



BALANCE HÍDRICO DE SUELOS PARA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD EN CLASIFICACIONES DE SUELOS

Jesús Fernández Moya^{1,2}, Nur Algeet Abarquero^{3,2}, Carlomagno Salazar⁴,
Sussy Salazar², Oldemar Vargas², Miguel Chinchilla⁵, Rafael Mata²

¹Dpto. Silvopascicultura. ETSI Montes.
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

✉: jesusfmoya@gmail.com

²Centro de Investigaciones Agronómicas.
Universidad de Costa Rica (Costa Rica)

³Dpto. Ingeniería y Morfología del
Terreno. ETSI Caminos, Canales y
Puertos. Universidad Politécnica de
Madrid (España)

⁴Instituto de Innovación y Transferencia
en Tecnología Agropecuaria (Costa Rica)

⁵Instituto Costarricense de Electricidad
(Costa Rica)

Palabras clave: meses secos, taxonomía
de suelos, reserva de agua en el suelo,
hidrología, Thornwaite

RESUMEN

La determinación del régimen de humedad del suelo se ha limitado en muchos casos a contabilizar el número de meses climatológicamente secos, sin tener en cuenta la capacidad del suelo de retener agua. Para el presente trabajo, se propuso analizar el balance hídrico de los perfiles estudiados teniendo en cuenta no sólo variables climatológicas (tres estaciones meteorológicas) sino también edáficas, para lo que se tomaron muestras de suelo de siete perfiles en el piedemonte del volcán Miravalles (Costa Rica), que se analizaron para la estimación de retención de agua a 0.33 y 15 bar, densidad aparente y densidad de partículas. Las diferencias en capacidad de reserva de agua en el suelo (entre 16,53 y 246,05 mm) de los perfiles analizados hacen que, bajo las mismas condiciones climatológicas, su comportamiento agro-hidrológico sea muy distinto. Así, pese a observarse 5 meses secos en el climodiagrama, las reservas de agua no llegan a agotarse en ningún mes del año en seis de los siete perfiles analizados, mientras que sí que se agotan durante dos meses (marzo y abril) en uno de ellos. Así, se considera que el régimen de humedad de los siete perfiles analizados es údico en lugar de ústico como se hubiese clasificado si no se hubiese considerado el balance hídrico de suelos. Se recomienda por tanto el estudio detallado de los balances hídricos del suelo en lugar de simplemente los datos climáticos, para un correcto análisis y clasificación del régimen humedad de los suelos.

HYDRIC BALANCE OF SOILS TO DETERMINATION OF MOISTURE REGIME IN SOILS CLASSIFICATION

Key words: Dry months, soil taxonomy,
water reserve in the soil, hydrology,
Thornwaite.

SUELOS ECUATORIALES
44 (1): 1-10

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The determination of the soil moisture regime has been limited in many cases to count the number of climatologically dry months, regardless of the capacity of soil to hold water. For this work, it was proposed to analyze the hydric balance of the profiles studied taking into account not only climatic variables (three weather stations) but also edaphic, for which soil samples of seven profiles in the Piedemonte of the Miravalles volcano (Costa Rica) were taken, which were analyzed to estimate water retention to 0.33 and 15 bar, bulk density and particle density. The differences in water reserve capacity in the soil (between 16.53 and 246.05 mm) of profiles analyzed cause, under the same weather conditions, the agro-hydrological behavior be very different. So whilst be seen five months in the dry climate diagram, water reserves not become exhausted in any month of the year in six of the seven profiles analyzed, while it does run out for two months (March and April) in one of them. Thus, it is considered that the moisture regime of the seven profiles analyzed is udic rather than ustic as had been classified if it had not considered the hydric balance of soil. Is therefore recommended a detailed study of soil hydric balance rather than simply climate data for proper analysis and classification of soil moisture regime.

INTRODUCCIÓN

Los suelos son considerados como un ente natural resultante de los procesos biogeoquímicos en la superficie de la Tierra, son parte esencial en los ecosistemas y, por lo tanto, la pedología, es imprescindible como parte de los estudios ecológicos y biológicos de los ecosistemas (Buol *et al.*, 1989). La taxonomía de suelos propuesta por Soil Survey Staff (1999) tiene dos objetivos principales: (a) establecer clases jerárquicas que permiten entender las relaciones y diferencias entre distintos suelos, y entre éstos y los factores de formación; y (b) servir como medio de comunicación para la comunidad científica en esta disciplina de conocimiento.

