mm d⁻¹ debido a la propagación de ondas de presión. Este resultado pone una advertencia para la calibración de modelos de infiltración ya que ni la teoría del flujo de Darcy ni las teorías simplificadas, como el método de Green-Ampt, incluyen los efectos de ondas de presión. El monitoreo de la humedad por sensores de capacitancia (ECHO20, Decagon Devices Inc., Pullman, EE.UU.) en los dos experimentos permitió determinar el almacenamiento de agua en el suelo, y completar la ecuación de balance de agua, al dar información sobre las variaciones del agua del suelo. El contenido de humedad y el drenaje fueron adecuadamente simulados por el modelo de balance de agua, comparado con los datos medidos.

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: January, 2013. Approved: September, 2013.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 47: 633-647. 2013.

Palabras clave: lisímetro capilar pasivo Gee, balance de agua, drenaje, el modelo CRITERIA.

Keywords: gee passive capillary lysimeter, water balance, drainage, CRITERIA model.

INTRODUCTION

Excessive use of pesticides and fertilizers in most crops in Ecuador is causing serious soil pollution in the Central Zone of the Coast. High rainfall of 2200 mm year⁻¹ in the winter season (January to June), and poor management of irrigation systems in the dry season (July to December) are causing the leaching of pesticides and fertilizers. In addition, farmers lack adequate knowledge in crop nutrition and fertilizer management, which makes this situation even more complex (Mite *et al.*, 2010).

Sustainable water management has become a key research issue not only in agriculture but also in water resources protection. Deeper knowledge of the interactions that occur in the unsaturated zone as result of water losses due to drainage to the saturated zone is required. Methodologies should be fully operational and reliable under field conditions, both in extensive studies and experimental plots (Arauzo *et al.*, 2010).

Farías (1994) has indicated that soil moisture and its movement in the unsaturated zone are important in agriculture, hydrology and all studies related to soil water dynamics. Soil moisture controls various hydrological processes, such as runoff generation, evapotranspiration, and leaching; the variability of soil moisture in space and time depends on soil properties, topography, hydrogeological setting and land use (Rivera *et al.*, 2012). Therefore, controlling soil moisture is a key component in studies of the water cycle. Preserving water quality, conducting adequate irrigation management practices and developing planning and monitoring strategies are essential for the technical, economic and environmental sustainability of agriculture. Therefore, it is necessary to establish a more sustainable use of resources, minimizing solute input in other hydro-ecological compartments (Kang and Lin, 2007).

For drainage modeling, the flow of water at a certain depth is a useful (but extremely difficult to measure) variable. Its usefulness at field level lies in monitoring soil with contaminated water. To measure leaching there are methods based on measurements of hydraulic gradient, hydraulic conductivity, and water balance simulation models, combined with

INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de pesticidas y fertilizantes en la mayoría de los cultivos en Ecuador causa una contaminación grave del suelo en la zona central de la costa. Las precipitaciones abundantes de 2200 mm año⁻¹ en la temporada de invierno (de enero a junio), y la mala gestión de los sistemas de riego en la época seca (julio a diciembre) causan la lixiviación de pesticidas y fertilizantes. Además, los agricultores carecen de conocimiento adecuado sobre la nutrición de cultivos y manejo de fertilizantes, lo que complica más esta situación (Mite *et al.*, 2010).

El manejo sostenible del agua es un tema clave de investigación en la agricultura y en la protección de los recursos hídricos. Se requiere conocer más las interacciones que ocurren en la zona no saturada debido a pérdidas de agua por drenaje a la zona saturada. Las metodologías deben ser totalmente operativas y confiables en condiciones de campo, tanto en estudios extensivos como en parcelas experimentales (Arauzo *et al.*, 2010).

Farías (1994) señaló que la humedad del suelo y su movimiento en la zona no saturada son importantes en la agricultura, la hidrología y todos los estudios relacionados con la dinámica del agua en el suelo. La humedad del suelo controla varios procesos hidrológicos, como la generación de escorrentía, evapotranspiración, y lixiviación; la variabilidad de la humedad del suelo en espacio y tiempo depende de las propiedades del suelo, topografía, características hidrogeológicas y uso de la tierra (Rivera *et al.*, 2012). Por tanto, controlar la humedad del suelo es un componente clave en los estudios de el ciclo del agua. Preservar la calidad del agua, realizar prácticas adecuadas de gestión de riego y desarrollar estrategias de planificación y monitoreo son esenciales para la sostenibilidad técnica, económica y ambiental de la agricultura. Por tanto, es necesario establecer un uso más sostenible de los recursos, minimizando la entrada de solutos en otros compartimentos hidro-ecológicos (Kang y Lin, 2007).

Para el modelado de drenaje, el flujo de agua a una cierta profundidad es una variable útil, pero extremadamente difícil de medir. Su utilidad en el terreno está en el monitoreo del suelo con agua contaminada. Para medir la lixiviación hay métodos basados en mediciones de gradiente hidráulico, conductividad hidráulica, y modelos de simulación del balance

a method to estimate evapotranspiration (Ramos and Kücke, 1999). The use of the Gee Passive Capillary Lysimeter (GPCL, Decagon Devices Inc, Pullman, USA) is based on a novel method of direct measurement that enables continuous monitoring of drainage water and sampling for analysis of leachate in deeper soil zones (Arauzo *et al.*, 2010).

Considering the importance of determining water movement in soil, the objective of this study was to compare drained water data from a Gee Passive Capillary Lysimeter with model simulations in a soil column.

MATERIALS AND METHODS

The study was performed at the Water Resources Laboratory of the School of Agricultural Engineering, University of Concepción, in Chillán, Chile. This region presents a temperate Mediterranean climate, with an annual rainfall of 1050 mm concentrated in the winter months (May, June, July and August).

Experimental unit: a tank filled with soil, drainage collector, and soil water content sensors

A tank of 90 cm high and 0.5 m³ was placed on concrete stands at a height of 30 cm. The passive lysimeter was installed in the bottom center of the tank at 6 cm depth. Then, a layer of gravel and sand of 3 cm each was added in a continuous form and a geotextile was placed between the sand and the soil column. A number of perforations were made at the bottom of the tank to remove excess water and four 2-inch plastic sewers with a capacity of 5 L were placed outside the tank. The tank was filled with soil collected at a depth less than 20 cm, keeping the same density as undisturbed soil. Soil texture was 43 % sand, 29 % silt and 28 % clay. Soil porosity was 53 %, with a bulk density of 1100 kg m⁻³. Field capacity was 27.0 % and the wilting point was 18.1 %.

Soil water content sensors ECH2O probes, Decagon Inc., Pullman, WA) were installed to measure the water content in the soil, making sure that the cables were perpendicular to the wall of the tank and set on the vertical center line of the lysimeter wick plate to avoid preferential water flows through the communication cables. For the first experiment (GPCL1), sensors were placed vertically at 20, 40, 60 and 80 cm deep. For the second experiment (GPCL2), sensors were placed helicoidally at 3, 9, 18, 27, 36, 45, 54, and 62 cm depth. The calibration equation provided by the manufacturer was used to convert voltage readings in mV to volumetric water content θ (m³ m⁻³). The sensors were set to record readings every minute

hídrico, combinados con un método para evaluar la evapotranspiración (Ramos y Kücke, 1999). El uso del lisímetro capilar pasivo Gee (GPCL, Decagon Devices Inc., Pullman, EE.UU.) se basa en un método nuevo de medición directa que permite monitoreo continuo del agua de drenaje y muestreo para analizar los lixiviados en las zonas más profundas del suelo (Arauzo *et al.*, 2010).

