

Estimación de patrones diarios de consumo de agua por las plantas, con base en mediciones detalladas de humedad y temperatura a diferentes profundidades de suelo*

Estimating Diurnal Patterns of Water Uptake by Plants from Detailed Measurement of Moisture and Temperature at Different Soil Depths

Alvaro Acosta¹; Lester Simmonds²

RESUMEN

La técnica presentada en este trabajo integra la ecuación de balance de masas sobre diferentes estratos de suelo para estimar la variación en humedad en cada estrato, resultante de los flujos de agua, en forma líquida y en forma de vapor de agua a través de la matriz del suelo. Los gradientes de potencial matricial y temperatura que gobiernan los flujos de agua y vapor se estiman partiendo de mediciones continuas de humedad del suelo, para lo cual se utilizaron sensores de humedad Theta-probes (Delta-T Devices, Cambridge) y sensores de temperatura tipo ST1 (Delta-T Devices, Cambridge). Calibraciones específicas de los sensores fueron necesarias para cada suelo y profundidad. El procedimiento fue validado en suelo sin cultivo para dos lugares diferentes con condiciones de suelo y ambiente contrastantes en el Reino Unido y Colombia. Los valores estimados de la variación en el contenido de humedad, tanto horaria como acumulada, se compararon con valores medidos, encontrándose correlaciones altamente significativas con coeficiente r^2 en rangos de 0,61 a 0,76 para la estimación de la variación horaria y 0,89 a 0,97 para la estimación de variación acumulada. Para suelos con vegetación, la ecuación de balance de masa fue resuelta en función del efecto que tienen las raíces del cultivo sobre la variación total en el contenido de humedad en cada estrato del suelo. De esta forma fue posible estimar patrones diarios de consumo/eflujo de agua por la palma de aceite en dos lugares con diferentes condiciones edafoclimáticas contrastantes en Colombia. La estimación de los patrones diarios de consumo/eflujo de agua por la palma fue reproducible con un r^2 de 0,91. La técnica presentada abre nuevas posibilidades para un mejor entendimiento en la dinámica del agua en suelos cultivados.

SUMMARY

The technique presented in this paper integrates the mass balance equation over the soil layers to estimate the variation in soil moisture content in each layer resulting from the liquid water and vapour fluxes through the soil matrix. The matric potential and temperature gradients driving liquid water and vapour fluxes were estimated from continuous measurements of soil moisture using Theta-probes (Delta-T Devices, Cambridge) and ST1 (Delta-T Devices, Cambridge) temperature sensors. Soil specific calibrations of the instruments were required in order to measure the changes in soil moisture content. The procedure was validated in bare soil at two different sites with different soil and environmental conditions in the UK and Colombia. The hourly and cumulative estimated variation of soil moisture content was compared with measured values and significant correla-

- * Ponencia presentada en la XIII Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite. Cartagena, septiembre 6-8 de 2000.
1. Investigador Asociado. Cenipalma. Apartado Aéreo 252171. Bogotá, D.C... Colombia.
 2. Reader Department of Soil Sciences. University of Reading. Earley Gate, Reading, U.K.

tions were found between them with r^2 values ranging from 0.61 to 0.76 for the hourly estimations and 0.89 to 0.97 for the cumulative estimations. For vegetated soil, the mass balance equation was solved and used to determine the root water uptake/efflux. Diurnal patterns of water uptake/efflux were estimated for oil palm for two different sites and environmental conditions in Colombia. The estimated diurnal patterns were reproducible with an r^2 value of 0.91. The technique presented provides a means to study how matric potentials in the soil affect water uptake rates. Reductions in daily root water uptake by oil palms from 5 mm day^{-1} to 2 mm day^{-1} were observed as consequence of reduction in soil moisture to -160 kPa at 5 cm depth reflecting the sensitivity of the oil palm to water stress. This technique opens up possibilities for gaining a better understanding of water dynamics in crop systems.

Palabras claves: Palma de aceite, Agua del suelo, Balance hídrico, Humedad del suelo, Déficit de humedad, Modelos matemáticos.

INTRODUCCIÓN

El déficit de agua en el suelo ha sido ampliamente reconocido como uno de los principales factores limitantes de la producción en palma de aceite (Corley 1976). En Colombia, alrededor del 40% del área sembrada con palma de aceite requiere irrigación por lo menos durante algún período del año, pero hasta ahora, sin embargo, la dinámica del agua en sistemas de palma de aceite no ha sido estudiada en detalle y muy poco se conoce a cerca de la evapotranspiración y transpiración en plantaciones de palma de aceite y su dependencia del almacenamiento de agua en el suelo. Algunos estudios han sido realizados por Dufrene et al. (1992), Henson (1998 a, b) y Foong (1993, 1999). El crecimiento, el desarrollo y eventualmente la producción de la palma de aceite son afectados por limitaciones en el suministro de agua (Corley1976; Chang et al. 1985; Foong 1991).

Dufrene et al. (1992), en estudios realizados en la Estación Experimental de La Mé, en Costa de Marfil, estimó cambios estacionales en la evapotranspiración (E), medida utilizando el método de balance de agua y la transpiración por el follaje (T), encontrando que con altos contenidos de humedad en el suelo, la tasa de evapotranspiración por el cultivo correspondía al 81 % de la evapotranspiración potencial estimada mediante la ecuación de Penman - Montieith, mientras que durante la estación seca este valor se redujo a 0,56 para la evapotranspiración actual sobre la potencial, mientras que la transpiración por el cultivo correspondía sólo al 35% de la evapotranspiración potencial. Igualmente, reportaron cómo cuando el agua en los primeros 80 cm del

perfil de suelo disminuía a cerca del 35% de la capacidad de almacenamiento, la evapotranspiración actual disminuía a cerca del 10% de la potencial y la conductancia estomática en las hojas de la palma disminuía drásticamente a cerca de $1,5 \text{ mm s}^{-1}$.

Foong (1993), con base en estudios realizados en Malasia utilizando un lisímetro, reportó un promedio anual de evapotranspiración con rangos de $2,2$ a $4,7 \text{ mm día}^{-1}$ para los primeros dos años de desarrollo del cultivo, llegando a cerca de $6,9 \text{ mm día}^{-1}$ a la edad de 22 años con valores de 3 mm día^{-1} durante los meses de diciembre y enero y valores entre $7,0$ y $8,0$ durante el resto del año. Henson (1998), utilizando medidores de flujo de savia, observó patrones diarios de transpiración en palma de aceite, encontrando un patrón bimodal con un posible cerramiento de estomas cerca del mediodía, debido posiblemente a un elevado déficit de presión de vapor en la atmósfera alrededor de las hojas de la palma.

Como se puede ver, hasta ahora las técnicas utilizadas para estimar el consumo de agua por las plantas han sido orientadas a medir diferentes parámetros en la planta y relacionarlos con las tasas de transpiración. Desde el punto de vista del suelo, la cantidad de agua utilizada por la planta en un determinado estrato del suelo por unidad de tiempo debe ser igual al valor residual resultante de integrar la ecuación de balance de agua para el mismo estrato de suelo para el mismo período de tiempo.

Si el suelo se divide en estratos hasta una profundidad similar a la de las raíces más profundas,

la integración de la ecuación de balance de agua sobre el conjunto de estratos de suelo entregará un valor residual comparable a la tasa de consumo de agua.

Existen algunos factores a tener en cuenta para obtener este valor residual:

- a) Es indispensable contar con mediciones detalladas y muy precisas de la variación en el contenido de humedad del suelo a diferentes profundidades en el perfil. Esta información es básica para estimar los gradientes de potencial matricial entre los estratos de suelo, los cuales gobiernan los flujos de agua en forma líquida, así como los flujos isotérmicos de vapor.
- b) Es necesario contar con mediciones precisas y detalladas de la variación de temperatura en el perfil del suelo. Los gradientes de temperatura gobiernan los flujos térmicos de vapor de agua.
- c) Es necesario utilizar modelos matemáticos que permitan estimar con precisión la contribución de los flujos de vapor de agua y de agua líquida en el cambio total en el contenido de humedad en cada estrato del suelo.

DESCRIPCIÓN GRÁFICA DEL MÉTODO

En un suelo sin cultivo, los flujos de agua en sus fases líquida y gaseosa son responsables de la variación neta en el contenido de humedad en un estrato determinado del perfil.



Figura 1 Descripción gráfica del método de análisis de flujos

Esta variación se puede expresar matemáticamente como

$$\Delta \theta_{total} = \Delta \theta_{qv} + \Delta \theta_{ql} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde $\Delta \theta_{total}$ es el cambio total en el contenido de humedad en un estrato determinado del perfil, $\Delta \theta_{qv}$ es el cambio en el contenido de humedad debido a los flujos de vapor, $\Delta \theta_{ql}$ es el cambio en los contenidos de humedad debido a los flujos de agua líquida.

De este modo, la estimación de la contribución de cada flujo calculado mediante los modelos matemáticos en el cambio neto en la humedad, puede ser verificado por comparación con valores de la tasa de cambio medidos durante los mismos intervalos de tiempo.

La técnica integra la ecuación de balance de masas a través de los diferentes estratos de suelo mediante el siguiente modelo propuesto por Daamen y Simmonds (1996).

Cada nivel de suelo está definido por la posición de tres sensores, y el grosor del estrato corresponde a la distancia entre el sensor central y el punto medio entre este y los sensores superior e inferior.

Modelos matemáticos utilizados para estimar los flujos de agua

Los siguientes parámetros son requeridos por el modelo:

- Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$).
- Porosidad total (dimensionada en fracción de volumen).
- Distribución del tamaño de partículas (fracciones de arena, limo y arcilla).
- Conductividad hidráulica saturada ($m\ s^{-1}$).

- Potencial matricial a capacidad de campo (kPa) y valor de b determinados como funciones de la curva de retención de humedad (Campbell 1985).

Estos parámetros son determinados en el laboratorio.

Los valores de humedad y temperatura son tomados cada 10 minutos y promediados cada 30 minutos para cada estrato del perfil de suelo. Los valores de humedad obtenidos con los Theta-probe en mV son transformados a humedad volumétrica, aplicando las curvas de calibración específicas para cada suelo.

Estimación de los flujos de agua en suelos no saturados

El modelo utiliza la ecuación básica propuesta por Campbell (1985) para calcular el flujo de agua líquida.

$$q_i = -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Con base en los valores de b y el potencial matricial a capacidad de campo, obtenidos de la curva de retención de humedad, el potencial matricial a cada profundidad se calcula cada 30 minutos en función del contenido de humedad, utilizando la ecuación propuesta por Campbell (1985):

$$\psi = \psi_c \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^b \quad \text{Ecuación 4}$$

El efecto de la temperatura en la tensión superficial del agua, utilizando la regresión propuesta por Campbell (1985), y su efecto en el potencial matricial se calcula mediante la ecuación propuesta por Milly (1982). El efecto de la temperatura en la densidad y viscosidad del agua se estima mediante la regresión polinomial propuesta por Campbell (1985). La conductividad hidráulica en función de la temperatura del agua se calcula mediante la ecuación propuesta por Milly (1982).

