

MODELACIÓN TEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA HUMEDAD DEL SUELO USANDO SENSORES REMOTOS

Time Modeling of Soil Moisture Changes Using Remote Sensing

Ma. Isabel Marín-Sosa¹, Fernando Paz-Pellat^{1‡}, Martín A. Bolaños-González¹, J. L. Oropeza-Mota¹, Enrique Palacios-Vélez¹, Mario Martínez-Menes¹ y Enrique Rubiños-Panta¹

RESUMEN

La modelación temporal de los cambios en la humedad del suelo requiere del conocimiento de las propiedades hidráulicas de éste. En la relación precipitación-escorrentía, en parcelas o cuencas hidrológicas, se requiere evaluar la humedad del suelo en términos espacialmente exhaustivos y en intervalos de tiempo cortos, tarea prácticamente imposible en aplicaciones operacionales de los modelos hidrológicos. El uso de los sensores remotos para medición de reflectancias, permite obtener información con los requerimientos definidos en la práctica operacional. Así, en este trabajo se presentan los resultados de un experimento en lotes de escorrentía, usando un simulador de lluvia, donde se evaluó la evolución temporal de las reflectancias usando una fuente de energía constante durante el ciclo de secado. Los datos experimentales mostraron que el uso de un modelo temporal lineal de las reflectancias para estimar cambios de humedad de los suelos, dio buenos resultados ($R^2 > 0.94$) y permitió su parametrización usando solo dos variables, las cuales estuvieron correlacionadas entre sí.

Palabras clave: *relación reflectancia-humedad del suelo, modelo temporal, reflectancia del suelo, simulador de lluvia.*

SUMMARY

Time modeling of the changes in soil moisture requires the knowledge of the soil hydraulic properties. To know the rainfall-runoff relationship in plots or hydrological basins, it is required to evaluate the soil moisture in

spatially and exhaustive terms and with short intervals of time, a task practically impossible in operational applications of the hydrological models. The use of remote sensing, in reflectance measurements, enable to obtain information with the requirements defined in the operational practice. Thus, in this paper we present the results of an experiment in runoff plots using a rainfall simulator. In this experiment the temporal evolution of reflectance was evaluated using a constant energy source during the drying cycle. The experimental data shown that the use of a linear time reflectance model, to estimate the changes in the soil moisture, gave good results and it allowed its parameterization using only two correlated variables.

Index words: *reflectance-moisture soil relation, time modeling, soil reflectance, rainfall simulator.*

INTRODUCCIÓN

La estimación de la humedad del suelo en una parcela o cuenca hidrológica es una tarea muy compleja, principalmente en términos espacialmente exhaustivos y con alta resolución temporal. Desde la perspectiva de la modelación de la relación precipitación-escorrentía, la caracterización temporal de la humedad de los suelos es una tarea crítica.

Se ha intentado modelar la relación precipitación-escorrentía con diferentes niveles de aproximación, en este campo sobresale el método del número de curva o NC (USDA-SCS, 1972) por su simplicidad. Este método es la base de modelos hidrológicos semi-empíricos con mayor complejidad (Sharpley y Williams, 1990; Neitsch *et al.*, 2002), aunque su validez ha sido cuestionada por Paz (2009). El método del NC requiere del conocimiento de la humedad antecedente del suelo, la cual se parametriza en función de grupos hidrológicos de suelos (USDA-NRCS, 2004) que, a su vez, se caracterizan por su tasa de infiltración.

Con fines operacionales, se ha buscado establecer una relación entre la reflectancia y el contenido

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

de humedad del suelo. Una relación funcional fue modelada en forma exponencial por Muller y Décamps (2000), Weidong *et al.* (2002), y Lobell y Asner (2002). Estos autores notaron que la reflectancia del suelo, en las bandas del infrarrojo, se satura (no cambia de valor) para contenidos volumétricos de humedad que van de 0.3 a 0.4, y en 0.2 para el caso de las bandas azul, verde y rojo (A, V y R; respectivamente).

Paz *et al.* (2010) propusieron una forma alterna y simple al modelo exponencial para definir una relación entre la humedad del suelo, θ , y la reflectancia, R (donde R puede ser cualquier banda espectral), definiendo los límites $\theta = 0$ cuando $R = kR_{PMP}$ (suelo seco, donde k es una constante empírica, PMP = punto de marchitamiento permanente) y $\theta = 1$ cuando $R = R_{CC}$ (CC = capacidad de campo), generando una variable indirecta de la humedad del suelo usando reflectancias (θ_{sr}) como:

$$\theta_{sr} = 1 - \left[\frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (1)$$

La Ecuación 1 puede simplificarse si se define una relación entre R_{PMP} y R_{CC} , dejando fija a k . La aproximación de la Ecuación 1 es mejor cuando la reflectancia tiende a la de un suelo a PMP, dado que $\exp(X) = X$ cuando X es muy pequeño.