Dada la importancia de determinar el movimiento del agua en el suelo, el objetivo de este estudio fue comparar los datos del agua drenada de un lisímetro capilar pasivo Gee con simulaciones de modelos en una columna de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, en Chillán, Chile. El clima de la región es mediterráneo templado, con una precipitación anual de 1050 mm concentrada en los meses de invierno (mayo, junio, julio y agosto).

Unidad experimental: un tanque lleno con suelo, un recolector de drenaje, y sensores del contenido de agua del suelo

Un tanque de 90 cm de alto y 0.5 m³ se colocó sobre soportes de hormigón a una altura de 30 cm. El lisímetro pasivo se instaló en el centro del fondo del tanque a 6 cm de profundidad. Luego se añadió una capa de grava y otra de arena de 3 cm cada una, en forma continua, y se colocó un geotextil entre la arena y la columna de suelo. Numerosas perforaciones se hicieron en el fondo del tanque para eliminar el exceso de agua y se instalaron cuatro drenes de plástico de 2 pulgadas con una capacidad de 5 L, fuera del tanque. El tanque se llenó con tierra recogida a una profundidad menor a 20 cm, manteniendo la misma densidad que la del suelo no alterado. La textura del suelo fue 43 % arena, 29 % limo y 28 % arcilla. La porosidad del suelo fue 53 %, con una densidad aparente de 1.100 kg m⁻³. La capacidad de campo fue 27.0 %, y el punto de marchitez fue 18.1 %.

Sensores de humedad del suelo (sondas ECHO2O, Decagon Inc., Pullman, WA) se instalaron para medir el contenido de agua en el suelo, asegurando de que los cables estuvieran perpendiculares a la pared del tanque, y fijar en la línea central vertical del lisímetro la placa de mecha de lana de vidrio (*wick plate*) para evitar flujos de agua preferenciales a través de los cables de comunicación. Para el primer experimento (GPCL1) los sensores se colocaron verticalmente a 20, 40, 60 y 80 cm de profundidad. Para el segundo experimento (GPCL2) los sensores se colocaron

and connected to an EM50b data logger (Decagon Devices Inc., Pullman, USA).

Drainage water collector: The Gee Passive Capillary Lysimeter Drain Gauge

The Gee Passive Capillary Lysimeter Drain Gauge (GPCL, Decagon Devices Inc., Pullman, USA) collects the drainage water coming from a tank or tube filled with soil. The tank has a volume of 31 cm³, while the wick plate section is 310 cm². Thus, each GPCL drainage event corresponds to 1 mm of water. Water then passes to a sampling reservoir. The GPCL consists of a flat circular plate covered with a fiberglass fabric to allow capillary continuity for water and overcome soil heterogeneities. To prevent clogging due to root growth, the fiberglass fabric was treated with a root growth inhibitor. The installation of the drainage meter was conducted in the disturbed soil. For the first experiment, it was necessary to allow time for roots to grow in the disturbed soil; in the second experiment, soil was left to stand for several days. Readings were taken every 1 min, in order to allow a more accurate measurement of drainage.

Models for drainage water and soil water content: water balance and CRITERIA BdP

To estimate drainage water, first the water balance approach was applied. Water balance equation establishes that water inputs (R) are equal to water outputs (ET+D), along with the variations in soil water storage, ΔH , according to Allen *et al.* (1998). For the experiments, R is irrigation (mm), ET is crop evapotranspiration (mm), ΔH is the variation of the water stored in the soil column (mm) and D is drainage water (mm). The values for R and D were obtained by direct measurements on a daily basis. ΔH was obtained according to the values recorded with the ECHO20 sensors. ET was estimated as the closure of the water balance equation or from pan evaporation records.

The CRITERIA model (Marletto *et al.*, 2007) is a modeling system for simulating the water balance of agricultural soils, including crop growth and leaching, assuming a multilayered soil and explicitly computing approximate values of daily actual evaporation, transpiration, water flows between layers, deep drainage, runoff and subsurface runoff (Villani *et al.*, 2011). It was developed by ARPA-SIM (Agenzia Regionale Prevenzione e ambiente dell' Emilia-Romagna, Servizio Idro-Meteo-Clima, Italy) and it is intended to be applied in planning, hydrological modeling and climate change impacts on agricultural production. The model was further expanded to numerically simulate water flows (CRITERIA3D, developed by Pistocchi and Tomei, 2003) and tested by Bittelli *et al.* (2010). The

helicoidalmente a 3, 9, 18, 27, 36, 45, 54 y 62 cm de profundidad. La ecuación de calibración proporcionada por el fabricante se usó para convertir las lecturas de voltaje en mV a el contenido volumétrico de agua θ (m³ m⁻³). Los sensores se establecieron para registrar lecturas cada minuto y conectados a un registrador de datos EM50b (Decagon Devices Inc., Pullman, EE.UU.).

Recolector de agua de drenaje: el lisímetro capilar pasivo Gee

El lisímetro capilar pasivo Gee (GPCL; Decagon Devices Inc., Pullman, EE.UU.) recoge el agua de drenaje proveniente de un tanque o tubo relleno con tierra. El volumen del tanque es 31 cm³, y la sección de placa de mecha es 310 cm². Así, cada evento de drenaje GPCL corresponde a 1 mm de agua. Después, el agua pasa a un depósito de muestras. El GPCL consiste en una placa circular plana cubierta con una tela de fibra de vidrio para permitir la continuidad capilar del agua y superar las heterogeneidades del suelo. Para evitar la obstrucción debido al crecimiento de la raíz, la tela de fibra de vidrio se trató con un inhibidor de crecimiento de las raíces. La instalación del medidor de drenaje se realizó en el suelo alterado. Para el primer experimento, fue necesario dar tiempo para que las raíces crecieran en la tierra removida; en el segundo experimento, el suelo reposó varios días. Las lecturas se tomaron cada 1 min, para permitir una medición más precisa del drenaje.

Modelos para agua de drenaje y contenido de agua en el suelo: balance del agua y CRITERIA BdP

Para evaluar el agua de drenaje primero se aplicó el enfoque de balance hídrico. La ecuación de balance de agua establece que las entradas de agua (R) son iguales a las salidas de agua (ET+D), junto con las variaciones en el almacenamiento de agua en el suelo, ΔH , según Allen *et al.* (1998). Para los experimentos, R es riego (mm), ET es evapotranspiración del cultivo (mm), ΔH es la variación del agua almacenada en la columna de suelo (mm) y D es el agua de drenaje (mm). Los valores para R y D se obtuvieron por mediciones directas en una base diaria. ΔH se obtuvo de acuerdo con los valores registrados en los sensores ECHO20. ET se evaluó como el cierre de la ecuación de balance de agua o de registros de la bandeja de evaporación.

El modelo CRITERIA (Marletto *et al.*, 2007) es un sistema de modelos para simular el balance hídrico de suelos agrícolas, incluyendo crecimiento del cultivo y lixiviación, suponiendo un suelo de capas múltiples y calculando explícitamente los valores aproximados de la evaporación real diaria, transpiración, flujos de agua entre las capas, drenaje profundo, escorrentía y escurrimiento subsuperficial (Villani *et al.*, 2011). Este modelo fue

algorithm is based on the resolution of Richards' equation and uses Darcy equation, van Genuchten retention curve (1980) and the hydraulic conductivity curve developed by Mualem (1976). There exists a unidimensional version called CRITERIA BdP (CRITERIA *Banco di Prova* or CRITERIA test bench), which is a restriction of the 3-dimensional scheme, allowing to compare different combinations of weather, crops, soil and irrigation data. CRITERIA BdP is available from the ARPA website (http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=708&idlivello=64).