Para los subsecuentes cálculos, el potencial matricial ψ_T así como la conductividad hidráulica K_T son referidos en función del contenido volu-

métrico de humedad θ teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en las propiedades del agua.

Teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en las propiedades del agua, el flujo de agua líquida se puede expresar según la Ley de Darcy como:

$$q_i = -K_T \left(\frac{\Delta \psi_T}{\Delta z} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde Δ se refiere a la diferencia entre estratos de suelo adyacentes. El flujo se calcula en unidades de m s^{-1} . El signo en el valor del flujo indica la dirección del mismo, y es definido por la dirección del gradiente de potencial matricial. De esta forma, los valores negativos indican flujos ascendentes y los valores positivos indican flujos descendentes. El flujo neto en un estrato de suelo está dado por la diferencia entre los flujos en los límites superior e inferior del nivel en cuestión. El flujo neto es expresado en términos de profundidad equivalente de agua como fracción de la profundidad total del estrato de suelo, lo cual es equivalente al contenido de humedad como fracción de volumen.

Cálculo del flujo de vapor en el suelo

Para propósitos de cálculo, el flujo de vapor se divide en flujo térmico, gobernado por el gradiente de temperatura y presión de vapor, y flujo isotérmico, gobernado por gradientes de potencial matricial según los modelos propuestos por Miyazaki (1993) Nassar et al. (1996).

$$q_v = -D_{\theta} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T \quad \text{Ecuación 6}$$

El flujo isotérmico de vapor de agua $q_{\theta\Delta}$ se calcula mediante el modelo sugerido por Cary (1966), Schieldege et al. (1982), Katul et al. (1997), Shielde et al. (1998) y Cahill y Parlange (1998).

$$q_{\theta\Delta} = \frac{\alpha D_v \theta_a \rho_v}{(RT \rho_l)} \frac{\partial \psi_T}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{Ecuación 7}$$

La presión de vapor ρ_v (con unidades de kg m^{-3}) se calcula mediante el modelo propuesto por Phillip and de Vries (1975).

$$\rho_v = \rho_{vs} \exp\left(\frac{\psi_r M}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

donde ρ_{vs} es la presión de vapor saturado en función de la temperatura, M es el peso molar del agua ($0,018 \text{ kg mol}^{-1}$), R es la constante universal de los gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), y T es la temperatura en grados Kelvin.

El flujo térmico de vapor de agua se calcula para las condiciones de cada intervalo de tiempo usando el modelo propuesto por Cahill y Parlange (1998).

$$q_{TV} = \alpha \theta_a D_v \eta \frac{\partial \rho_{vs}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde θ_a es el contenido volumétrico de aire en el suelo, α es la tortuosidad y η es el factor de incremento del flujo.

La difusión del vapor de agua en el aire (con unidades de $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) en función de la temperatura se calcula usando la ecuación de Milly et al. (1984).

$$D_v = 0,229 \left(1 + \frac{T}{273}\right)^{1,75} \quad \text{Ecuación 10}$$

La presión de vapor saturado P_{vs} (con unidades de kg m^{-3}) en función de la temperatura se calcula para cada estrato de suelo y en cada intervalo de tiempo usando la ecuación de Campbell (1985).

$$\rho_{vs} = \frac{\exp\left(31,3716 - \frac{6014,79}{T} - 0,007924T\right)}{1000T} \quad \text{Ecuación 11}$$

El factor de tortuosidad es definido por Campbell (1985) como:

$$\alpha = (n - \theta)^{2/3} \quad \text{Ecuación 12}$$

La dimensiones del factor de incremento de flujo son calculadas mediante la ecuación propuesta por Cass et al. (1984).

$$\eta = 8 + 3\theta / \theta_{sat} - 7 \exp\left(10 \theta / \theta_{sat}\right)^3$$

Ecuación 13

El flujo neto de vapor entrando y saliendo del estrato, analizado por unidad de tiempo, se divide por el grosor del estrato para obtener el cambio en humedad volumétrica del estrato.

VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA EN CAMPO

Con el fin de validar la técnica en diferentes condiciones edafoclimáticas, el experimento se replicó en el Reino Unido y en Colombia.

El primer experimento tuvo lugar en terrenos de la estación meteorológica ubicada en el campus de la Universidad de Reading, en Earley Gate, Reading, U.K. La posición satelitalmente georreferenciada del sitio es $51^\circ 26'28,8''$ Norte $0^\circ 56' 09,6''$ Oeste.

En el sitio, dos metros cuadrados de pastos fueron totalmente removidos dejando el suelo desnudo. En este espacio se excavó una trinchera de $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0,4\text{m}$ de profundidad. Un juego de seis Theta-probes se instaló a 1, 5, 15, 20, 25 y 30 cm de profundidad en una de las paredes de la trinchera. Los Theta-probes se insertaron 6 cm en la pared. Justo al lado de cada Theta-probes, se instaló un juego de seis sensores de temperatura a la misma profundidad de los sensores de humedad. Todos los instrumentos se conectaron a un colector de datos tipo CR10 Campbell acondicionado con un multiconector de 32 canales. Entre abril y noviembre de 1999, cada hora se colectaron mediciones de temperatura y humedad.

Los sensores de humedad Theta-probe Mlx utilizados son desarrollados por Delta T Devices (Cambridge U.K) (Gasking y Miller 1996), y están basados en la técnica denominada Time Domine Reflectometry (TDR) que ha sido ampliamente estudiada por Top et al. (1980), Wang y Shmugge (1980), Zegelin et al. (1992) Petersen et al. (1996), Yu et al. (1999), Nadler et al. (1999) Warrick y Conklin (1999), Or et al. (1999).

A cada profundidad se colectaron muestras de suelo no disturbadas, sobre las cuales se determinaron los parámetros físicos del suelo. Las muestras se tomaron con cilindros de PVC de 5 cm de alto por 4 cm de diámetro y luego se cortaron en submuestras de 2,2 cm de alto.

Determinación de los parámetros físicos en el laboratorio

- 1) Curva de retención de humedad en mesa de succión (50, 100, 150, 200 cm succión).
- 2) Curva de retención de humedad en ollas de presión (30, 100, 500, 1000, 1500 kPa).
- 3) Conductividad hidráulica saturada por el método de cabeza constante.
- 4) Densidad aparente.
- 5) Distribución de tamaño de partículas.

La segunda replicación del experimento se realizó en la plantación de palma de aceite Santa Bárbara de Unipalma de los Llanos, localizada a 65 kilómetros de la localidad de Cumaral, en el departamento del Meta, en Colombia. La plantación fué establecida en el año de 1982 con material Unilever.

La posición del sitio, georreferenciada por satélite, es 4° 19'01" Norte, 73° 13' 55" Oeste, al final de un lote comercial de palma, y a 100 m de la estación meteorológica. Las plantas más cercanas eran palmas de aceite localizadas a 10

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo en Earley Gate, Reading, UK.

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	Densidad aparente	θ_{sat}	ψ_t	h	K_{sat}
		g g ⁻¹			g cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	kPa		m s ⁻¹
0-5	0,66	0,17	0,17	Franco Arenoso	1,167	0,559	-0,26	5,38	6,67E-05
5-10	0,62	0,21	0,18	Franco Arenoso	1,146	0,568	-0,37	5,09	4,67E-05
10-15	0,65	0,19	0,16	Franco Arenoso	1,222	0,539	-0,31	4,65	5,00E-05

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo en el sitio del experimento en Santa Bárbara, Cumaral, Colombia.

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	Densidad aparente	θ_{sat}	ψ_t	h	K_{sat}
		g g ⁻¹			g cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	kPa		m s ⁻¹
0-5	0,35	0,28	0,38	Arcilloso	1,434	0,462	-1,05	9,89	1,12E-05
5-10	0,37	0,25	0,38	Arcilloso	1,392	0,573	-1,03	9,44	4,98E-06
10-20	0,40	0,24	0,36	Arcilloso	1,474	0,402	-0,82	8,67	3,73E-06
20-30	0,39	0,29	0,32	Clay loam	1,526	0,424	-0,64	7,79	1,17E-05
30-40	0,51	0,23	0,26	Franco arcillo arenoso	1,523	0,425	-0,61	7,12	1,24E-05
40-50	0,35	0,33	0,31	Franco arcilloso	1,610	0,392	-0,75	8,17	4,98E-06
50-60	0,30	0,29	0,41	Arcilloso	1,518	0,427	-0,89	9,75	1,13E-06

m del sitio. Una trinchera de 1 m x 1 m x 0.8 m se excavó y la pared opuesta a la palma más cercana se seleccionó para colocar los sensores. Los Theta-probes y los sensores de temperatura se colocaron a 1, 5, 20, 40, 55 a 60 cm de profundidad en la misma forma descrita para la replicación uno. Igualmente, muestras de suelo no disturbado se tomaron a cada profundidad para determinar los parámetros físicos del perfil de suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas del suelo

Las Tablas 1 y 2 presentan las características físicas de los suelos en los sitios experimentales en Earley Gate (Tabla,1) y en Santa Bárbara (Tabla 2).

Como se puede observar, las características de los suelos son muy diferentes en cuanto a la magnitud de los posibles flujos de agua y vapor, por lo tanto pueden proveer un buen indicador de la capacidad de la técnica para estimar con precisión dichos flujos.

Variaciones diurnas en el perfil de temperatura del suelo

La Figura 2 presenta un ejemplo de las fluctuaciones diurnas en el perfil de temperatura del suelo en Santa Bárbara, Colombia y Earley Gate U.K.

Como se puede observar en la Figura 2, la máxima amplitud de la variación en temperatura se presenta a 1 cm de profundidad en Earley Gate Reading,UK, (23 K), mientras que en Santa

Bárbara, Cumaral la variación es de apenas 6 K.

Variaciones diurnas en el contenido de humedad volumétrica a diferentes profundidades

Como se puede observar en la Figura 3, el suelo en **Earley Gate** presenta mayores fluctuaciones en humedad que el suelo en Santa Bárbara, Cumaral. Esto es explicable dada la baja densidad aparente y, **por** ende, mayor porosidad total de los suelos en Earley Gate, permitiendo un mayor flujo de vapor a través de la matriz del suelo.