Uno de las propiedades más influyentes para la taxonomía de suelos, es el régimen de humedad (ácuico, údico, ústico, xérico y arídico/tórrico) cuya estimación, en general, se basa en la medición del contenido de humedad de una “sección control” (normalmente entre los 10-30 cm y los 30-90 cm de profundidad) y la determinación del número de días secos y cuándo se producen éstos (Soil Survey Staff, 1999). Dada la complejidad y el coste económico de este procedimiento, en numerosos casos se establece el régimen de humedad del suelo con base en parámetros exclusivamente climáticos como precipitación (P) y evapotranspiración (ETP), estimándose el número de meses secos en los que $P < ETP$. Por el contrario, en la propia taxonomía de suelos se señala que el régimen de humedad del suelo está parcialmente condicionado por los factores estrictamente climáticos y que hay otros factores (p.ej. posición en el paisaje, aspecto, acceso a aguas superficiales, profundidad, capacidad de retención de agua) que pueden hacer que dos suelos adyacentes sujetos a las mismas condiciones climáticas presenten regímenes de humedad diferentes (Soil Survey Staff, 1999).

El suelo es un componente importante en el ciclo hidrológico (Brauman *et al.*, 2007), siendo las interacciones entre la dinámica de éste y la ecología de los ecosistemas un tema con una larga trayectoria al que desde hace unos años se ha venido a llamar “eco-hidrología” (Zalewski, 2002; Bruijnzeel, 2004) y que está adquiriendo una especial relevancia en todo el mundo tanto a nivel científico, mediático, político y económico, como demuestra la proliferación de sistemas de pagos por servicios ambientales hídricos

(Brauman *et al.*, 2007). No obstante, cabe destacar que un ecosistema como tal no genera agua, sino que modifica la cantidad de agua que se mueve a través suyo en el paisaje, así como la forma en que lo hace (Brauman *et al.*, 2007); siendo para esto de especial importancia las propiedades hidrológicas de los suelos y en especial variables como la capacidad de retención de agua de los mismos, la infiltración y conductividad hidráulica.

Existen dos motivos principales por los que se considera indispensable analizar el comportamiento hidrológico de los suelos: (1) para una correcta clasificación taxonómica de los mismos, con base en la diferenciación de regímenes de humedad según la clasificación propuesta por Soil Survey Staff (1999); y (2) como parte del análisis del marco natural, ya que los suelos juegan un papel clave en el ciclo hidrológico. Sin embargo, se ha detectado que la mayoría de los estudios de suelos en Costa Rica, América Central y otras partes del mundo se hacen soslayando el papel del suelo en el ciclo del agua; por tanto este trabajo tiene como objetivo: analizar las diferencias entre el establecimiento del régimen de humedad del suelo para clasificar taxonómicamente los suelos analizados usando un balance hídrico exclusivamente climático (el habitual) y uno que tenga en cuenta las propiedades edáficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio (Figura 1) se ubica en el piedemonte del volcán Miravalles (Bagaces, Guanacaste, Costa Rica). Presenta formas de origen tectónico y volcánico que se enmarcan dentro de dos unidades geomórficas: a) caldera de Guayabo y b) laderas del volcán Miravalles. En el fondo de la caldera dominan relieves planos a ligeramente ondulados, mientras que las laderas del volcán presentan pendientes ligeramente onduladas a escarpadas. (Instituto geográfico nacional de Costa Rica (IGN), 1960; Alvarado *et al.*, 2000).

Los suelos estudiados pertenecen al Cuaternario (Holoceno-Pleistoceno) (Alvarado, 2000). En la zona de estudio se presentan cuatro litologías: i) Deslizamientos Las Mesas (Holoceno), ii) Andesitas y Tobas de los conos del volcán Miravalles (Holoceno-Pleistoceno), iii) Debris Avalancha del Miravalles (Holoceno) y iv) Unidad de Andesitas Cabro Muco

(Pleistoceno) (Vargas y Barquero, 1998). La litoestratigrafía de la zona menciona piroclastos, lavas, debris avalancha y depósitos lacustres del Mioceno al Holoceno (Vega, 2005). Además, en el sistema volcánico Miravalles - Guayabo ocurrieron derrames de varias coladas de lava y fenómenos de avalanchas hace aproximadamente 8000 años y erupciones piroclásticas que formaron mantos de cenizas volcánicas hace aproximadamente 100 a 400 años (Alvarado, 2000).