La Figura 1 muestra el ajuste del modelo 1 a datos de un experimento realizado en el Colegio de Postgraduados, estado de México, México; en el cual se dio seguimiento temporal a la reflectancia y humedad de un suelo con y sin labranza.

El modelo que se muestra en la Figura 1 presenta una situación de cambio en las propiedades del suelo (humedecido a saturación o $\theta_{sr} = 1$ hasta casi seco

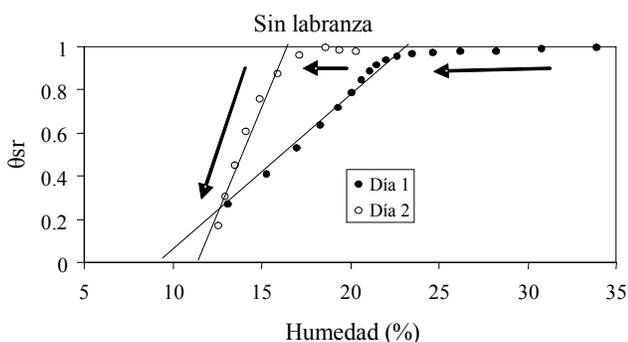


Figura 1. Relación entre θ_{sr} y la humedad gravimétrica de un suelo sin labranza (Paz *et al.*, 20010). θ_{sr} = humedad del suelo usando reflectancias.

o θ_{sr} cercano a cero), donde la relación entre θ_{sr} y la humedad (%) del suelo se modifica en función del contenido inicial de esta última. En el segundo día, el suelo sufrió cambios de humedad ligados a neblina, por lo que el contenido de humedad inicial no sigue en forma continua al contenido de humedad final del primer día.

La evaporación de la humedad del suelo manifiesta al menos dos estados diferentes (Gardner y Hillel, 1962): en el primero, la evaporación está limitada por la atmósfera (energía disponible) y en el segundo la evaporación está limitada por las propiedades hidráulicas de los suelos. Estos dos estados han sido caracterizados en condiciones de campo (Idso *et al.*, 1974; Brutsaert y Chen, 1995), con transiciones entre ellos. El primer estado está definido por la evaporación potencial del suelo y puede estimarse usando información disponible en estaciones meteorológicas modernas (Makkink, 1957; Priestley y Taylor, 1972). Una alternativa de medición de la evaporación del suelo es el uso del albedo (reflectancia) (Idso *et al.*, 1974 y 1975; Jackson *et al.*, 1976; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). La evidencia experimental muestra que la variación temporal del albedo se puede aproximar en forma lineal (Idso *et al.*, 1974; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999).

En la Figura 2 se muestra el modelo propuesto por Paz *et al.* (2010) para la evolución temporal de la reflectancia asociada a los cambios de humedad de los suelos. En ésta t_r es el tiempo de recuperación (secado) y describe una fase lineal de la reflectancia.

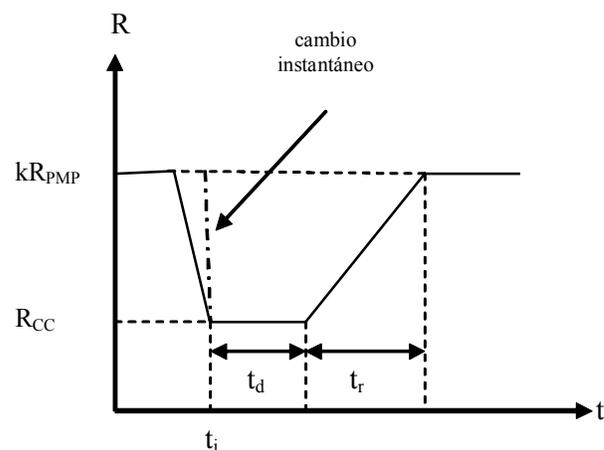


Figura 2. Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo. R = reflectancia, t = tiempo; subíndices: PMP = punto de marchitamiento permanente, CC = capacidad de campo, r = recuperación, d = descanso o retraso, i = inicial.

Considerando intervalos temporales de un día o menores, se ha supuesto un cambio brusco en la reflectancia al pasar de la condición de suelo seco a húmedo (evento de precipitación o riego).