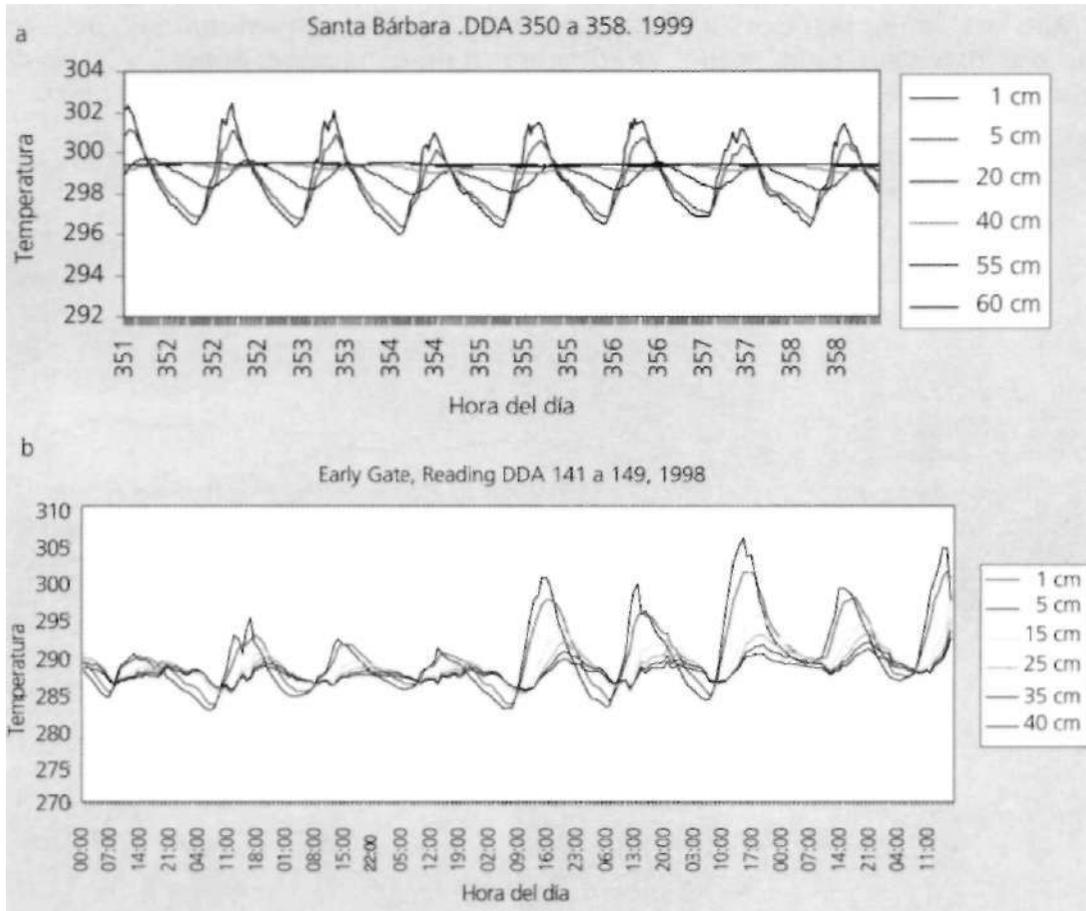


Figura 2. Variaciones diurnas en el perfil de temperatura en a)Santa Bárbara Colombia y b)Earley Gate, Reading, U.K.

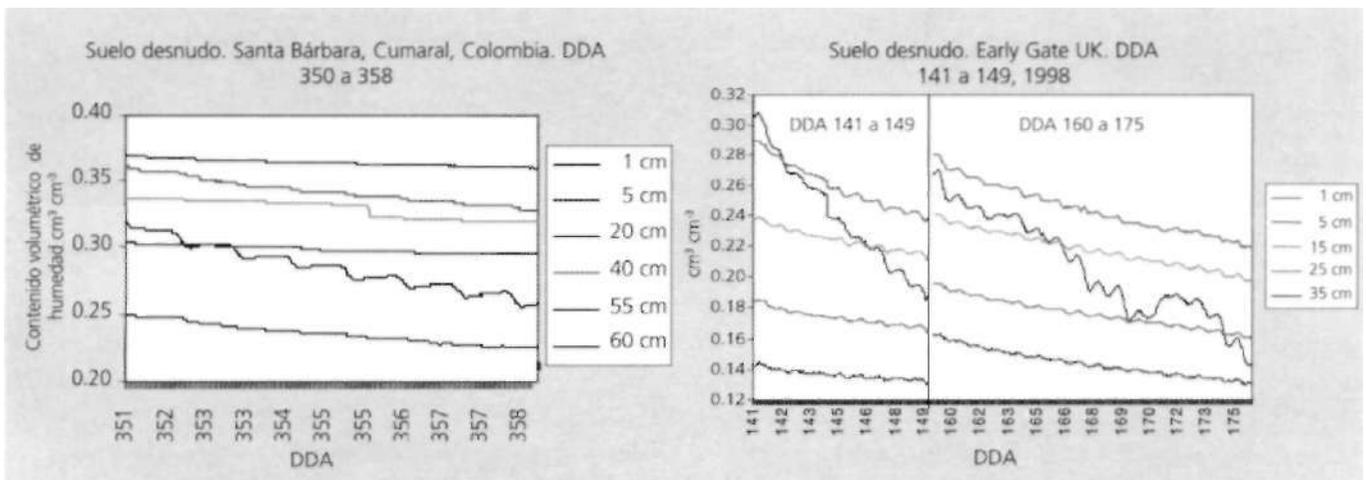


Figura 3 Variaciones diurnas en humedad del suelo en Santa Bárbara Colombia y Earley Gate U.K.

Salidas del modelo: gradientes y flujos

Con el fin de ilustrar cómo el modelo representa los gradientes tanto de temperatura como de humedad, y los correspondientes flujos de agua en forma líquida como los flujos térmicos e isotérmicos de vapor, dos días de seguimiento fueron seleccionados de la base de datos corres-

pondientes a Santa Bárbara, Cumaral. La siguiente serie de figuras ilustra el proceso.

Como se ilustra en la Figura 4a, se presenta un gradiente de potencial matricial con signo positivo entre 1 y 5 cm de profundidad, pero un gradiente con signo negativo entre 5 y 20 cm de profundidad. El gradiente positivo en el estrato

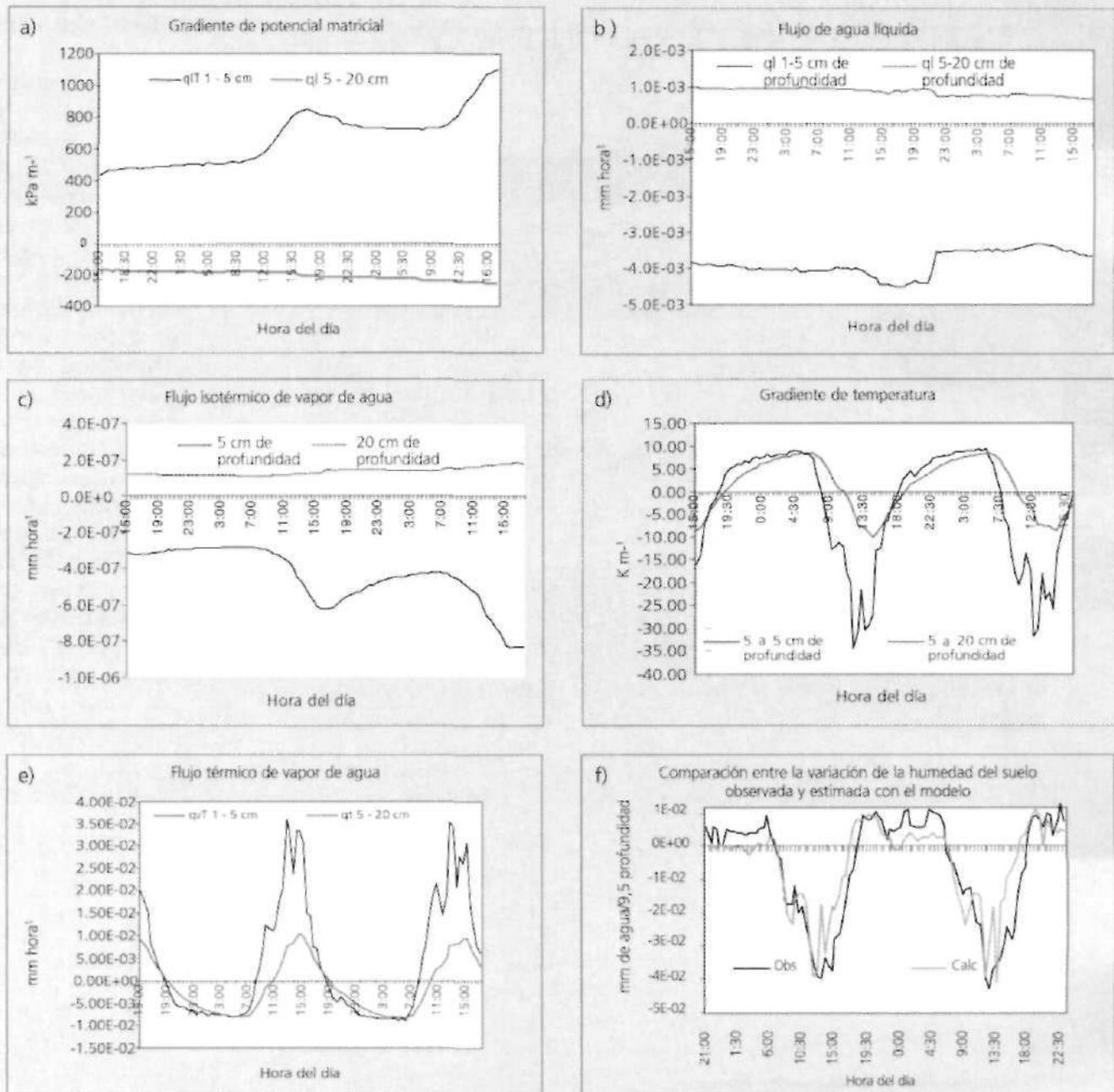


Figura 4 Representación detallada del proceso de simulación, a) Gradientes de potencial matricial, b) Flujo isotérmico de agua líquida, c) Flujo isotérmico de vapor de agua, d) Gradientes de temperatura, e) Flujos térmicos de vapor de agua f) Cambios en contenido de humedad observados y simulados.

superior indica un potencial matricial más negativo a 1 cm que a 5 cm y por lo tanto un flujo de agua líquida ascendente desde 5 cm hacia la profundidad de 1 cm. Este flujo ascendente se ilustra con signo negativo en la Figura 4b. En contraste, el gradiente de potencial matricial entre 5 y 20 cm de profundidad presenta valores negativos, indicando que el potencial matricial a 5 cm de profundidad es menos negativo que a 20 cm, induciendo un flujo de agua líquida desde los 5 cm de profundidad hasta el estrato ubicado a 20 cm de profundidad. El flujo descendente se ilustra en la figura con valores negativos. El flujo isotérmico de vapor gobernado por los gradientes de potencial matricial presentan la misma dirección que los flujos de agua en forma líquida como se observa en la figura 4c. La Figura 4d ilustra los gradientes de temperatura entre 1 y 5 cm y entre 5 y 20 cm de profundidad. El gradiente de temperatura en el perfil de suelo presenta un ciclo diario con valores positivos durante la noche, cuando la temperatura en la superficie del suelo es menor que en los estratos inferiores, y valores negativos durante el día, cuando la temperatura en la superficie del perfil es mayor que en los estratos profundos. El ciclo diario en el gradiente de temperatura produce variaciones en la dirección de los flujos térmicos de vapor de agua fluyendo en dirección ascendente o descendente dependiendo de la dirección del gradiente como se ilustra en la Figura 4e. La variación diaria en el gradiente de temperatura así como su efecto en la dirección de los flujos térmicos de vapor está bien explicados por el modelo como se puede observar al comparar las Figuras 4d, y 4e. La Figura 4f compara la variación observada mediante

las mediciones directas con los Theta-probes y la estimada mediante el uso de los modelos matemáticos del cambio neto en el contenido de humedad en el estrato. Como se puede observar, la variación estimada mediante la aplicación del modelo representa razonablemente bien la variación observada.