The CRITERIA BdP model requires at least: maximum, minimum and mean temperature ($^{\circ}\text{C}$), irrigation (mm d^{-1}), crop type, daily irrigation plate (mm), texture, bulk density (g cc^{-1}), porosity, hydraulic conductivity, organic matter, field capacity (%), permanent wilting point (%), number and thickness of soil horizon (cm). The model performance was evaluated by the coefficient of efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970). The best simulation is defined as 1. The coefficient of determination R^2 was also used to evaluate the linear fit between observed and simulated data.

Experimental setup

Two experimental units were built for controlling inflows and outflows as a soil-column experiment. The first experiment (GPCL1) was carried out in a field, with dry soil as initial condition; the second (GPCL2) was conducted indoor the laboratory, with wet soil as initial condition (Figure 1). Data were used to analyze water flows in the soil column and then compared to the data simulated by the CRITERIA BdP model. Table 1 shows the condition of both experiments. In GPCL1, turf grass rolls were used to cover the soil column at the top to unify the water input and avoid preferential flows; whereas, GPCL2 had no turf grass. In both cases, water was applied with a hand pump to avoid preferential flow and prevent this from descending through the walls of the tank. At the test period, it was found that solar incident radiation on the walls of the plastic tank caused the soil to dry out in all its layers, leading to a condition close to permanent wilting point (PWP) very quickly. Then, a tent that covered the experiment was placed to prevent this effect.

RESULTS AND DISCUSSION

Temporal evolution of soil water content and drainage

For an irrigation rate of 5 mm d^{-1} (10 d, November 15-24, 2011), the wetting front did not reach the first sensor located at a depth of 20 cm, because the

desarrollado por ARPA-SIM (Agenzia Regionale Prevenzione e ambiente dell'Emilia-Romagna, Servizio Idro-Meteo-Clima, Italia) y es aplicable en la planificación, modelización hidrológica e impactos del cambio climático en la producción agrícola. El modelo se amplió para simular numéricamente flujos de agua (CRITERIA3D, desarrollado por Pistocchi y Tomei, 2003) y probado por Bittelli *et al.* (2010). El algoritmo se basa en la resolución de la ecuación de Richards y usa la ecuación de Darcy, la curva de retención de van Genuchten (1980) y la curva de conductividad hidráulica desarrollada por Mualem (1976). Hay una versión unidimensional llamada CRITERIA BdP (CRITERIA Banco di Prova o banco de pruebas CRITERIA), que es una restricción del régimen tridimensional que permite comparar diferentes combinaciones de datos de clima, cultivos, suelo y riego. CRITERIA BdP está disponible en el sitio web de ARPA (http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=708&idlivello=64).

El modelo CRITERIA BdP requiere al menos: temperatura máxima, mínima y media ($^{\circ}\text{C}$), riego (mm d^{-1}), tipo de cultivo, lámina de riego diario (mm), textura, densidad aparente (g cc^{-1}), porosidad, conductividad hidráulica, materia orgánica, capacidad de campo (%), punto de marchitez permanente (%), y número y espesor de los horizontes del suelo (cm). El desempeño del modelo se evaluó mediante el coeficiente de eficiencia (Nash y Sutcliffe, 1970). La mejor simulación se define como 1. El coeficiente de determinación R^2 se usó para evaluar el ajuste lineal entre los datos observados y simulados.

Diseño del experimento

Dos unidades experimentales se hicieron para controlar entradas y salidas como un experimento de columna de suelo. El primer experimento (GPCL1) se realizó en un campo, con suelo seco como condición inicial; el segundo (GPCL2) se efectuó en el laboratorio, con suelo húmedo como condición inicial (Figura 1). Los datos se usaron para analizar flujos de agua en la columna de suelo y se compararon con los datos simulados por el modelo CRITERIA BdP. El Cuadro 1 muestra la condición de ambos experimentos. En GPCL1, se usaron rollos de césped para cubrir la columna de suelo en la parte superior, para uniformizar la entrada de agua y evitar flujos preferenciales; pero GPCL2 no tuvo césped. En ambos casos, se aplicó agua con una bomba de mano para evitar el flujo preferencial y evitar que descendiera por las paredes del tanque. En el período de prueba se detectó que la radiación solar incidente sobre las paredes del tanque de plástico hizo que el suelo se secara en todas sus capas, llegando a una condición cercana al punto de marchitamiento permanente (PWP) muy rápidamente. Entonces, con una tienda de campaña se cubrió el experimento para evitar este efecto.

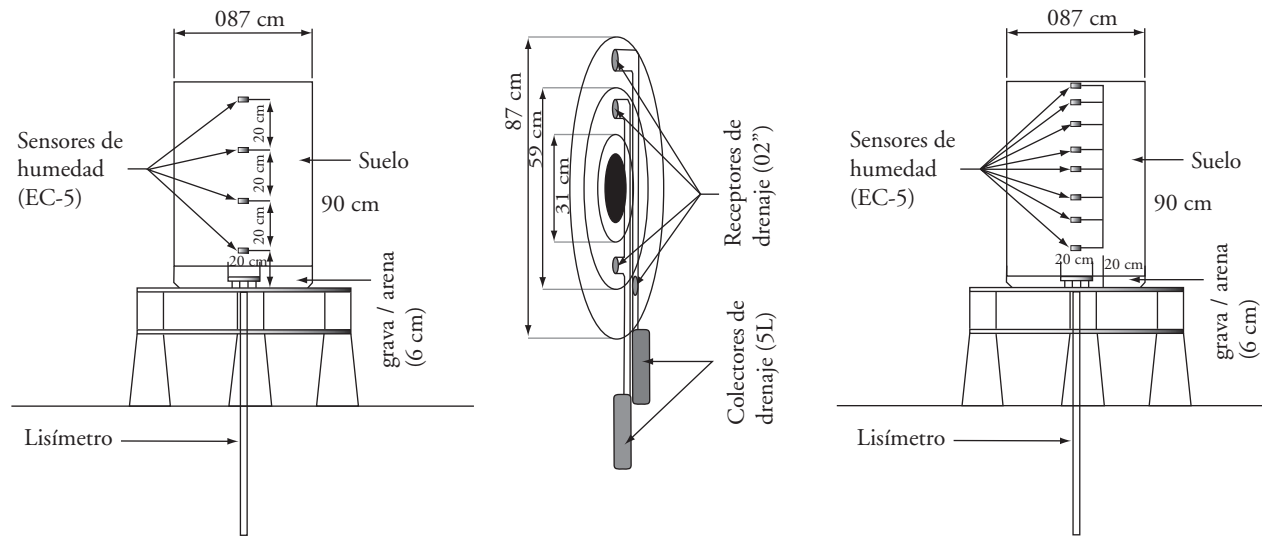


Figure 1. Diagrams of the first and second experiments. Left panel shows the layout for field experiment with dry soil as initial condition, and right panel shows the layout for the indoor experiment with wet soil as initial condition. Please, note the change in the number and location of soil water sensors.

Figura 1. Diagramas del primer y segundo experimento. El panel izquierdo muestra la disposición para el experimento de campo con suelo seco como condición inicial, y el panel de la derecha muestra el diseño para el experimento al interior, con suelo húmedo como condición inicial. Por favor, notar el cambio en el número y ubicación de los sensores de humedad del suelo.

Table 1. Irrigation schedule used in the trial period and experimental part of both GPCL trials.

Cuadro 1. Programa de riego usado en el período de prueba y en la parte experimental de ambos experimentos GPCL.