Si en la Figura 2 se supone un patrón de cambio de la reflectancia proporcional a t (la reflectancia representa una propiedad acumulativa), entonces la única incógnita es t_d o, suponiendo un valor para k , con dos puntos en la etapa de secado se puede caracterizar el modelo propuesto. En la etapa de secado la relación temporal para las reflectancias, puede ser representada por el modelo lineal (Figura 2):

$$R = p - qt$$

$$p = R_{CC} - q(t_i + t_d) \quad (2)$$

Donde R es la reflectancia (cualquier banda), p y q son constantes empíricas y t_i es el tiempo inicial (después de la aplicación de riego o de un evento de lluvia) a partir del cual el contenido de humedad en el suelo alcanza el punto de capacidad de campo o CC.

La Figura 3 presenta los resultados del experimento para un suelo con y sin labranza (Paz *et al.*, 2010), donde se observa que el modelo es seguido en forma adecuada por los datos experimentales.

En la Ecuación 2 es necesario conocer t_d y q . Los valores de k ($k = 1$), R_{PMP} y R_{CC} (Ecuación 1) pueden obtenerse de las reflectancias más altas y bajas, respectivamente, de un píxel en una imagen satelital. Esto se puede realizar analizando imágenes satelitales en series de tiempo (época de sequía y de lluvias) o imágenes antes y después de un evento de precipitación. Paz *et al.* (2009) muestran la metodología para este tipo de estimaciones.

En el presente trabajo se revisa el modelo propuesto por Paz *et al.* (2010). El objetivo es analizar y modelar la variación temporal de la reflectancia en cinco suelos, durante el ciclo de secado de los mismos, después de un evento de precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó un experimento en lotes de escurrimiento de dimensiones $50 \times 30 \times 12$ cm, dentro de un simulador de lluvia de disco rotatorio tipo Morin (Morin *et al.*, 1967), Figura 4. Se seleccionaron cinco suelos con propiedades hidráulicas contrastantes, los cuales se colocaron en los lotes de escurrimiento sobre una capa de grava y una de gravilla.

Los lotes de escurrimiento se montaron sobre la base giratoria del simulador de lluvias y se les aplicó, durante una hora, un evento de precipitación con intensidad 100 mm h^{-1} . Antes de la aplicación del evento de lluvia los suelos se llevaron a capacidad de campo (por capilaridad), esto para poder cuantificar el escurrimiento directo, el cual inicia a partir de que el suelo alcanza la saturación.

Después de finalizar el evento de precipitación o lluvia, se iluminaron los suelos con cinco lámparas de halógeno de cuarzo de 500 watts (única fuente de energía, además de la residual que ocurrió en el cuarto cerrado y rodeado de cortinas negras para mantener condiciones de oscuridad) para iniciar el secado de los mismos, el arreglo se muestra en la Figura 4. Las lámparas de halógeno se seleccionaron en función de una distribución de la irradianza lo más similar a la del sol; aunque el máximo de la irradianza de la lámpara ocurrió alrededor de los 800 nm, sufriendo un desplazamiento en relación al solar de 300-400 nm. No obstante, las reflectancias

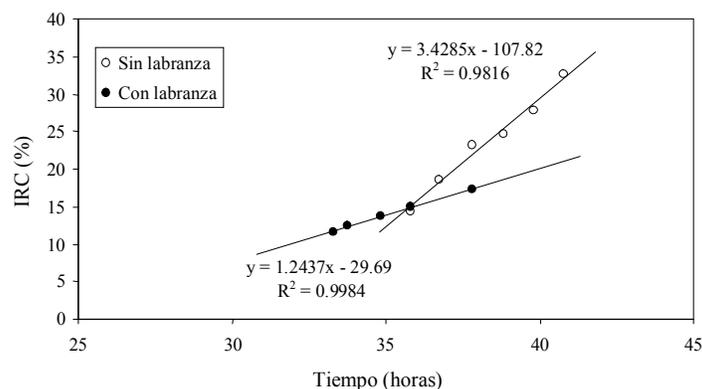


Figura 3. Modelación del segundo estado de la evaporación del suelo (Paz *et al.*, 2010). IRC = infrarojo cercano.