Comparación entre los cambios en humedad del suelo estimados y observados

La variación diaria en la humedad del suelo sin cultivo se estimó utilizando el modelo para la base de datos colectada en Earley Gate, Reading, durante los días 141 a 149 y 160 a 175 de 1999. La Figura 5 presenta la comparación entre la variación estimada y observada a diferentes profundidades.

La Figura 6 presenta la comparación directa y la regresión lineal de los cambios en la humedad del suelo estimados y observados.

Como se ilustra en la Figura 6, aunque se presenta una correlación significativa entre los valores estimados y observados, el modelo sólo explica el 60% de la variación horaria a 5 cm de profundidad y el 71% de la variación a 15 cm. Utilizando este análisis simple, cualquier desplazamiento en tiempo en los valores estimados produce una reducción significativa en el coeficiente r^2 y esto puede ser resultado de errores en la determinación de la humedad, debido a los cambios en temperatura del suelo con respecto a la temperatura de calibración de los sensores. Como se puede observar en la Figura

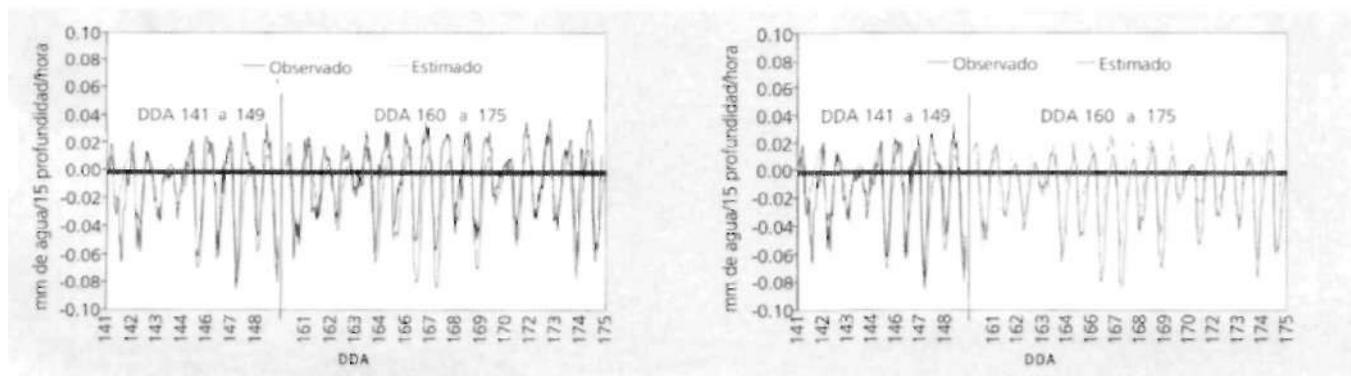


Figura 5 Cambios diarios observados y estimados a 5 y 15 cm de profundidad en suelo sin cultivo en Earley Gate, Reading, U.K. DDA 141 a 149 y 160 a 175 1999.

6, la distribución de los errores en la estimación presenta una distribución similar a lado y lado de la línea de regresión, lo cual indica que algunas veces el modelo sobrestima la variación y otras veces la subestima, pero tanto el número como la magnitud de los valores sobrestimados es similar al número y magnitud de los valores subestimados.

La comparación de la variación estimada y observada acumulada en la humedad es un análisis alternativo que permite analizar la distribución del error en el modelo y el comportamiento del modelo sobre períodos largos de tiempo.

Esta clase de análisis puede eliminar las diferencias entre los valores observados y estimados que pueden aparecer en análisis hora a hora, debido a pequeños desplazamientos temporales entre las observaciones y las predicciones en se-

ries de tiempo. La Figura 7 presenta la regresión lineal de los valores observados y estimados acumulados de la variación en el contenido de humedad a diferentes profundidades para la base de datos obtenida en Earley Gate, Reading, UK.

La mayor parte del tiempo las líneas son paralelas con relación 1:1, indicando que la tasa de variación en humedad del suelo está generalmente bien simulada. Existen períodos cortos, donde la gráfica presenta pendientes mayores o menores a la relación 1:1. Estas variaciones en la pendiente podrían estar explicadas por varias razones. Pueden ser reflejo de los cortos desplazamientos temporales comentados anteriormente, o podrían ser causados por el factor de incremento en el flujo térmico de vapor, el cual, según la función propuesta por Cass et al. (1984), depende del contenido de humedad del suelo. Como se presenta en la Figura 7, acumulando las varia-

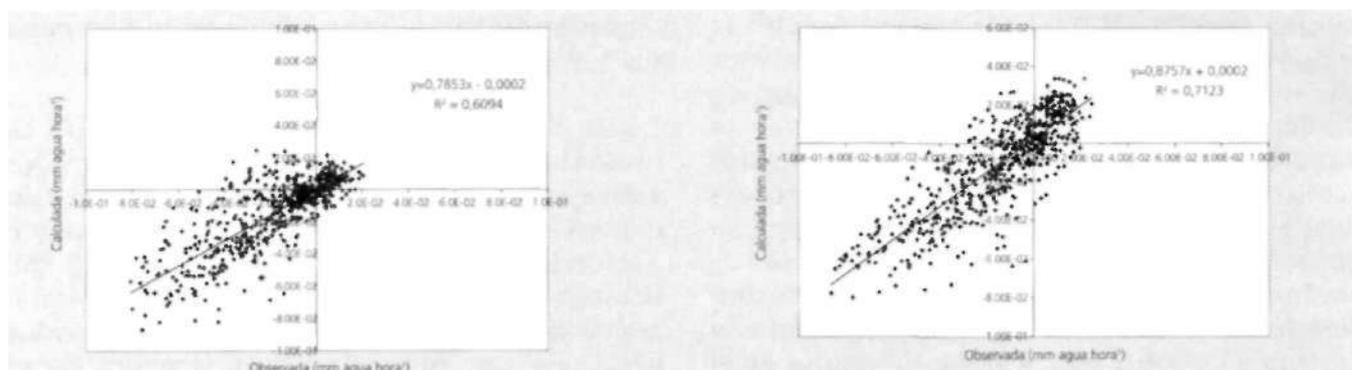


Figura 6. Regresión lineal de los valores de cambio de humedad del suelo estimados y observados en suelo sin cultivo a 5 y 15 cm de profundidad en el perfil de suelo sin cultivo Earley Gate, Reading, UK.

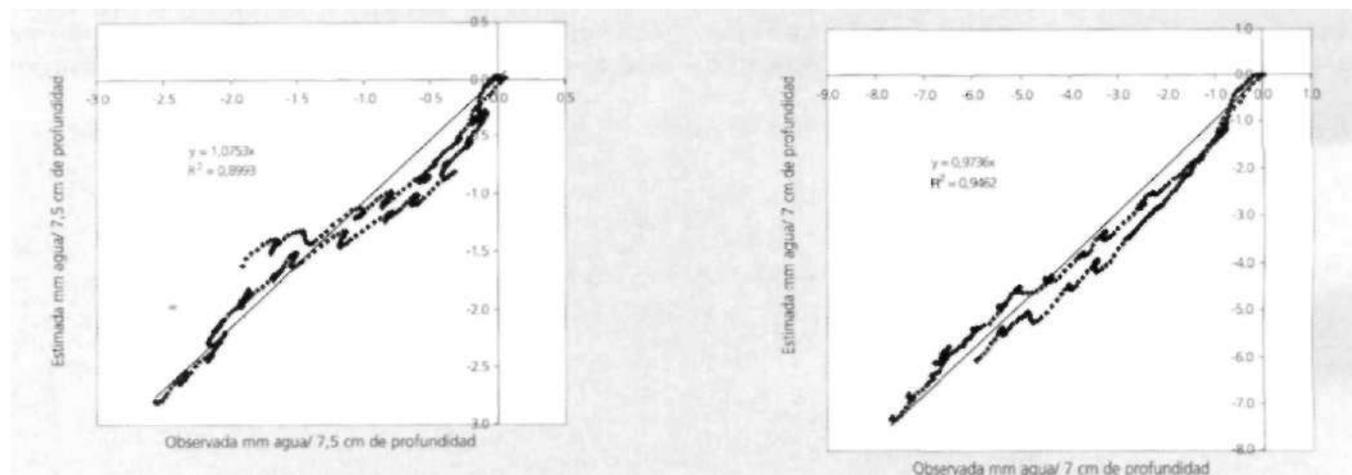
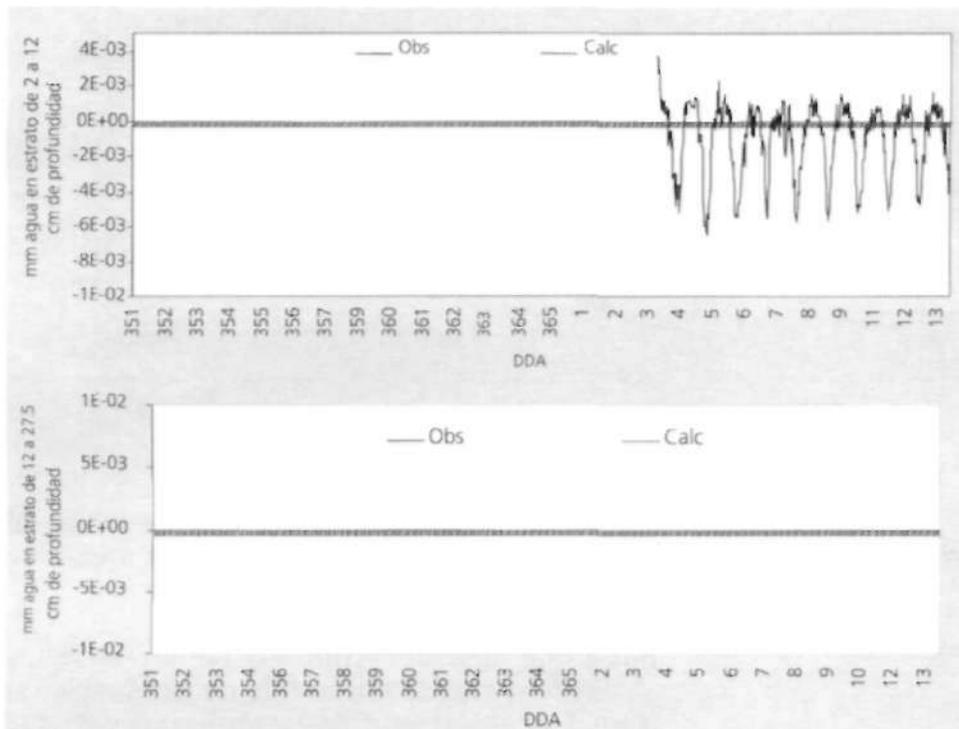