Irrigation period	Time (days)	Volume of applied water	
		(mm d ⁻¹)	(mm period ⁻¹)
Experiment 1 (GPCL1)			
Test period			
26 August to 30 September 2011	36	10	360
1 October to 14 November 2011	45	0	0
Experimental part			
15 November to 24 November 2011	10	5	50
25 November to 14 December 2011	20	10	200
15 December 2011 to 3 January 2012	20	15	300
Experiment 2 (GPCL 2)			
Test period			
17 to 30 June 2012	14	10	140
1 to 5 July 2012	5	0	0
Experimental part			
6 to 15 July 2012	10	5	50
16 to 25 July 2012	10	10	100
26 July to 8 August 12	14	15	210

water applied was removed from the upper layer of the soil column due to evapotranspiration and only a minimum percentage was stored in the soil (Figure 2A). For an irrigation rate of 10 mm d^{-1} during 20 d (November 25 to December 14), the first sensor detected the advance of the wetting front on November 27 (48 h after the irrigation rate was increased). The wetting front reached the second sensor at a depth of 40 cm, 192 h later (December 2). The third sensor located at 60 cm deep recorded the increase in moisture content on December 7, after 312 h. The last sensor located at a depth of 80 cm recorded an increase in the moisture content on December 9, 384 h after irrigation was increased to 10 mm d^{-1} .

From December 10th, an increase in the moisture content was recorded in the four layers every time

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución temporal del contenido de agua y drenaje del suelo

Para una tasa de riego de 5 mm d^{-1} (10 d, 15-24 de noviembre de 2011), el frente húmedo no alcanzó el primer sensor situado a una profundidad de 20 cm, debido a que el agua aplicada fue retirada de la capa superior de la columna de suelo debido a la evapotranspiración y sólo un porcentaje mínimo se almacenó en el suelo (Figura 2A). Para una tasa de riego de 10 mm d^{-1} durante 20 d (noviembre 25 a diciembre 14), el primer sensor detectó el avance del frente húmedo el 27 de noviembre (48 h después que aumentó la tasa de riego). El frente húmedo alcanzó el segundo sensor a una profundidad de 40 cm, 192 h

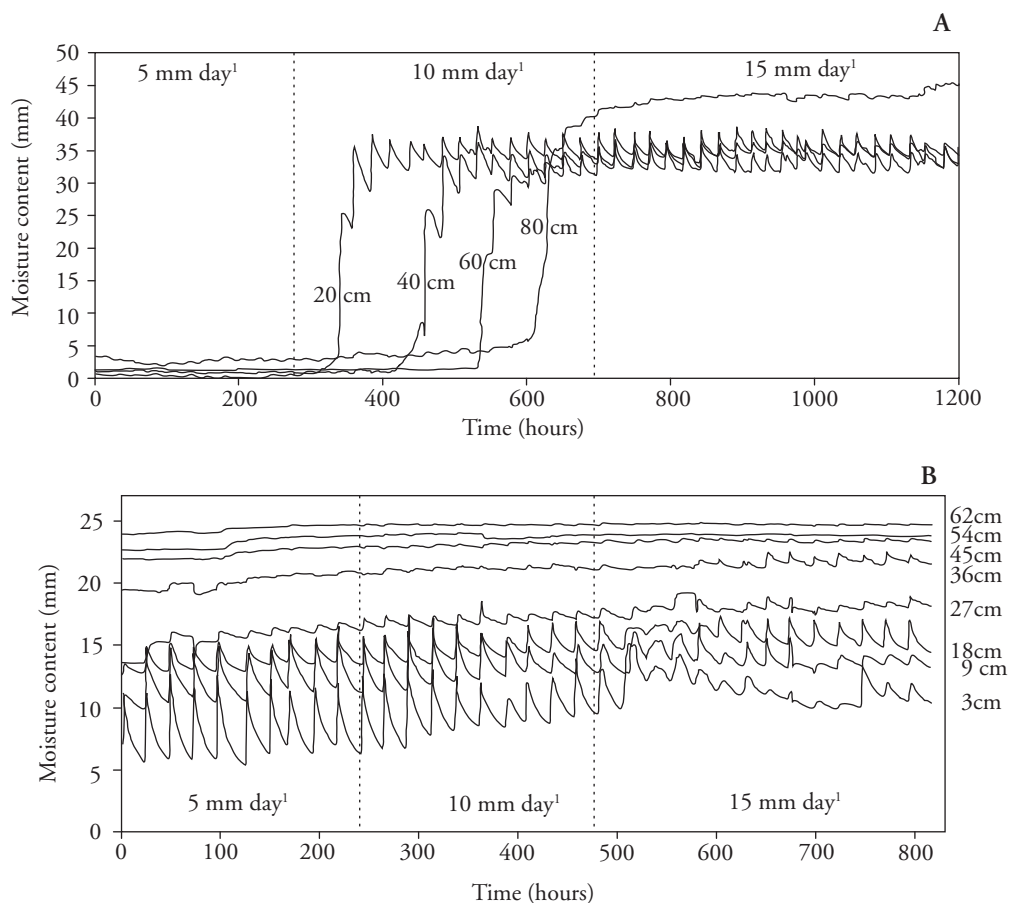


Figure 2. (A) Evolution of the moisture content measured at four depths in the first experiment, GPCL1. (B) Evolution of the moisture content measured at eight depths in the second experiment, GPCL2.

Figura 2. (A) Evolución del contenido de humedad medido a cuatro profundidades en el primer experimento, GPCL1. (B) Evolución del contenido de humedad medido a ocho profundidades en el segundo experimento, GPCL2.

the soil column was watered, keeping soil at field capacity in the first three layers and at saturation conditions at 80 cm deep. Once water occupied the soil pores, it propagates pressure waves in the soil column. The evolution of the moisture content in the soil column (July 6 to August 8, 2012), in the second experiment, is close to field capacity in the sensors located at depths of 3, 9, 18 and 27 cm, and with a water content greater than field capacity in the layers located at 36, 45, 54 and 62 cm deep (Figure 2B). The wetting front generated increases in water content even at low application rates of water (5 mm d^{-1}) during the first 10 d, and a slight increase in moisture content was recorded in the deeper sensors due to pressure wave propagation from the surface (Figure 2B). Rates of 10 and 15 mm d^{-1} were applied from July 16 to July 25 (10 d) and from July 26 to August 8 (14 d).

Regarding drainage, results obtained in GPCL1 revealed that there was no drainage in the soil column when rates of 5 and 10 mm d^{-1} were applied during the first 29 d. After a 15 mm d^{-1} application rate water drainage started showing increasing volumes. Free drainage showed a stationary condition for downward water flow throughout the soil profile so its contribution to deep drainage tended to be constant throughout the study (Figure 3). This shows that the fiberglass in Gee lysimeter can capture more water than free drainage (gravity-driven flow), as there is a better capillary continuity in the soil column. In GPCL2, water drainage occurred from day 10 even at low application rates (5 mm d^{-1}), with a slight increase in drainage recorded in the bottom tank. This can be associated to the unsaturated flow movement resulting from irrigation, which goes from soil surface to the bottom of the soil column, or it can be explained by the fact that the lysimeter has a fiberglass wick that allows water to enter more easily. Drainage increased steadily up to the first 14 d, and then decreased until it reached 0.59 mm d^{-1} .

As GPCL2 did not have a geotextile at the bottom and the lysimeter was placed in direct contact with the soil, a certain level of clogging was observed. This situation accounted for the decrease in drainage recorded in this experiment (Figure 3B). In GPCL2, results indicated that drainage began 9 d after irrigation started (5 mm d^{-1}). When the irrigation rate increased to 10 and 15 mm d^{-1} the following 24 d, the trend was upward (Figure 3B).

más tarde (2 de diciembre). El tercer sensor situado a 60 cm de profundidad registró el aumento en el contenido de humedad el 7 de diciembre, después de 312 h. El último sensor situado a una profundidad de 80 cm registró un aumento en el contenido de humedad el 9 de diciembre, 384 h después de que la irrigación aumentó a 10 mm d^{-1} .