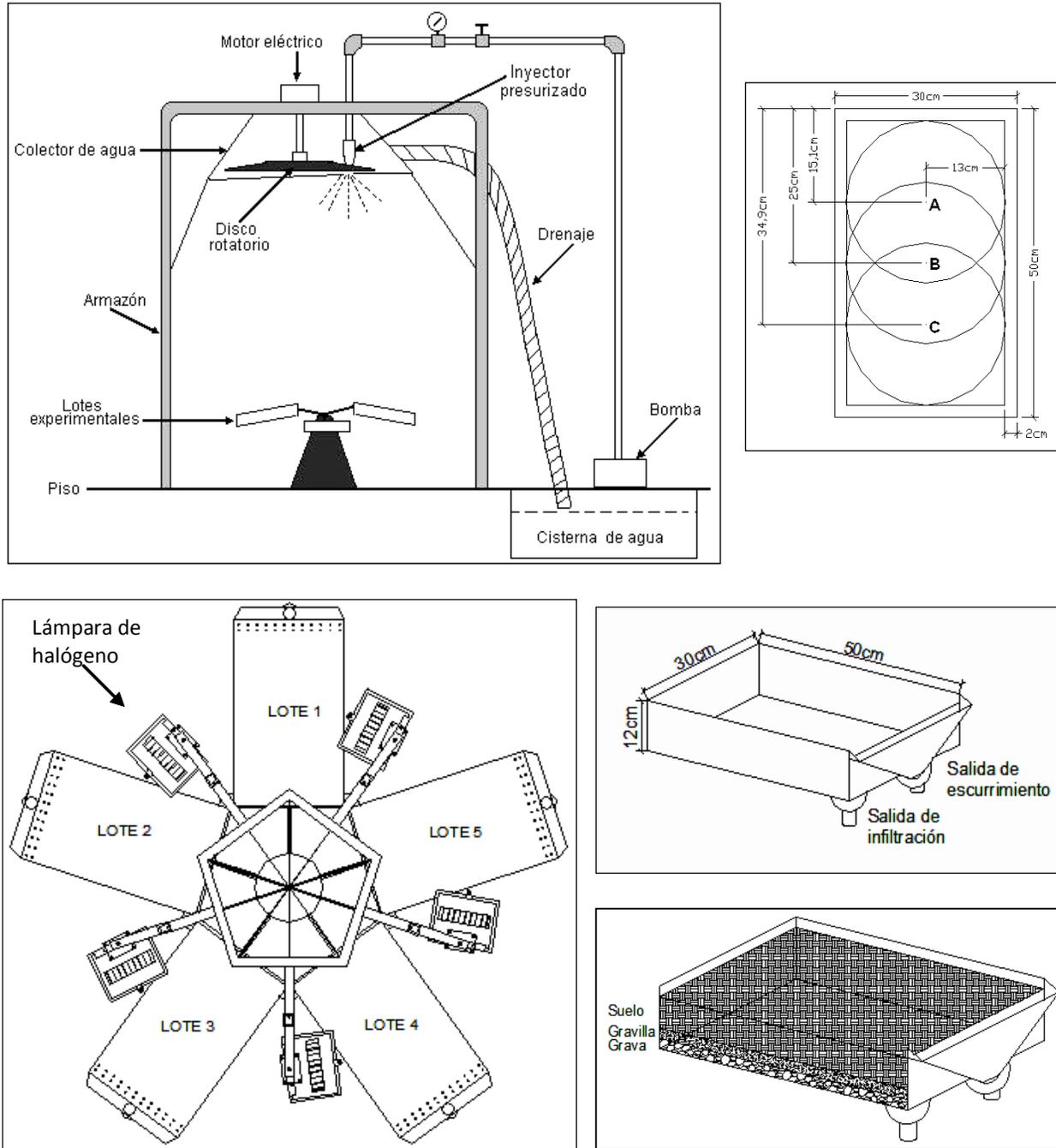


Figura 4. Arreglo experimental para el análisis de la respuesta temporal de suelos desnudos bajo iluminación artificial en un simulador de lluvia tipo rotatorio, donde se muestra la geometría experimental, así como las características de los lotes experimentales y la posición de las mediciones espectrales.

obtenidas son representativas de las condiciones de iluminación solar, después de una transformación lineal. Durante el tiempo de secado se tomaron lecturas de la reflectancia con un radiómetro hiperspectral, FieldSpec@Pro^{MR} modelo FR (Analytical Spectral

Devices) con rango de medición de 350 a 2500 nm y resolución de proceso de 1 nm. Las lámparas se mantuvieron encendidas sólo durante las horas de toma de datos y fueron apagadas posteriormente y el cuarto del simulador sin luces y cerrado.

Los horarios de medición fueron: el día 1 de 13:00 a 21:00 horas; el día 2 de 10:00 a 22:00 horas; el día 3 de 11:00 a 17:00; y el día 5 de 10:00 a 17:00 horas. Se realizaron mediciones cada hora, con excepción de los días donde no se observaron variaciones importantes en las reflectancias de los suelos. Todas las mediciones se realizaron con tres repeticiones en las posiciones A, B y C de los lotes de escurrimiento (Figura 4) y los resultados de las posiciones se promediaron en cada tiempo de toma. Las reflectancias hiperespectrales se integraron a las bandas del sensor TM5, usando las funciones de respuesta correspondientes, después de eliminar valores con problemas de estabilidad (banda ultravioleta y la parte final cercana a 2500 nm).