Figura 7. Regresión lineal de la variación en el contenido de humedad acumulada observada y calculada a 5 y 15 cm de profundidad en el perfil de suelo sin cultivo. Earley Gate, Reading UK.



remarcablemente bien expresada por el modelo.

Para la replicación llevada a cabo bajo las condiciones de suelo en Colombia, la Figura 8 ilustra las variaciones horarias en contenido de humedad observadas y simuladas a 5 y 15 cm de profundidad para el período comprendido entre los días 354 de 1999 y 012 de 2000 en suelo sin cultivo.

Como se puede observar, para la replicación conducida en Colombia las variaciones en el contenido de humedad del suelo, estimadas a las dos profundidades estudiadas, coinciden razonablemente bien con las observadas. La Figura 9 muestran la comparación

Figura 8. Cambios diurnos observados y estimados a 5 y 15 cm de profundidad en suelo sin cultivo en los estratos de 3 a 12,5 cm y de 12,5 a 27,5 cm de profundidad. Santa Bárbara, Cumaral, Colombia DDA 354 de 1999 a 012 de 2000.

ciones horarias, la distribución de los errores del modelo alrededor de la regresión lineal es ahora menor que con el análisis de la variación horaria. Esto significa que algunas de las sobrestimaciones son eliminadas por subestimaciones. La relación entre los valores observados y estimados es muy cercana a 1 y el modelo explica el 94% de la variación. Es evidente que a largo plazo (en períodos de varios días) la estimación de la pérdida acumulada de humedad en el suelo es

directa entre los valores observados y estimados mediante la aplicación del modelo para el período indicado a 5 y 15 cm de profundidad respectivamente.

La Figura 10 ilustra la regresión lineal de la variación acumulada observada y estimada para los estratos de suelo de 3 a 12,5 y 12,5 a 30 cm de profundidad para los suelos de Santa Bárbara, Cumaral, Colombia.

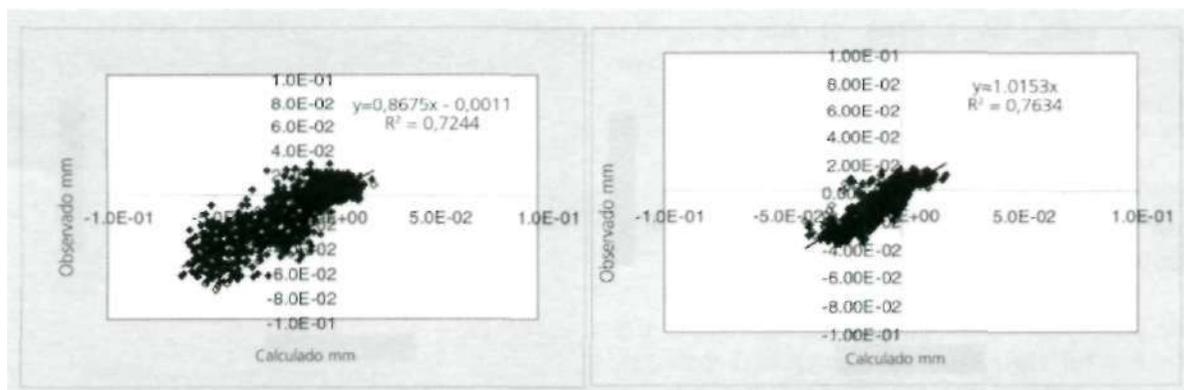


Figura 9. Regresión lineal de los valores de cambio en la humedad de! suelo observados y estimados para los estratos de 3 a 12.5 cm y de 12.5 a 30 cm de profundidad en suelo sin cultivo. Santa Bárbara.Cumaral, Colombia.

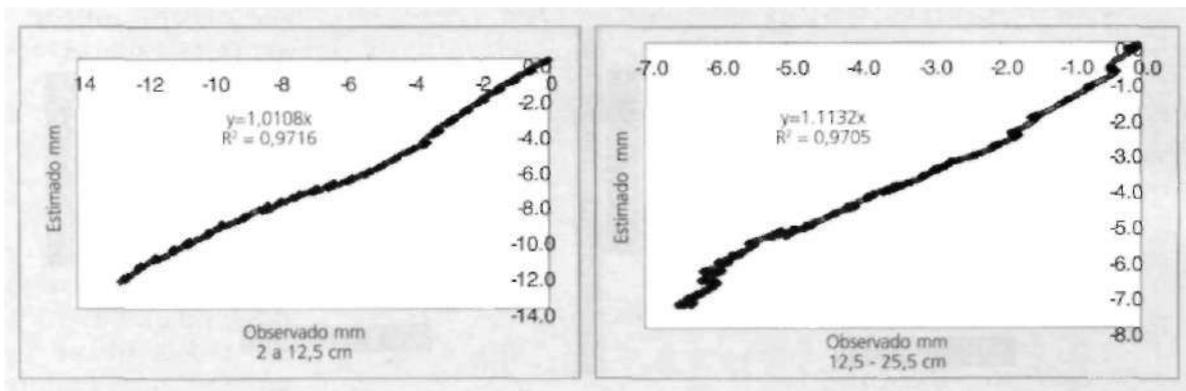


Figura 10. Regresión lineal de la variación acumulada en la humedad del suelo sin cultivo en los estratos de 3 a 12,5 cm y de 12,5 a 30 cm de profundidad. Santa Bárbara, Cumaral, Colombia.

Como se observa en la Figura 10, en la replica conducida en Santa Bárbara, Cumaral, los errores en la estimación de la variación acumulada en el contenido de humedad del suelo son consistentes con los encontrados en la replica conducida en Earley Gate, Reading, U.K.

ESTIMACIÓN DE PATRONES DIARIOS DE CONSUMO DE AGUA POR LA PALMA DE ACEITE

Una vez validado el método de simulación de las variaciones en la humedad en diferentes estratos del perfil de suelo debidas a los flujos de agua en sus formas líquida y gaseosa, mediante la comparación de la variación observada y simulada, se procedió a instalar el sistema en suelo cultivado con palma de aceite. En esta ocasión, la única incógnita en la ecuación de balance de masas es la variación en el contenido de humedad generado por el consumo/eflujo de agua por parte de las raíces del cultivo, el cual se puede calcular como el valor residual entre la variación medida y la estimada debido a los flujos de agua líquida y vapor de agua a través de la matriz del suelo.

El siguiente diagrama ilustra el principio básico del método utilizado.

Como se presenta en el diagrama, los flujos de agua en forma líquida, representados por las flechas ↑, son calculados mediante la aplicación de la Ley de Darcy, el flujo de vapor de agua, representado por las flechas ⇄, se calcula

mediante la aplicación de la Ley de Fliks; el cambio total en la humedad se mide mediante los sensores de humedad.

Dado que la verificación independiente de la absorción de agua por la raíz no es factible, se planeó un experimento para verificar la similitud entre los patrones de consumo de agua, estimado con dos series de equipos localizados en condiciones similares.

Materiales y Métodos

En la plantación El Carmen, Codazzi (Cesar), se seleccionó el lote A5. La posición georreferenciada del sitio es 09° 57' 56,4" N y 73° 15' 57,1" W.

El lote fue sembrado con material de origen Papua en 1995, sembrado en triangulo a 9 m entre palmas. Dentro del lote se seleccionó la

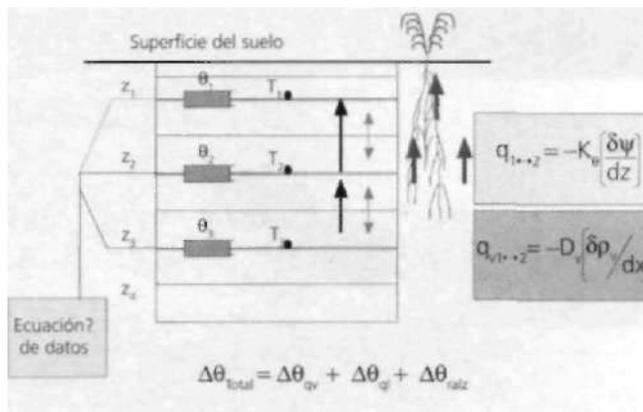


Figura 11 Descripción diagramática del método de análisis de flujos en suelos cultivados.

línea 41 y en ésta el sitio escogido fue el punto medio entre las palmas 6 y 7. En este punto se excavó una trinchera dejando uno de los lados sin disturbar. Dos series de cuatro Theta-probes ML2x y cuatro sensores de temperatura del tipo ST1 ambos producidos por la firma Delta-T Devices, Cambridge, UK fueron instalados. Los sensores se instalaron a 1, 5, 25 y 30 cm de profundidad en la pared no disturbada de la trinchera. La distancia horizontal entre las series de sensores fue de 10 cm. A cada una de las profundidades se tomaron muestras de suelo no disturbadas. Una vez los instrumentos fueron instalados, la trinchera se cubrió con el suelo extraído.

Los sensores se conectaron a un "data logger" tipo DI2e data-logger (Delta-T Devices, Cambridge, UK). El colector de datos se programó para hacer lecturas cada 10 minutos y calcular promedios cada 30 minutos. Se tomaron lecturas entre Julio 28 y Noviembre 26 de 1999. Con las muestras de suelo no disturbadas se determinaron, en laboratorio, la densidad aparente, la distribución de tamaño de partículas, la conductividad hidráulica saturada, y se hicieron curvas de retención de humedad para establecer los valores de b y el potencial matricial a capacidad de campo.