Desde el 10 de diciembre se registró un aumento en el contenido de humedad en las cuatro capas cada vez que se regó la columna de suelo, manteniendo el suelo a capacidad de campo en las tres primeras capas y en condiciones de saturación a 80 cm de profundidad. Una vez que el agua cubrió los poros del suelo, ondas de presión se propagaron en la columna de suelo. El cambio del contenido de humedad en la columna de suelo (6 julio al 8 agosto 2012), en el segundo experimento, es cercano a la capacidad de campo en los sensores situados a profundidades de 3, 9, 18 y 27 cm, y con un contenido de agua mayor que la capacidad de campo en las capas situadas a 36, 45, 54 y 62 cm (Figura 2B). El frente húmedo aumentó el contenido de agua, incluso a bajas tasas de aplicación de agua (5 mm d^{-1}) en los primeros 10 d, y se registró un ligero aumento en el contenido de humedad en los sensores a mayor profundidad debido a la propagación de la onda de presión desde la superficie (Figura 2B). Las tasas de 10 y 15 mm d^{-1} se aplicaron del 16 de julio al 25 de julio (10 d) y del 26 de julio al 8 de agosto (14 d).

Respecto al drenaje, los resultados obtenidos en GPCL1 revelaron que no hubo drenaje en la columna de suelo para tasas de 5 y 10 mm d^{-1} aplicadas en los primeros 29 d. Después de aplicar de 15 mm d^{-1} , el drenaje de agua aumentó cada vez más. El drenaje libre mostró una condición estacionaria cuando el flujo de agua desciende en el perfil del suelo, por lo que su contribución al drenaje profundo tendió a ser constante durante todo el estudio (Figura 3). Esto muestra que la fibra de vidrio en el lisímetro Gee puede capturar más agua que el drenaje libre (flujo por gravedad), ya que hay una mejor continuidad capilar en la columna de suelo. En GPCL2, el drenaje de agua se produjo desde el día 10 incluso a tasas bajas de aplicación (5 mm d^{-1}), con un ligero aumento en el drenaje en la parte inferior del tanque. Esto se puede relacionar con el movimiento del flujo no saturado resultante del riego, que va desde la superficie del suelo a la parte inferior de la columna de suelo, o se puede explicar porque el lisímetro tiene una mecha

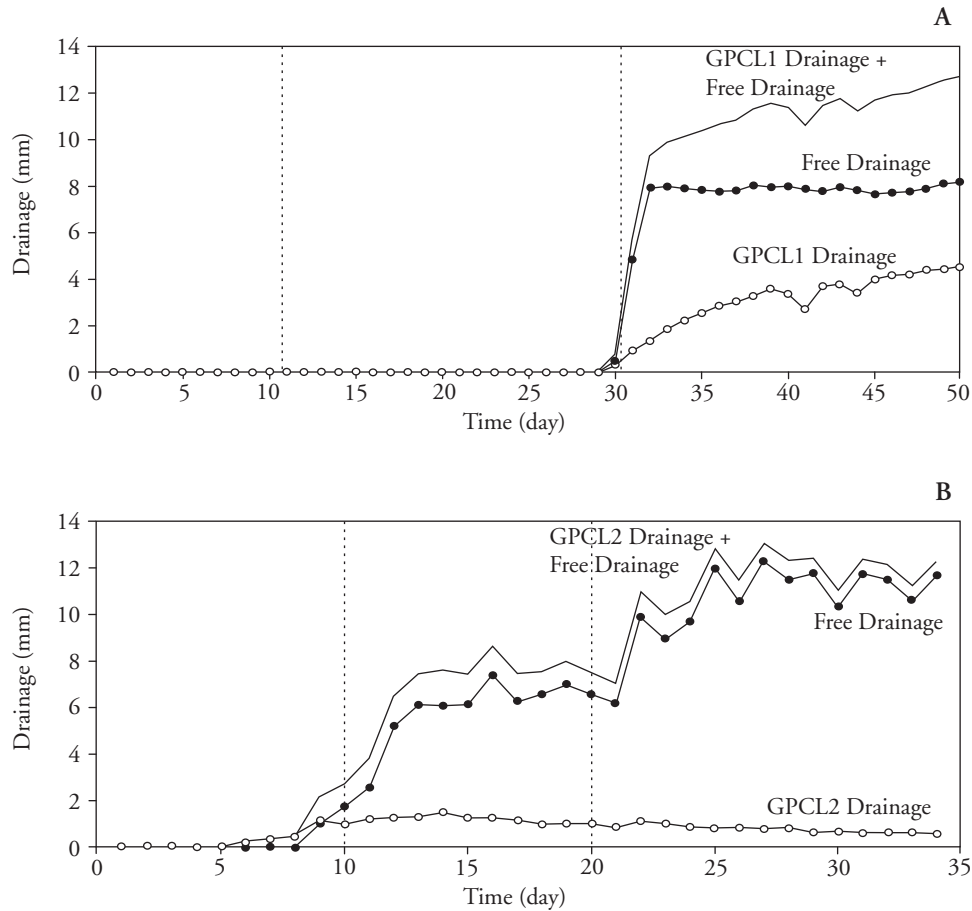


Figure 3. Behavior of the drainage recorded in the first experiment GPCL1 (A), and second experiment GPCL2 (B).

Figura 3. Comportamiento del drenaje registrado en el primer experimento, GPCL1 (A), y el segundo experimento, GPCL2 (B).

Drainage estimation using the water balance approach

Table 2 shows the water balance for the two periods under study, estimated by the direct method to estimate drainage (GPCL drainage measurements; ET as the closure for the water balance) and the indirect method (drainage as the closure of the water balance, ET from pan evaporation). Water input into the system was 550 mm GPCL1 and 360 mm for GPCL2.

In the first experiment (GPCL1), drainage was 220 mm as estimated by using the direct method (drainage water collection) and 190 mm by using the indirect method (water balance closure, a-values in the second column of Table 2). Besides, evapotranspiration was 185 mm by using the direct method against 215 mm by estimation using pan evaporation data. In both cases, balance closure is zero. Thus, the first experiment shows a good

de fibra de vidrio que permite que entre agua más fácilmente. El drenaje aumentó constantemente en los primeros 14 d, y luego descendió hasta llegar a 0.59 mm d^{-1} .

Como el GPCL2 no tenía un geotextil en la parte inferior y el lisímetro estaba en contacto directo con el suelo, se detectó un cierto grado de obstrucción. Esta situación significó una disminución en el drenaje, registrada en este experimento (Figura 3 B). En GPCL2, los resultados indicaron que el drenaje comenzó 9 d después de iniciar la irrigación (5 mm d^{-1}). Cuando la tasa de riego aumentó a 10 y 15 mm d^{-1} en los siguientes 24 d, la tendencia fue ascendente (Figura 3 B).