Durante el evento de precipitación se midió, a intervalos de cinco minutos, el escurrimiento y la infiltración en cada lote.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los Suelos en los Lotes de Escurrimiento

Se utilizaron suelos con propiedades hidráulicas contrastantes, particularmente en lo que respecta a la tasa de infiltración. El Cuadro 1 muestra las características físicas y químicas básicas de los suelos utilizados.

El Cuadro 2 muestra los puntos de las curvas de retención de humedad (gravimétrica) de los suelos (alterados) y la Figura 5 presenta sus patrones ajustados con un modelo potencial.

En la Figura 5 se observa que los suelos 3 y 5 tienen propiedades hidráulicas similares, por lo que no resultan útiles en términos de contraste.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos usados en el experimento.

Suelo	pH	Conductividad eléctrica	Densidad aparente	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla	Clasificación de textura
	1:2	1:2			----- % -----			
		dS m ⁻¹	g cm ⁻³					
1	7.5	0.65	1.31	1.78	64	19	17	Franco Arenoso
2	6.6	0.2	1.18	1.54	44	19	37	Franco arcilloso
3	7.7	0.36	1.53	2.55	30	25	45	Arcilloso
4	7.2	0.79	1.29	1.72	54	23	23	Franco arcillo arenoso
5	7.6	0.43	1.87	2.62	40	41	19	Franco

Resultados Hidráulicos de los Lotes de Escurrimiento

La Figura 6 muestra el comportamiento de la velocidad de infiltración, con relación al tiempo, de los cinco suelos usados en el experimento, donde sus patrones son congruentes con los de la Figura 5; con excepción del suelo 1. Este caso de infiltración baja es debido muy probablemente a un problema en la estructura de infiltración (taponamiento) del lote de escurrimiento usado. La baja infiltración del lote, para un suelo con una textura que implica uno mayor, mostró los escurrimientos superficiales máximos, implicando una restricción en las infiltraciones. No obstante este problema experimental, el suelo 1 tiene un patrón de infiltración asociado a un suelo de textura muy fina, por lo que es útil en los análisis posteriores.

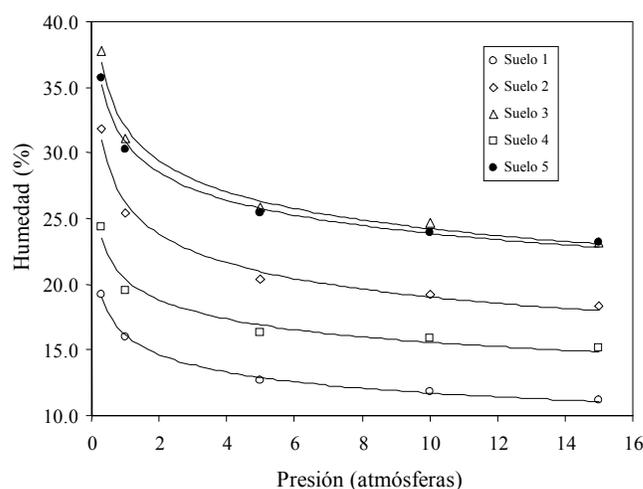


Figura 5. Curvas de retención de humedad de los suelos del experimento.

Cuadro 2. Datos de las curvas de retención de humedad.

Presión atmósferas	Humedad gravimétrica del suelo				
	1	2	3	4	5
0.3	19.2	31.9	37.7	24.4	35.7
1	16	25.4	31.1	19.5	30.2
5	12.6	20.4	25.9	16.3	25.4
10	11.8	19.2	24.6	15.9	23.9
15	11.2	18.4	23.2	15.1	23.1

Aunque se buscaron suelos representativos de los grupos hidrológicos del método del número de curva de la relación precipitación-escorrentía (USDA-NRCS, 2004), los resultados no fueron completamente satisfactorios. El suelo 1 corresponde al grupo B, el suelo 2 al grupo C, el suelo 3 al grupo D; y los dos suelos restantes fueron seleccionados como intermedios a estos grupos.