Resultados

Propiedades físicas del suelo

Con los parámetros físicos del suelo, así como con la información colectada mediante los sensores de humedad y temperatura, aplicando el modelo de análisis de flujos propuesto y resolviendo la ecuación de balance de masas para cada estrato del suelo cada 30 minutos, y utilizando los valores

residuales de la ecuación de balance de masas en cada período de tiempo se construye el patrón diario de consumo de agua por la palma de aceite para cada una de las repeticiones.

La Figura 12 presenta la comparación de los patrones estimados en cada repetición.

Como se puede observar, los patrones diarios de consumo son muy similares para las dos repeticiones del experimento. Las características más relevantes del patrón están muy bien expresadas por cualquiera de las replicas. La Figura 13 ilustra la comparación directa en los valores horarios de consumo de agua por cada repetición

Como se puede observar en la Figura 13, hay una correlación altamente significativa entre los valores de consumo obtenidos con cada una de las replicas, con un coeficiente de correlación r^2 de 0,9152, lo cual indica una buena reproducibilidad del método. En una correlación perfecta la pendiente de la línea de regresión debería ser 1. Para el caso estudiado esta pendiente es 0,8741, lo cual indica que las estimaciones obtenidas con la segunda replica fueron típicas en el 87% de los valores obtenidos con la primera replica. Esta situación podría explicarse por ligeras diferencias en las propiedades físicas de los suelos entre las dos posiciones estudiadas, o por una densidad radicular diferente entre las posiciones, lo cual resultaría en diferencias sistemática en la tasa de consumo de agua. Si esto es así, los errores en la estimación de los flujos de agua y vapor consecuentes a una inapropiada parameterización de las entradas al modelo correspondientes a las propiedades físicas del suelo acumularía un error en la estimación del consumo de agua.

Tabla 3. Parámetros físicos del suelo en el sitio del experimento en El Carmen, Codazzi, Colombia.

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Claso Textural	Densidad aparente	θ_{m}	ψ_r	h	K_m
		g g ⁻¹			g cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	kPa		m s ⁻¹
0-10	0,25	0,53	0,22	Franco limoso	1,33	0,49	-0,64	7,45	3,16E-06
10-20	0,23	0,55	0,22	Franco limoso	1,40	0,47	-0,74	8,58	1,56E-06
20-30	0,16	0,57	0,27	Franco limoso	1,45	0,45	-0,91	10,34	1,40E-06
30-40	0,20	0,51	0,29	Franco limoso	1,31	0,50	-1,08	10,90	6,08E-07
40-50	0,36	0,38	0,26	Franco Arcilloso	1,43	0,45	-0,97	10,66	6,37E-07
50-60	0,41	0,37	0,23	Franco Arcilloso	1,53	0,42	-0,98	10,66	1,55E-06

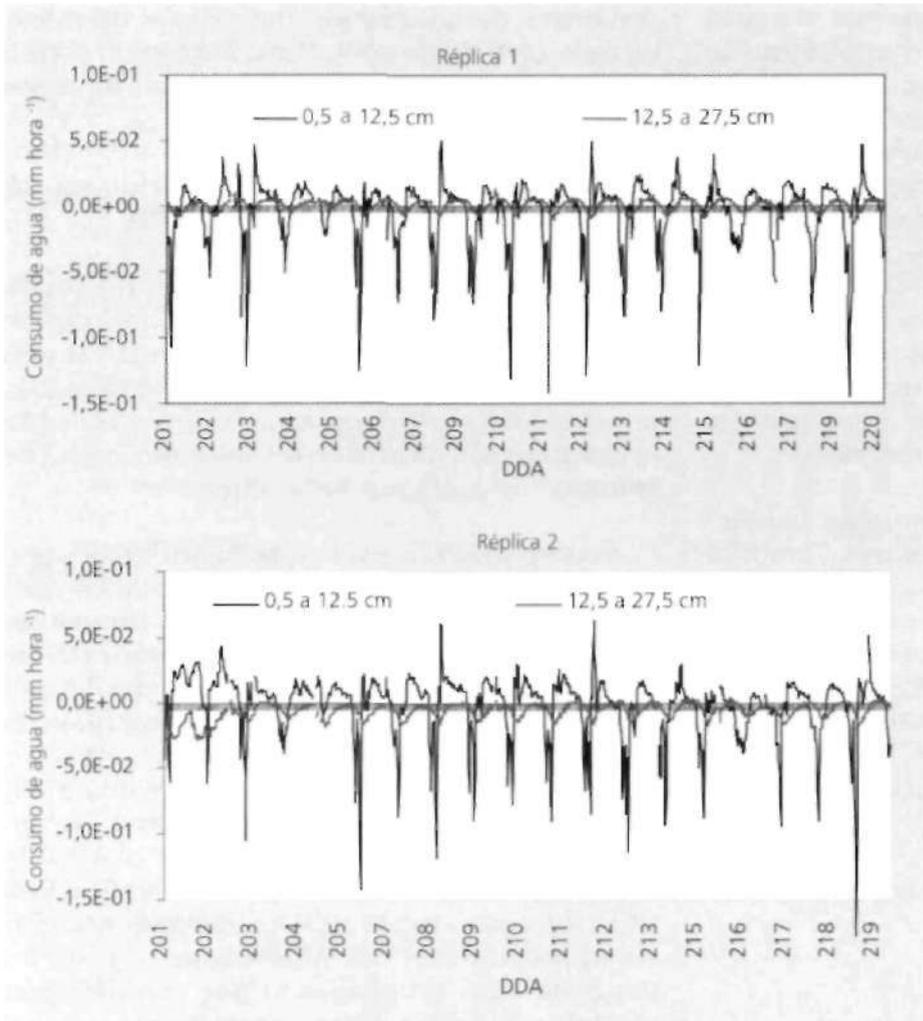


Figura 12. Comparación de las tasas de consumo de agua por las raíces de palma de aceite determinadas simultáneamente por dos series de sensores localizados en el perfil de suelo en el punto medio entre dos palmas. El Carmen, Codazzi, Colombia, 1999. DDA 201 - 221

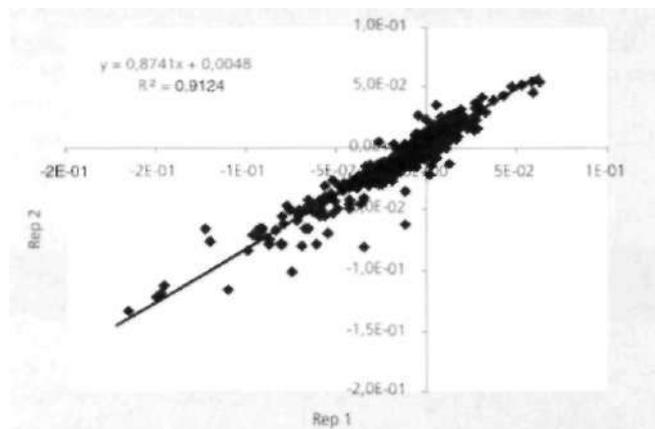


Figura 13. Regresión lineal de los valores horarios de consumo de agua obtenidos en cada una de dos replicas. El Carmen, Codazzi, Colombia, DDA 201-221/1999.

Estimación de patrones diarios de consumo

Una vez validada la técnica mediante los procedimientos mencionados (validación en suelo sin cultivo y evaluación de reproducibilidad mediante patrones repetidos con series de instrumentos), se procedió a estudiar los patrones diarios de consumo para dos materiales de palma de aceite de diferente origen y bajo condiciones edafoclimáticas diferentes. Los materiales seleccionados son: material Dami Las Flores, el cual se estudió en la finca el Carmen en Codazzi y material Unilever estudiado en la plantación Santa Bárbara, en Cumaral. Las características edafoclimáticas de las dos locaciones fueron descritas con anterioridad en este trabajo.

Como se puede observar de la Figura 14, los materiales evaluados, Dami y Unilever, presentan patrones diarios de consumo de agua muy diferentes, mostrando cómo los dos materiales responden en forma particular a las condiciones edafoclimáticas.

EFFECTO DE LA REDUCCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LOS PATRONES DIARIOS DE CONSUMO DE AGUA POR LA PALMA DE ACEITE

Tal como lo mencionan varios autores (Corley 1976; Chang et al. 1985; Foong 1993; Dufrene 1992; Henson 1998), el crecimiento, desarrollo y producción de la palma de aceite son afectados por limitaciones en el suministro de agua. Este experimento se realizó en la plantación Santa Bárbara, Cumaral, Colombia, durante la estación seca entre diciembre de 1999 y marzo de 2000, y

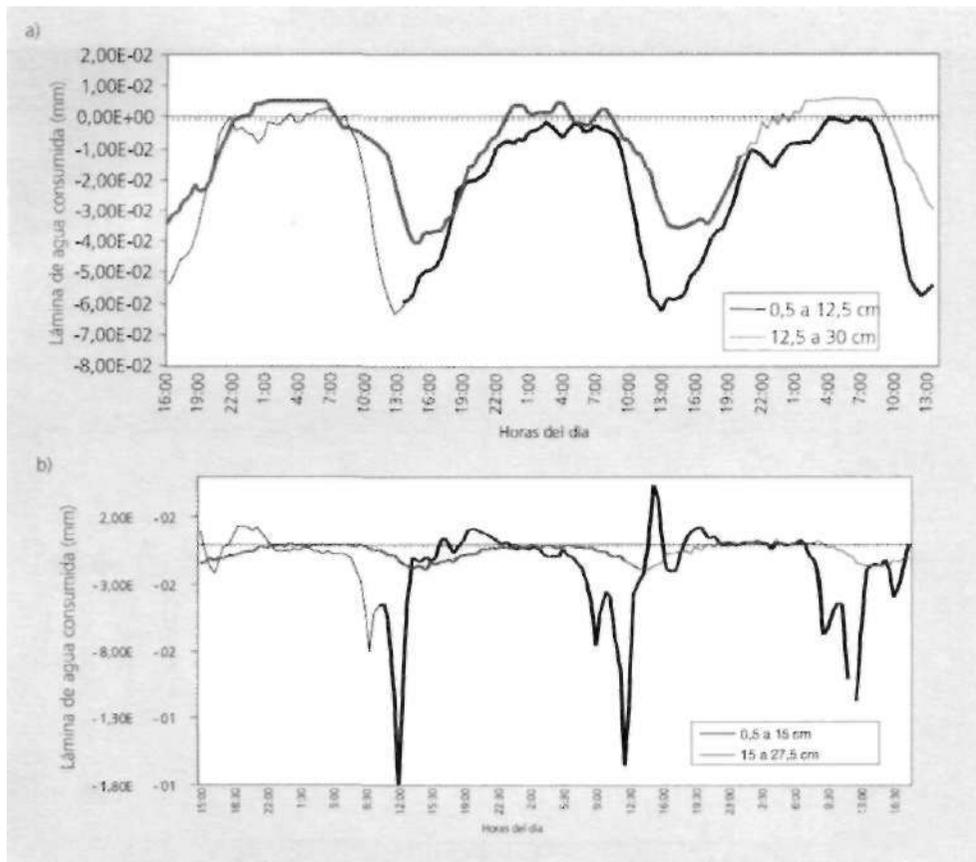


Figura 14. Patrones diarios de consumo de agua en a) material Unilever en la zona de los Llanos Orientales y b) material Papua en la zona de Codazzi.

fue planeado para observar cómo la disminución progresiva de la humedad del suelo afecta los patrones diarios de consumo /eflujo de agua por las raíces de la palma. Para este propósito se seleccionó el período sin lluvias comprendido entre los días 351 de 1999 y 012 de 2000. Las características generales de la zona fueron descritas con anterioridad en este trabajo.