Estimación del drenaje utilizando el enfoque de balance hídrico

El Cuadro 2 muestra el balance hídrico para los dos períodos analizados, evaluado por el método

Table 2. Estimation of the water balance using GPCL (Gee Passive Capillary Lysimeter) in two evaluated periods. Superscripts in the second and third column are placed for comparison.**Cuadro 2. Estimación del balance hídrico usando GPCL (Gee Passive Capillary Lysimeter) en dos períodos evaluados. Los superíndices en la segunda y tercera columna se colocan para hacer comparaciones.**

	Experiment 1 15/Nov/11 to 3/Jan/2012	Experiment 2 6/Jul to 8/Aug/12
Irrigation (mm)	550	360
(1) Total water input	550	360
Direct method (GPCL drainage water)		
Δ S using ECH2O probes (mm)	145	17
ET as water balance closure (mm)	185 a	105b
Free drainage (mm)	155	212e
GPCL measured drainage (mm)	65	27e
(2) Total water output (mm)	550	360
Indirect method		
ET estimated estimated from pan evaporation (mm)	215 a	0c
Δ S using ECH2O probes (mm)	145	17
Total drainage (GPCL+ Free drainage) (mm)	190	343e
(3) Total water output (mm)	550	360

agreement between measured downward water flux using the GPCL and the more common approach of defining percolation as the closure of the water balance. Drainage values obtained from the direct method (direct drainage water collection plus pan evaporation, 239 mm) differ from the values obtained when estimating drainage as the closure of the water balance (indirect method attains 343 mm), as we assumed that ET was zero (c value in the third column of Table 2). However, the water balance using measured drainage, changes in stored water, and irrigation volume yields an ET of 105 mm. This result highlights the importance of the ET assumptions when applying water balance methods to estimate infiltration rates. For example, it is needed to include crop development stages for the calculation of actual evapotranspiration when estimating drainage in field conditions.

Drainage estimation and soil water content using CRITERIA BdP

The model simulated adequately the advance of the wetting front in the layers located at 20, 40, 60 and 80 cm deep in GPCL1 (Figure 4A). The model simulated low moisture contents (close to PWP) for the first 10 d under a 5 mm d⁻¹ irrigation scheme. With the increase in irrigation to 10 mm

directo para calcular el drenaje (mediciones del drenaje con GPCL; ET como cierre del balance hídrico) y el método indirecto (drenaje como el cierre del balance hídrico, ET de la bandeja de evaporación). La entrada de agua en el sistema fue 550 mm en GPCL1 y 360 mm en GPCL2.

En el primer experimento (GPCL1), el drenaje fue 220 mm, evaluado por el método directo (recolección de agua de drenaje), y 190 mm usando el método indirecto (cierre del balance hídrico, los valores a en la segunda columna del Cuadro 2). Además, la evapotranspiración fue 185 mm al usar el método directo, comparado con los 215 mm usando los datos de la bandeja de evaporación. En ambos casos, el cierre del balance hídrico fue cero. Así, el primer experimento muestra una buena concordancia entre el flujo de agua descendente medido usando el GPCL y el enfoque más común de definir la percolación como el cierre del balance hídrico. Los valores obtenidos del drenaje con el método directo (recolección directa de agua del drenaje más la bandeja de evaporación, 239 mm) difieren de los valores obtenidos cuando se estima el drenaje como el cierre del balance hídrico (método indirecto llega a 343 mm), ya que se asumió que ET era cero (los valores de c en la tercera columna del Cuadro 2). Sin embargo, el balance hídrico mediante el drenaje medido, cambios en agua almacenada y volumen de riego da un ET de 105 mm. Este

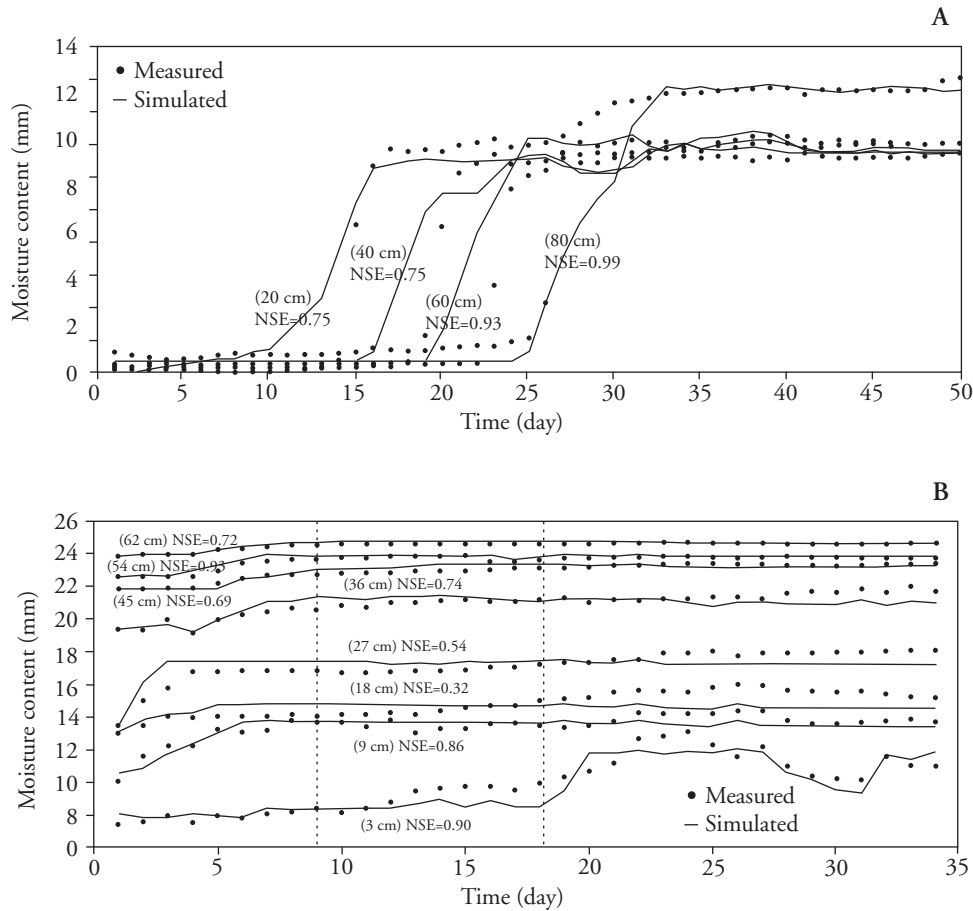


Figure 4. Soil moisture content measured and simulated at: (A) Four depths during the first experiment, and (B) eight depths during the second experiment.

Figura 4. Contenido de humedad del suelo, medido y simulado en: (A) cuatro profundidades durante el primer experimento, y (B) ocho profundidades en el segundo experimento.

d^{-1} , the simulation of soil moisture achieved a good fit, moving from PWP to a condition close to field capacity in the soil column. It is important to note that the model was able to simulate the change from a dry soil to a wet soil in a short period, as it was recorded in the measured data. This indicates that the model simulates adequately the washing process. Good agreement was reached because CRITERIA BdP allows to tune initial conditions, as this issue is relevant for proper calibration.

In the second experiment (GPCL2), soil water content of the soil column was initially high in all layers (depths of 3, 9, 18, 27, 36, 45, 54 and 62 cm). In this case, the model simulations was able to simulate low water application rates (5 mm d^{-1}), followed by increasing application rates (10 and 15 mm d^{-1}), (Figure 4B). The model was able to establish

resultado remarca la importancia de los supuestos de ET cuando se aplican los métodos de balance hídrico para evaluar las tasas de infiltración. Por ejemplo, es necesario incluir las etapas de desarrollo de cultivos para calcular la evapotranspiración real se evalúa el drenaje en condiciones de campo.