Resultados de Reflectancia de los Lotes de Escorrentía

En Paz *et al.* (2010) se definió una relación $R_{CC} = mR_{PMP}$ con m alrededor de 0.5. En nuestro caso, usando R_{PMP} igual a R secado al aire y R_{CC} igual a la reflectancia después de la saturación del suelo por el evento de lluvia, la Figura 7 muestra la relación definida para el caso del mejor y peor ajuste. A diferencia de Paz *et al.* (2010), la reflectancia del IRM1 (infrarrojo medio 1) fue utilizada y la del IRM2 (infrarrojo medio 2) no. De acuerdo con los resultados de la Figura 7, el valor de m fluctúa alrededor de 0.3, como producto del espectro electromagnético de irradiancia de la lámpara usada en el experimento. No obstante esto, razonablemente se puede esperar que exista una relación relativamente constante entre las reflectancias a PMP y las mismas a CC, simplificando la parametrización del modelo mostrado en la Figura 2.

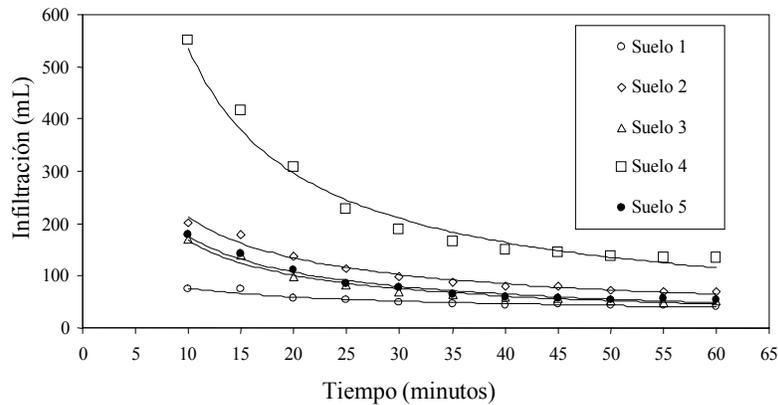


Figura 6. Velocidad de infiltración de los cinco suelos del experimento en lotes de escorrentías.

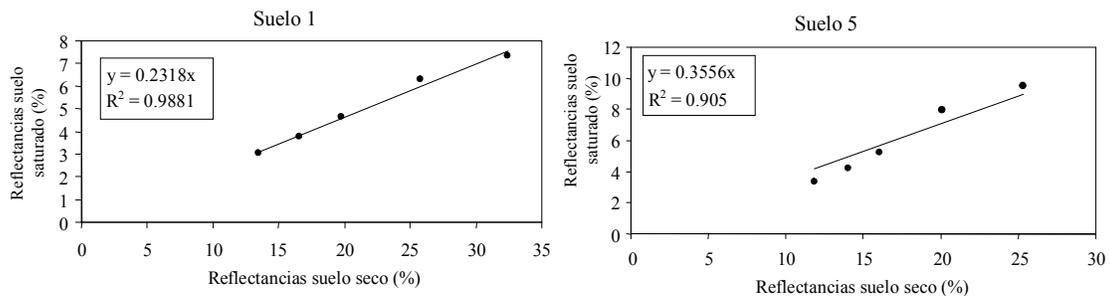


Figura 7. Mejor y peor relación entre la reflectancia del suelo saturado (similar a R_{CC}) y del suelo seco (similar a R_{PMP}) para los suelos del experimento.

Con relación al modelo de la Figura 2, en la Figura 8 se muestran los resultados del ajuste a los datos experimentales. Considerando que se realizaron mediciones temporales discretas de las reflectancias en el tiempo, éstas se fusionaron como si la fuente de energía para el secado de los suelos hubiera estado de forma continua (el secado es solo por evaporación, ya que la infiltración fue nula). Aunque los resultados no pueden considerarse en términos absolutos, los patrones obtenidos son similares al caso de mediciones y fuente de energía continua (misma geometría iluminación-sensor).

En el Cuadro 3 se muestran los parámetros q y t_d , para las bandas del IRC e IRM1, que caracterizan en forma completa el modelo temporal de variación de las reflectancias con la humedad de los suelos (conocidas R_{PMP} y R_{CC} ; o R_{PMP} y m).

Aunque Paz *et al.* (2010) proponen que el uso de la banda del IRM1 tiene valores de saturación menores que la del IRC, los resultados del Cuadro 3 muestran que esto tiene un impacto pequeño en la caracterización del modelo temporal de la relación reflectancia-humedad del suelo.

La Figura 9 muestra que el parámetro q , para la banda espectral IRM1, y la infiltración en una hora tienen una relación lineal y congruente con las propiedades hidráulicas observadas en la Figura 6. El caso del suelo 1, sin importar el problema de taponamiento del lote de escurrimiento, tiene un patrón hidráulico-reflectivo

Cuadro 3. Parámetros del modelo temporal de humedad de los suelos.