Materiales y Métodos

Un juego de seis sensores de humedad del tipo Theta-probes (versión ML2x) y seis sensores de temperatura del tipo SL1 (Delta-T Devices, Cambridge) se instalaron en el punto medio entre dos palmas de material Unilever sembradas comercialmente en 1982 en la plantación Santa Bárbara, Cumaral. Pares de sensores compuestas por un Theta-probe y un sensor de temperatura se instalaron a 1, 5, 20, 40, 55 y 60 cm de profundidad en el perfil de suelo. Tanto los sensores de humedad como los de temperatura se conectaron a un colector de datos

del tipo DI2e(Delta-T Devices, Cambridge), el cual se programó para tomar lecturas cada 10 minutos y almacenar promedios cada 30 minutos. Los valores entregados por los Theta-probe, en mV, se transformaron en valores de humedad volumétrica utilizando curvas de calibración individuales para cada profundidad y sensor.

Una muestra de suelo sin disturbar se tomó a cada profundidad al lado de cada uno de los sensores, utilizando cilindros de PVC de 10 cm de alto por 5 cm diámetro. El procedimiento para determinar los parámetros físicos e hidrológicos del suelo fue idéntico al usado en los primeros experimentos reportados en este documento.

Resultados

Características del suelo

Como se puede observar, el suelo en la localidad es primordialmente arcilloso entre 0 y 60 cm de profundidad, presentando un horizonte franco arcillosos entre 20 y 50 cm. Las variaciones texturales inducen menores valores de b y ψ_e , así como mayores valores de θ_{sat} en este horizonte comparado con el resto del perfil.

Patrones diarios de consumo de agua por la palma de aceite

La estimación de los patrones diarios de consumo de agua por las raíces de la palma de aceite se realizó utilizando el procedimiento idéntico al utilizado en los experimentos previos, el cual se describió ampliamente en la sección anterior de este trabajo.

Tabla 4. Características físicas del suelo en el sitio del experimento. Santa Bárbara, Cumaral, Colombia.

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	Densidad aparente	θ_{vol}	ψ_s	b	K_{sat}
		$g\ g^{-1}$			$g\ cm^{-3}$	$cm^3\ cm^{-3}$	kPa		$m\ s^{-1}$
0-5	0,35	0,28	0,38	Arcilloso	1,43	0,46	-1,05	9,89	1,12E-05
5-10	0,37	0,25	0,38	Arcilloso	1,39	0,47	-1,03	9,44	4,98E-06
10-20	0,40	0,24	0,36	Arcilloso	1,47	0,44	-0,82	8,67	3,73E-06
20-30	0,39	0,29	0,32	Franco arcilloso	1,52	0,42	-0,64	7,79	1,17E-05
30-40	0,51	0,23	0,26	Franco Arcillo Arenoso	1,52	0,42	-0,61	7,12	1,24E-05
40-50	0,35	0,33	0,31	Franco Arcilloso	1,61	0,39	-0,75	8,17	4,98E-06
50-60	0,30	0,29	0,41	Arcilloso	1,51	0,42	-0,89	9,75	1,13E-06

La Figura 15 ilustra la secuencia de valores estimados cada 30 minutos durante 19 días continuos sin lluvias, con lo cual se permite establecer los patrones diarios de consumo de agua a las diferentes profundidades estudiadas.

Como se puede observar de la Figura 15, a medida que el suelo se va secando, el consumo total diario de agua (representado por la integral de la secuencia de valores cada 30 minutos), va disminuyendo. Mientras que

el consumo de agua en los primeros centímetros del perfil se reduce, el consumo de agua en el segundo nivel tiende a ser similar al consumo en los primeros centímetros. El análisis realizado permite observar cómo la palma de aceite comienza a tomar agua en los estratos más superficiales del perfil, y en la medida en que ésta se va agotando, las raíces que se encuentran a mayor profundidad aumentan su actividad. Utilizando la técnica propuesta, es posible estimar la cantidad de agua absorbida por las raíces, el momento en el cual es tomada y la profundidad del perfil en la cual se presenta la absorción.

La técnica provee métodos para estudiar cómo el potencial matricial del suelo afecta el consumo de agua por las raíces de la palma de aceite, así como cual es el nivel de humedad requerido para mantener la planta trabajando a su máximo po-

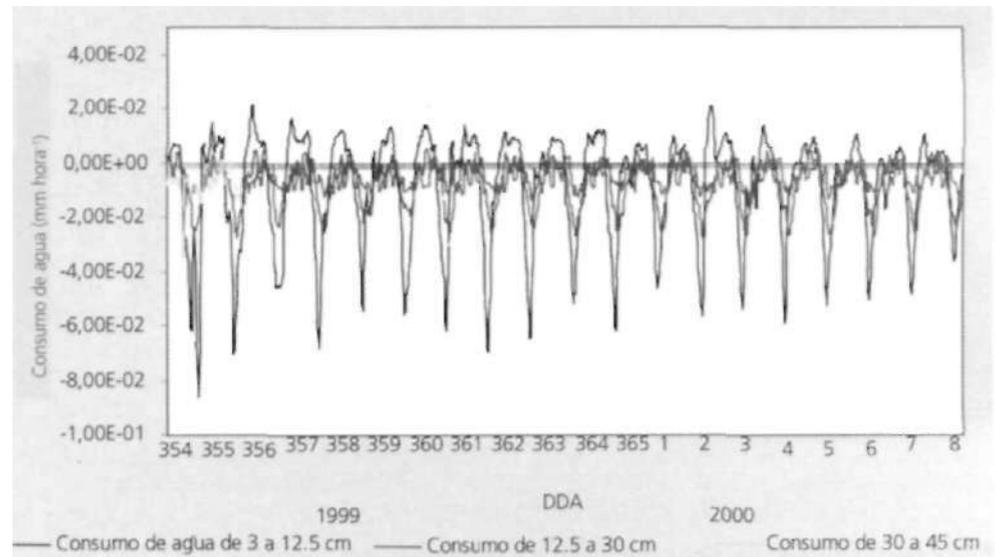


Figura 15. Patrones diarios de consumo de agua por la palma de aceite durante 19 días sin lluvia. Santa Bárbara, Cumaral, Colombia. DDA 354/1999- 08/2000

tencial. Esta situación se ilustra en el estudio realizado durante el segundo período sin lluvias de esta época seca entre el 03/02/00 hasta el 22/02/00.

La Figura 16 ilustra los patrones diarios de consumo de agua por las raíces durante 19 días sin lluvia y la variación diaria del potencial matricial del suelo a 5 cm de profundidad. El potencial matricial del suelo se calculó a partir de las mediciones de humedad volumétrica y los valores de b y ψ_s obtenidos de las curvas de retención de humedad realizadas de las muestras no disturbadas de suelo colectadas en el lugar.

Es evidente para esta serie de datos que el consumo de agua por las raíces tiende a reducirse para todas las profundidades estudiadas en la medida en que el suelo se va secando. Inicialmente, el consumo de agua fue mucho más rápido en los

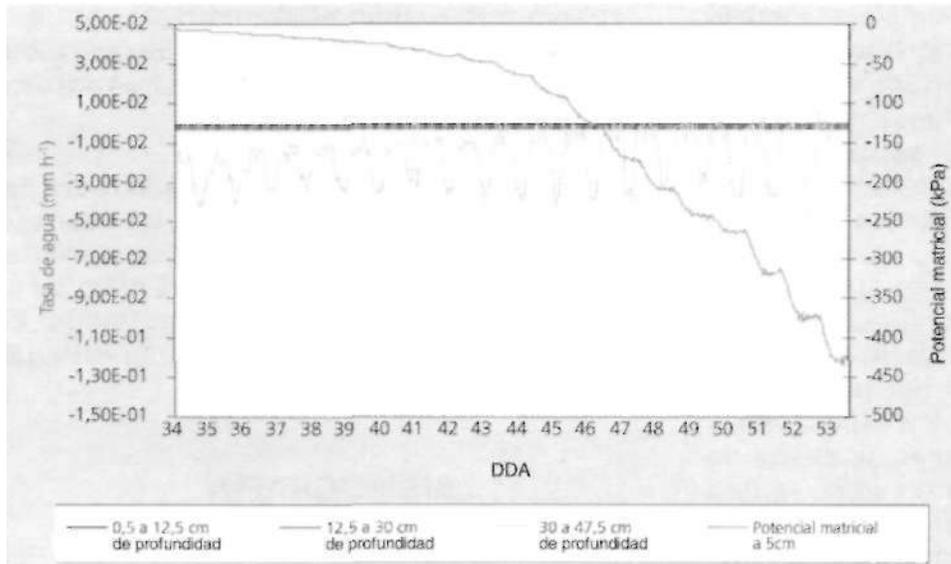


Figura 16. Patrones diarios de consumo de agua por las raíces de la palma de aceite a tres profundidades y variación del potencial matricial del suelo a 5 cm de profundidad, Santa Bárbara, Cumaral, Colombia. DDA 34 a 53 /2000.

niveles superficiales que en los niveles profundos, pero en la medida en que el suelo se va secando, la contribución de todos los niveles se hace similar.