Estimación del drenaje y contenido de agua en el suelo mediante CRITERIA BdP

El modelo simuló adecuadamente el avance del frente húmedo en las estratas situadas a 20, 40, 60 y 80 cm de profundidad en GPCL1 (Figura 4A). El modelo simuló contenidos bajos de humedad (cercano a PWP) durante los primeros 10 d bajo un sistema de riego de 5 mm d^{-1} . Con el aumento de la irrigación a 10 mm d^{-1} , la simulación de la humedad

differences between each of the layers through the profile and even simulated saturation states recorded by sensors at 45, 54 and 62 cm deep (Figure 4B). In addition, a good agreement was found between the simulated and measured water content at layers located at 3, 9, 36, 45, 54 and 62 cm deep. On the contrary, a low correlation was observed in the layers at 18 ($R^2=0.40$) and 27 ($R^2=0.50$) cm deep (Figure 4B).

Regarding drainage, the CRITERIA BdP model simulated adequately the measured values in GPCL1. The first drainage pulses occurred after 30 d and the model was able to simulate this tendency (Figure 5A). The simulation after day 40 did not achieve a good fit because drainage losses decreased due to some problems in the lysimeter installation. When comparing measured and simulated drainage values in GPCL2, it can be observed that the model performed well (Figure 5B). In both experiments, simulation can be considered as acceptable as indicated by the correlation coefficients. However, it is worth noting that the first experiment shows high dispersion (right panel, Figure 5A) due to problems in the geotextile installation.

Some aspects to discuss

Results of this study confirm what was stated by Rivera *et al.* (2012), that ECHO20 sensors can satisfy the need for quick measurements, storage of large amount of data, *in situ* measurements and reliable measurements of soil moisture, allowing the interpretation of dynamic, variable and complex processes that are not likely to be measured using conventional equipment. This represents a valuable tool for studies of the vadose zone. However, it is important to determine the number of sensors to be installed in order to allow proper recordings of the moisture levels in the soil column. In GPCL1, four sensors were not enough to record the advance of water the first 20 cm deep for an application of 5 mm d^{-1} . But, a higher number of sensors placed in GPCL2 allowed proper recording of water advance in the first few centimeters of the soil.

Using the CRITERIA BdP model is considered a major accomplishment in estimating not only the water balance but also some parameters that were used to compare the results obtained with the measured data. Tomei *et al.* (2008) consider that this

del suelo logró un buen ajuste, pasando de PWP a una condición cercana a la capacidad de campo en la columna de suelo. Es importante notar que el modelo pudo simular el cambio de un suelo seco a un suelo húmedo en un corto período, como se registró en los datos medidos. Esto indica que el modelo simula adecuadamente el proceso de lavado. Un buen ajuste se obtuvo porque CRITERIA BdP permite ajustar las condiciones iniciales, ya que esto es relevante para una calibración adecuada.

En el segundo experimento (GPCL2), el contenido de agua del suelo de la columna de suelo fue inicialmente alto en todas las capas (profundidades de 3, 9, 18, 27, 36, 45, 54 y 62 cm). En este caso, las simulaciones del modelo pudieron simular las tasas bajas de aplicación de agua (5 mm d^{-1}), seguido por el aumento de las tasas de aplicación (10 y 15 mm d^{-1}), (Figura 4B). El modelo pudo establecer diferencias entre cada capa a través del perfil, y aún los estados de saturación simulados registrados por los sensores a 45, 54 y 62 cm de profundidad (Figura 4B). Además, se encontró un buen ajuste entre el contenido de agua simulado y el medido en las capas situadas a 3, 9, 36, 45, 54 y 62 cm de profundidad. Por el contrario, hubo una baja correlación en las capas a 18 ($R^2=0.40$) y 27 ($R^2=0.50$) cm de profundidad (Figura 4B).

Respecto al drenaje, el modelo CRITERIA BdP simuló adecuadamente los valores medidos en GPCL1. Los primeros pulsos del drenaje ocurrieron después de 30 d y el modelo pudo simular esta tendencia (Figura 5A). La simulación después de 40 d no logró un buen ajuste porque las pérdidas del drenaje disminuyeron por algunos problemas en la instalación del lisímetro. Al comparar los valores medidos y simulados del drenaje en GPCL2, se observó que el modelo tuvo un buen desempeño (Figura 5B). En ambos experimentos, la simulación se puede considerar como aceptable, como lo indican los coeficientes de correlación. Sin embargo, se debe notar que el primer experimento muestra una alta dispersión (panel de la derecha, Figura 5A) debido a problemas en la instalación del geotextil.

Algunos aspectos a analizar

Los resultados de este estudio confirman lo indicado por Rivera *et al.* (2012), de que los sensores ECHO20 pueden satisfacer la necesidad de mediciones

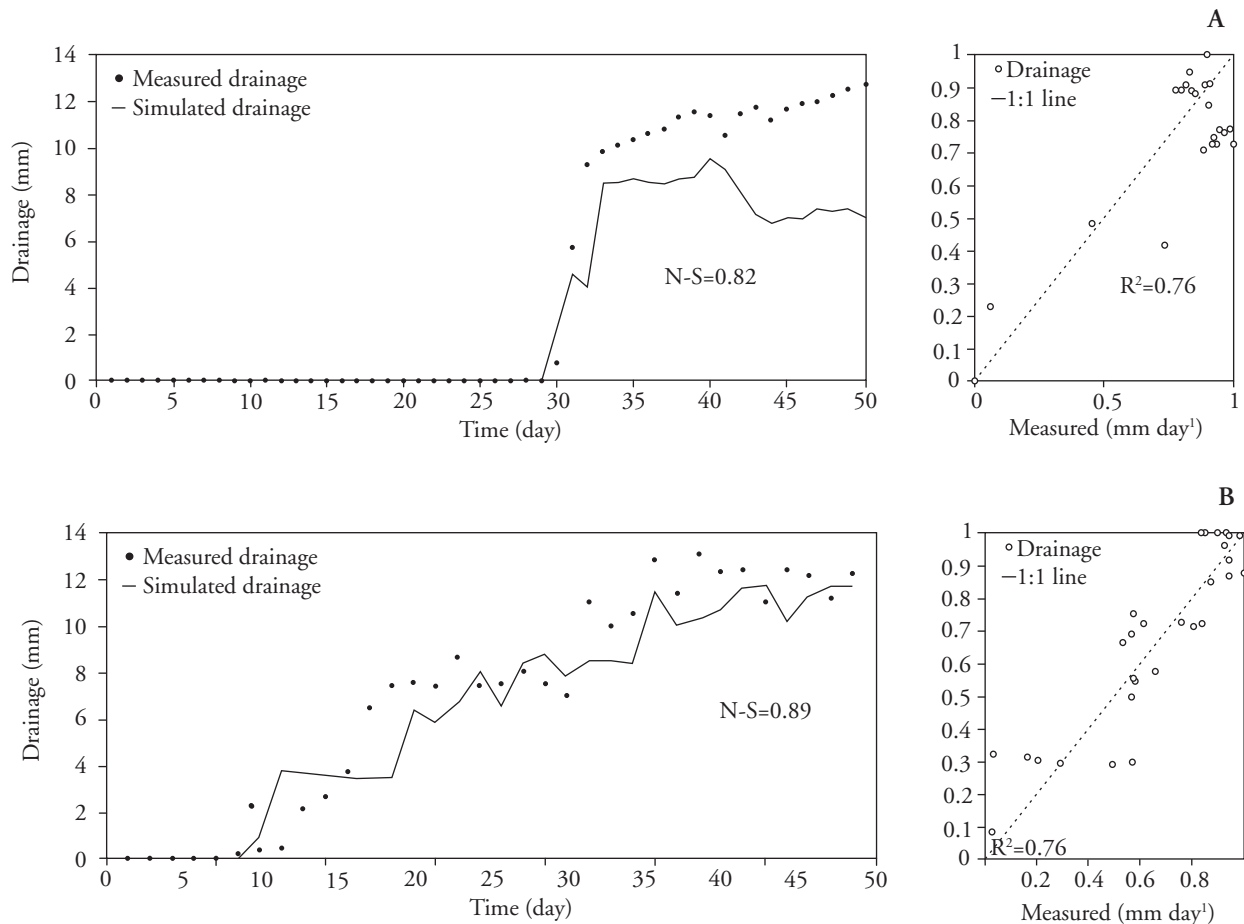


Figure 5. Measured and simulated drainage in GPCL1 from Nov 14, 2011 to Jan 3, 2012 (A). Measured and simulated drainage in GPCL2 from July 6 to August 8, 2012 (B).