Suelo	IRC		IRM1	
	t_d	q	t_d	q
	h		h	
1	17	1.0187	16	1.1361
2	18	0.9653	17	1.3522
3	18	0.9967	15	1.1537
4	24	1.9295	23	2.3527
5	21	1.2467	19	1.3784

IRC = infrarojo medio, IRM1 infrarojo medio 1, q = pendiente de la etapa de recuperación, t_d = tiempo de descanso o retraso.

asociado a un suelo de textura muy fina, resultante de su situación de infiltración-escurrimiento.

Asimismo, la Figura 10 muestra la relación entre q de la banda IRM1 y t_d para los experimentos realizados en los cinco suelos.

CONCLUSIONES

- Los resultados experimentales para el caso de lotes de escurrimiento sujetos a un evento estandarizado de precipitación y una fuente de iluminación constante, muestran que el modelo temporal de la relación reflectancia-humedad del suelo de Paz *et al.* (2010) se aproxima a las mediciones realizadas en los experimentos.

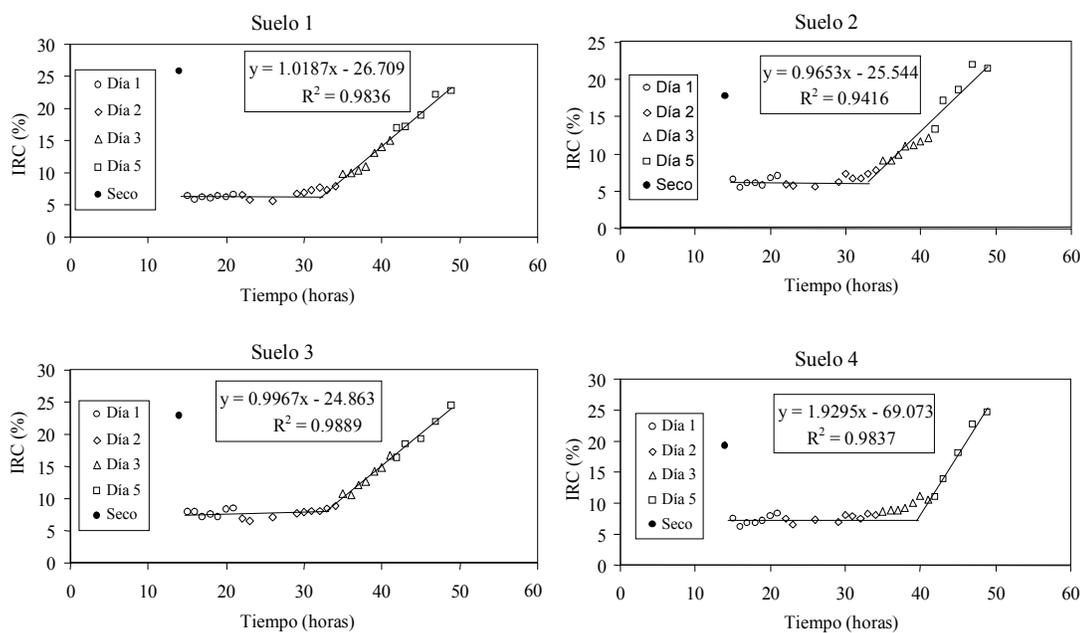


Figura 8. Ajuste del modelo de la Figura 2 a los suelos del experimento. IRC = infrarojo cercano.

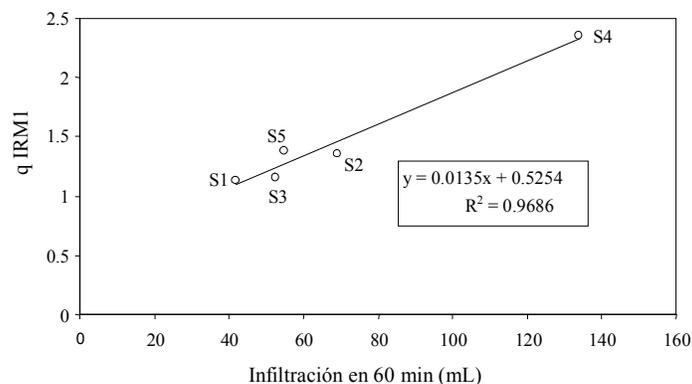


Figura 9. Relación entre el parámetro q estimado de la banda IRM1 y la infiltración en una hora de los lotes de escurrimiento para los suelos del experimento. IRM1 infrarojo medio 1, q = pendiente de la etapa de recuperación.