El consumo diario de agua se calcula por la integración de los valores de consumo cada 30 minutos, y en la Figura 17 presenta en función del contenido de humedad del suelo expresado en potencial matricial (kPa). La siguiente figura representa los valores de consumo diario de agua

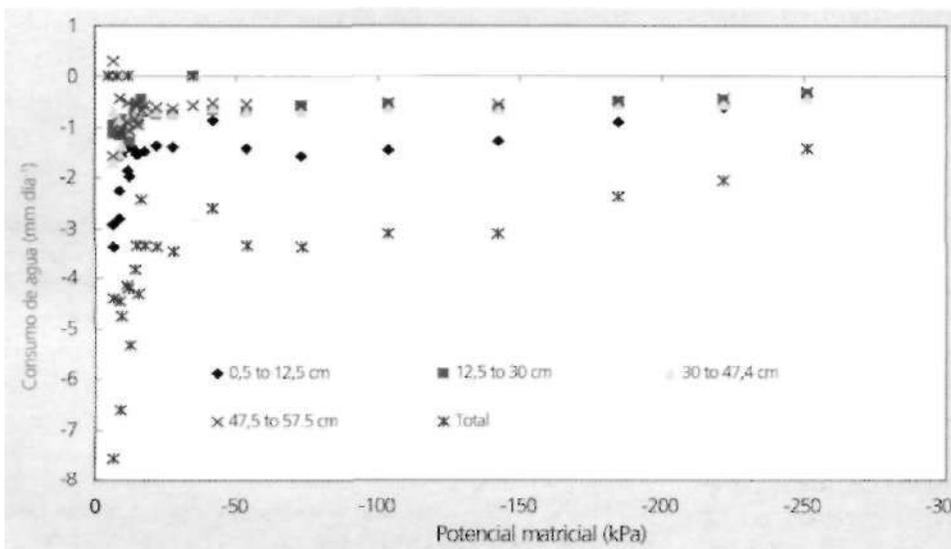


Figura 17 Consumo diario de agua (milímetros) por las raíces de la palma de aceite a diferentes profundidades en el perfil de suelo en función del potencial matricial a 5 cm de profundidad. Santa Bárbara, Cumaral, Colombia. DDA 023 a 053/ 2000

por las raíces a diferentes profundidades en el perfil en función de la variación en el potencial matricial del suelo (kPa).

La Figura 17 muestra cómo a medida que el potencial matricial se hace más negativo, como consecuencia de la reducción en el contenido de humedad en el suelo, el consumo diario de agua se reduce de alrededor de 5 mm día⁻¹, cuando el suelo presenta un potencial matricial cercano a capacidad de campo, y a menos de 2 mm día⁻¹ cuando el potencial matricial del suelo es cercano a -250 kPa.

CONCLUSIONES

La técnica presentada en este trabajo demostró la posibilidad de estimar las variaciones de la humedad del suelo debidas a los flujos de agua líquida y vapor de agua a través de la matriz del suelo así como la variación debida a la actividad de las raíces de las plantas.

- Con el uso de la técnica propuesta se encontró una correlación significativa entre las variaciones en humedad del suelo medidas y estimadas. La correlación entre los valores estimados y medidos de la variación acumulada del contenido de humedad en suelo sin cultivo se utilizó para verificar la habilidad de la técnica para estimar los flujos de agua líquida y vapor, y mostró valores de R² entre 0,89 y 0,97. Para cada uno de los experimentos realizados tanto en

- el Reino Unido como en Colombia, el modelo presentó ligeras sobrestimaciones en los flujos de vapor al comienzo del período de secado y subestimaciones de los mismos al final del período. La estimación de los patrones diarios de consumo de agua en palma de aceite fue reproducible con un coeficiente de determinación R^2 de 0,91.
- La técnica presentada provee los medios para estudiar cómo el potencial matricial del suelo afecta el consumo de agua por parte de las raíces de la palma de aceite. Los experimentos realizados en las plantaciones de palma de aceite en Colombia mostraron cómo la tasa de absorción de agua por las raíces de la palma disminuye a todas las profundidades a medida que el suelo se seca. Cuando el suelo está uniformemente humedecido, el mayor consumo de agua se realiza en los estratos superficiales del perfil, pero a medida que el suelo se seca, los estratos inferiores del perfil contribuyen mayoritariamente al total de agua consumida.
 - La técnica presentada mostró la posibilidad de estudiar las variaciones en el consumo de agua por la palma de aceite en función de la humedad del suelo, mostrando que puede ser utilizada para estudiar la tolerancia al estrés hídrico de los diferentes materiales de siembra.
 - La técnica puede ser igualmente utilizada como una herramienta en programas de mejoramiento genético para el estudio de la eficiencia en el uso de agua de diferentes variedades de siembra, de modo que la selección de materiales de siembra pueda hacerse teniendo en cuenta los requerimientos específicos de cada variedad así como la disponibilidad de recursos hídricos de cada zona.
 - La técnica permite establecer patrones óptimos de consumo de agua por la planta en condiciones donde la humedad del suelo no es un limitante para el cultivo (i.e. capacidad de campo). Una vez los patrones óptimos para cada material han sido establecidos, esta técnica podrá ser utilizada para la programación y autocontrol de sistemas de riego presurizado diseñados para aplicar agua al cultivo solo cuando el patrón diario óptimo de consumo no está siendo seguido, evitando así sobreirrigaciones y suministros insuficientes de agua.
- Igualmente, puede ser utilizada para la programación y seguimiento de los sistemas de riego no presurizado, ya que permite establecer con precisión las frecuencias y láminas de riego realmente requeridas por el cultivo, permitiendo así un uso más racional del agua en la agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

- CAHILL, A.; Parlange. 1998. On water vapour transport in field soils. *Water Resources Research* (Estados Unidos) v.34 no.4, p.731-739.
- CAMPBELL, G.S. 1985. *Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems.* Department of Agronomy and Soils, Washington State University. Elsevier Science Publishers. Amsterdam.
- CARY, J. W. 1966. Soil moisture transport due to thermal gradients: practical aspects. *Soil Science Society of America Proceedings.* v.30, no.4, p.428-433.
- CASS, A.; CAMPBELL, G.S.; JONES, T. L. 1984 Enhancement factor of thermal water vapour diffusion in soil. *Soil Sciences Society of America. Journal* (Estados Unidos) v.48, p 25-32.
- CHANG, K. W. Et al., 1985. Irrigation of oil palm in Malasya. *In: E. Pushparajah (Ed.). Symposium on Water in Malaysian Agriculture. Proceedings.* Malaysian Society of Soil Sciences, Kuala Lumpur. p.103-116.
- CORLEY, R.H.V. 1976. Inflorescences abortion and sex differentiation. *In: R.H.V Corley, J.J. Hardon, B.J. Wood (Eds.). Oil Palm Research.* Elsivier. Amsterdam. p.37-54.
- DAAMEN, C.C.; SIMMONDS, L. 1996. Measurements of evaporation from bare soil and its estimation using surface resistance. *Water Resources Research.* (Estados Unidos) v. 32 no.5, p. 1393-1402.
- DUFRENE, E.; DOBOS, B.; REY, H.; QUENCEZ P; SAUGIER B. 1992. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guinenensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficit. *Acta Ecologica* v.18 no.3, p.299-314.
- FOONG, S. F. 1993. Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil palm. *In: 1991 PORIM International. Palm Oil Conference. Progress, Prospects and Challenges towards the 21 st century. Proceedings.* (Agriculture).PORIM, Kuala Lumpur. p.105-107.

- _____. 1999. Impact of moisture on potential evapotranspiration, growth and yield of oil palm. In 1999 PORIM International Palm Oil Congress. Emerging Technologies and Opportunities in the next Millenium. Proceedings. (Agriculture), p.64-86.
- GASKIN, G.; MILLER J. D. 1996. Measurements of soil water content using a simplified Impedance Measuring Technique, Journal of Agriculture Engineering Research, v.63, p. 153- 160.
- HENSON, I.E. 1998a. Notes on oil palm productivity. II. An empirical model of canopy photosynthesis based on radiation and atmospheric vapour pressure deficit. Journal of Oil Palm Research, (Malasia) v. 10 no.2, p.25-28.
- HENSON, I.E. 1998b. Notes on oil palm productivity. III. The use of sap flux probes to monitor palm responses to environmental conditions. Journal of Oil Palm Research. (Malasia) v. 10 no.2, p.33-44.
- KATUL, G.; PHILIP, T; PATAKI, D. 1997. Soil water depletion by oak trees and the influence of root water uptake on the moisture content spatial statistics. Water Resource Research. (Estados Unidos), v.33 no.4, p.611-623.
- MILLER, J.D.; GASKIN G. J. 1998. Theta-probe ML2x Principles of operation and applications. Maculay Land Use Research Institute, MLURI Technical Note.
- MILLY, P. C. 1982. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulations and a numerical model. Water Resources Research (Estados Unidos) v. 18 no.3, p.489-498.
- _____. 1984. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil. Water Resources Research, (Estados Unidos) v.20 no.8, p. 1087-1098.
- MIYAZAKI TSUYOSHI. 1993. Water flow in soils. Macel Dekker, INC New York.
- NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. 1999. Practical aspects of salinity effect on TDR-measured water content: A field study. Soil Science Society of America. Journal (Estados Unidos) v.63 no.5, p. 1070-1076.
- NASSAR, I.N.; BENJAMIN, J.G.; HORTON. 1996. Thermally induced water movement in uniform clayey soil. Soil Sciences, v. 161 no.8, p.471-479.
- OR, D.; WRAITH, J. M. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. Water Resources Research, v.35 no.2, p.371-383.
- PETERSEN, L W.; JACOBSEN, O.H.; MOLDRUR P; ROLSTON, D.E. 1996. Relation between specific area and soil physical and chemical properties. Soil Sciences, v. 161, p.9-21.
- PHILLIP, J. R.; de VRIES D.A. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. American Geophysical. Union (Estados Unidos) v.38, p.222-232.
- SCHELDE, K; THOMSEN, A.; HEIDMANN, T; SCHIONNING. 1998. Diurnal fluctuatuins of water and heat flows in bare soil. Water Resources Research. V.34 no.11, p.2919-2929.
- SCHIELDEGE, JP; KAHLE, A.B.; ALLEY, R. 1982. A numerical simulation of soil temperature and moisture variations for bare field. Soil Science, v. 133 no.4, p. 197-207.
- TOPP, G. C; DAVIS, J. L; ANNAN, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research v. 16, p.574-582.
- WANG, J. R.; SHMUGGE, T J. 1980. An empirical model for the complex dielectric constant of soils as a function of water content. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE. N.18, 288-295.
- WARRICK, Y. C; CONKLIN. A.W. 1999. Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurement. Water Resources Research v.35 no.6, p. 1789-1796.
- YU, C.; WARRICK, A. W.; CONKLIN, M. H. 1999. Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurements. Water Resources Research, v.35 no.6, p. 1789-1797.
- ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; RUSSELL, G. F. 1992. A critique to the Time-Domain reflectometry technique for determining field soil water content. Soil Science Society of America. Advances in measurement of soil physical properties. Theory into practice. SSSA Special publication no.30, p. 187- 208.