Figura 5. Drenaje medido y el simulado en GPCL1 desde el 14 de noviembre de 2011 al 03 de enero de 2012 (A). Drenaje medido y el simulado en GPCL2 desde el 6 de julio al 8 de agosto de 2012 (B).

model is able to accurately represent the dynamics of water in each of the agricultural soil horizons, providing satisfactory and promising results. Bitelli *et al.* (2011) confirms that the model is able to provide indications of irrigation time and rate according to crop water stress and soil water content

CONCLUSIONS

Installation of the Gee Passive Capillary Lysimeter is the most complicated part of the process. Even using a disturbed soil column, reliable data was generated of the actual field condition. Due to the high sensitivity of the wick plate, the GPCL should be placed near the root zone to obtain reliable data of drainage. Monitoring soil water content by using

rápidas, el almacenamiento de una gran cantidad de datos, las mediciones *in situ* y las mediciones confiables de la humedad del suelo, lo cual permite interpretar procesos dinámicos, variables y complejos que no son factibles de ser medidos con un equipo convencional. Esto representa una herramienta valiosa para estudiar la zona no saturada. Sin embargo, es importante determinar el número de sensores a instalar para permitir registros adecuados de los niveles de humedad en la columna de suelo. En GPCL1, el uso de cuatro sensores no fue suficiente para registrar el avance del agua en los primeros 20 cm de profundidad para una aplicación de 5 mm d⁻¹. Pero un mayor número de sensores colocados en GPCL2 permitió un registro adecuado del avance del agua en los primeros centímetros de suelo.

sensors allowed completing the water balance, and it provided information on the variations in water content in the soil profile. The water balance closure obtained from the direct (direct measurement of drainage, stored water, pan evaporation, and irrigation), and indirect methods (ET assumption) were satisfactory.

When a rate of 5 mm water d^{-1} was applied in the second experiment, variations in the soil water content were recorded in the sensors located in the 8 layers due to the propagation of pressure waves. This poses a warning about the calibration of infiltration models since neither the Darcian flow theory nor simplified theories, such as the Green-Ampt method, do not include the effects of pressure waves.

The CRITERIA BdP model acceptably simulated the moisture content and drainage condition in relation to data measured in the soil column.

ACKNOWLEDGEMENTS

The main author wants to express his deepest gratitude to Dr© Haydée Osorio Ugarte for her time and useful comments in the revision of the present article (SENACYT-IFARHU-Panamá.). B Lahuathe was funded by INIAP of Ecuador scholarship for postgraduate researchers. This research was part of FONDECYT 11090032 and BMBF-CONICYT exchange program between the University of Concepcion, Chile, and the Leibniz University of Hanover, Germany.

LITERATURE CITED

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 65, United Nations Food and Agriculture Organization: Rome, Italy. 300 p.
- Arauzo, M., J. J. Martínez-Bastida, M. Valladolid, and J. A. Díez. 2010. Field evaluation of Gee Passive Capillary Lysimeter for monitoring drainage in non-gravelly and gravelly alluvial soils: A useful tool to estimate nitrogen leaching from agriculture. *Agric. Water Manage.* 97(3): 465-474.
- Bittelli, M., A. Pistocchi, F. Tomei, P. Roggero, R. Orsini, M. Toderi, G. Antolini, and M. Flury. 2011. 11 criteria-3d: A mechanistic model for surface and subsurface hydrology for small catchments. *Soil Hydrol. Land Use Agric. Measur. Model.* pp: 253.
- Farías, N. 1994. Física de Suelos, con Enfoque Agrícola. Editorial Trilla. México. 194 p.

El uso del modelo CRITERIA BdP se considera un avance importante para evaluar el balance hídrico y algunos parámetros usados para comparar los resultados obtenidos con los datos medidos. Tomei *et al.* (2008) consideran que este modelo puede representar con precisión la dinámica del agua en cada horizonte de suelo agrícola, al proporcionar resultados satisfactorios y prometedores. Bitelli *et al.* (2011) confirman que el modelo puede proporcionar indicaciones de tiempo y tasa de riego, de acuerdo con el estrés de agua del cultivo y el contenido de agua del suelo.

CONCLUSIONES

La instalación del lisímetro capilar pasivo Gee es la parte más complicada del proceso. Incluso al usar la columna de tierra removida, se generaron datos confiables de la real situación de campo. Debido a la alta sensibilidad de la mecha de fibra de vidrio, el GPCL debería estar colocado cerca de la zona de la raíz para obtener datos confiables del drenaje. El control del contenido de humedad del suelo usando sensores permitió completar el balance hídrico y se obtuvo información sobre las variaciones en el contenido de agua en el perfil del suelo. El cierre del balance hídrico obtenido de los métodos directos (medición directa del drenaje, agua almacenada, bandeja de evaporación y riego), y los métodos indirectos (el supuesto ET) fueron satisfactorios.

Para una tasa de aplicación de 5 mm de agua d^{-1} en el segundo experimento, se registraron variaciones en el contenido de humedad del suelo en los sensores situados en las ocho capas debido a la propagación de las ondas de presión. Esto da una advertencia acerca de la calibración de los modelos de infiltración, ya que ni la teoría del flujo de Darcy ni teorías simplificadas, como el método de Green-Ampt, incluyen los efectos de las ondas de presión.

El modelo CRITERIA BdP simuló aceptablemente el contenido de humedad y condiciones de drenaje en relación con los datos de mediciones en la columna de suelo.

—Fin de la versión en Español—



- Kang, S., and H. Lin. 2007. Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed. *J. Hydrol.* 338(1-2):1-14.
- Marletto, V., F. Ventura, G. Fontana, and F. Tomei. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agric. For. Meteorol.* 147: 71-79.
- Mite, F., J. Espinosa, R. Jaramillo, y S. Henríquez. 2010. Efecto de la aplicación de microessentials® en el crecimiento y desarrollo del banano en Babahoyo-Ecuador. IPNI Technical report.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3): 513-522.
- Nash, J., and J. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1-a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3): 282-290.
- Pistocchi, A., e F. Tomei. 2003. Un modello accoppiato 3D di runoff e deflusso nel mezzo poroso. Atti convegno AIAM, Bologna. Technical Report.
- Ramos, C., y M. Kücke 1999. Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas: 25-32. *In: Estudios de la zona no saturada del suelo.* Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA. La Laguna, Tenerife.
- Rivera, D., S. Granda, J. Arumí, M. Sandoval, and M. Billib. 2012. A methodology to identify representative configurations of sensors for monitoring soil moisture. *Environ. Monit. Assess.* 184: 6563-6574.
- Tomei, F., G. Antolini, M. Bittelli, V. Marletto, A. Pasquali, e M. Van Soetendaal. 2007. Validazione del modello di bilancio idrico CRITERIA. *Ital. J. Agrometeorol.* 1: 66-67.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5): 892-898.
- Villani, G., F. Tomei, R. Tomozeiu, and V. Marletto. 2011. Climatic scenarios and their impacts on irrigated agriculture in Emilia-Romagna, Italy. *Ital. J. Agrometeorol.* 1/2011: 5-16.