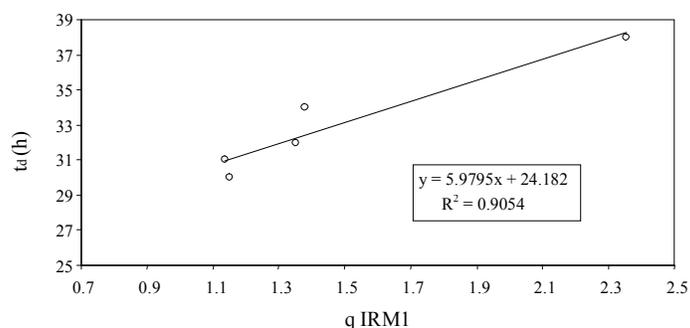


Figura 10. Relación entre q de la banda IRM1 y t_d . IRM1 = infrarojo medio 1, q = pendiente de la etapa de recuperación, t_d = tiempo de descanso o retraso.

- Considerando que las reflectancias de los suelos a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente están relacionadas en forma razonablemente estable, y que se pueden estimar en forma relativamente fácil, el modelo temporal de las reflectancias asociadas a cambios en la humedad de los suelos requiere de los parámetros del tiempo hasta el inicio del secado y de la pendiente de la tasa de secado en términos reflectivos. Ahora bien, la tasa de secado y el tiempo de inicio al secado muestran una correlación significativa que puede usarse para construir un modelo que solo utilice un parámetro, haciendo atractivo en términos operacionales, similar al paradigma del número de curva.

- Aunque interesantes y promisorios los resultados obtenidos en el experimento realizado, es necesario su generalización y validación bajo condiciones de ambientes no controlados, particularmente los asociados a la variación de la geometría sol-sensor durante el curso del día. Esto está planeado para experimentos futuros de validación del grupo de trabajo.

LITERATURA CITADA

- Amano, E. and G. D. Salvucci. 1999. Detection and use of three signatures of soil-limited evaporation. *Remote Sens. Environ.* 67: 108-122.
- Brutsaert, W. and D. Chen. 1995. Desorption of the two stages of drying of natural tallgrass prairie. *Water Resour. Res.* 31: 1305-1313.
- Gardner, W. R. and D. I. Hillel. 1962. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *J. Geophys. Res.* 67: 4319-4325.
- Idso, S. B., R. D. Jackson, R. J. Reginato, B. A. Kimball, and F. S. Nakayama. 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water content. *J. Appl. Meteorol.* 14: 109-113.
- Idso, S. B., R. J. Reginato, R. D. Jackson, B. A. Kimball, and F. S. Nakayama. 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 3: 831-837.
- Jackson, R. D., S. B. Idso, and R. J. Reginato. 1976. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data. *Water Resour. Res.* 12: 23-36.
- Lobell, D. B. and G. P. Asner. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 722-727.

- Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Institute Water Engin.* 11: 277-288.
- Morin, J., D. Goldberg, and I. Seginer. 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. *Trans. ASAE* 10: 74-80.
- Muller, E. and H. Décamps. 2000. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sens. Environ.* 76:173-180.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2002. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2000. Texas Water Resources Institute. TWRI Report TR-191. College Station, TX, USA.
- Paz-Pellat, F. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del USDA/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.
- Paz-Pellat, F., M. I. Marín-Sosa, E. López-Bautista, A. Zarco-Hidalgo, M. A. Bolaños-González, J. L. Oropeza-Mota, M. Martínez-Menes, E. Palacios-Vélez y E. Rubiños-Panta. 2009. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ing. Hidrául. Méx.* 24: 69-80.
- Paz-Pellat, F., M. I. Marín-Sosa, E. López-Bautista, A. Zarco-Hidalgo, M. A. Bolaños-González, J. L. Oropeza-Mota, M. Martínez-Menes, E. Palacios-Vélez y E. Rubiños-Panta. 2010. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. *Tec. Cienc. Agua* 1: 59-71.
- Priestley, C. H. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100: 81-92.
- Salvucci, G. D. 1997. Soil and moisture independent estimation of stage-two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. *Water Resour. Res.* 33: 111-122.
- Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. USDA Tech. Bull. No. 1768.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service). 2004. National engineering handbook. Part 630 hydrology. Washington, DC, USA.
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service). 1972. National engineering handbook, Section 4, hydrology. Chapters 7, 8, 9, and 10. U.S. Govt. Print. Washington, DC, USA.
- Weidong, L., F. Baret, G. Xingfa, T. Qingxi, Z. Lanfen, and Z. Bing. 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ.* 81: 238-246.