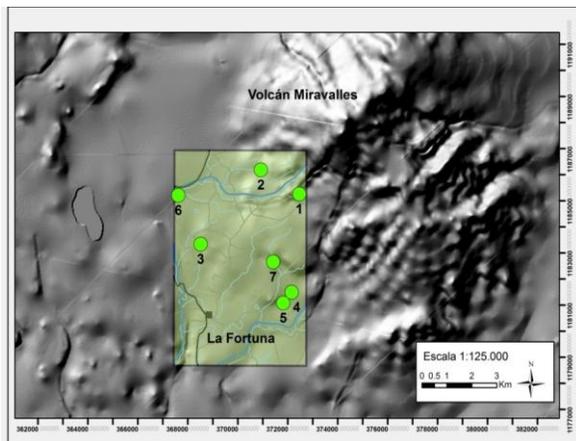


Figura 1 Localización de la zona de estudio en el piedemonte del volcán Miravalles (Bagaces, Guanacaste, Costa Rica) y de los perfiles de suelo estudiados.

Según el sistema de zonas de vida de Holdridge (1967), el área de estudio se ubica en bosque muy húmedo premontano, bosque húmedo tropical transición a premontano y bosque húmedo premontano transición a basal. Estudios de Vargas (2008) indican en el área, cuatro usos actuales de la tierra: 1) Sucesión vegetal en estado tardío inferior, 2) Bosques en estado tardío superior, 3) Matorrales densos y 4) Parches de pastizales.

Clima

El análisis del clima de la zona se basa en los datos registrados de tres estaciones propias del ICE: *CM Miravalles* (22 años de registro de precipitación y temperatura), *Fortuna* (34 años de registro de precipitación y 33 de T) y *Pozo 29* (13 años de registro de precipitación y T). Se utilizaron promedios entre los valores medios de cada una de las 3 estaciones para estimar el clima de la región (Figura 2).

Con base en los datos medios para la región, se utilizó la fórmula de Thornthwaite (1995) (citado por

Gandullo 2000) para el cálculo de la evapotranspiración potencial estimada (ETP). Posteriormente, se realizaron climodiagramas basados en la metodología de Walter Lieth (citado por Gandullo 2000) modificada.

Muestreo de suelos

Para la caracterización de los suelos de la zona de estudio se muestrearon 7 calicatas entre los meses de abril y junio de 2011, cuya localización (Figura 1) se realizó con base en las observaciones efectuadas en campo con barreno, así como a la fotointerpretación en gabinete. Los pedones descritos y analizados se consideran representativos de los diferentes paisajes que se diferenciaban en la zona de estudio.

El perfil del suelo se describió según lo recomendado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff 1999); la descripción incluyó la localización, fisiografía, elevación y pendiente del paisaje circundante. Se estimó la fertilidad aparente, drenaje, pedregosidad, erosión y localización del manto freático. Se identificaron los horizontes del perfil según su espesor, profundidad, color (Munsell, 2000) y textura al tacto; se tomaron muestras de cada horizonte hasta la mayor profundidad posible. Las clases de suelos fueron clasificados a nivel de subgrupo según el sistema la última edición de la llave de la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2010)

Los análisis químicos se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, de acuerdo con las metodologías propias de ese laboratorio, el pH del suelo se midió con un potenciómetro en relación suelo – agua 1:2.5. El contenido de bases extraíbles (Ca, Mg, K, Na) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio 1 M (pH 7), y determinados por absorción atómica y expresados en cmol (+) Kg^{-1} de suelo. El Fe y Al amorfos mediante oxalato de amonio 0,2 M (pH 3,5) y determinados mediante absorción atómica. El contenido de materia orgánica mediante combustión seca (Horneck and Miller, 1998) y la retención de fosfatos con el método Blakemore *et al.* (1987).

La textura del suelo se determinó por el método de Bouyoucos modificado (Forsythe, 1985), la densidad aparente mediante muestra volumétrica, la densidad de partículas con el método del picnómetro, la retención de humedad con ollas de presión y la conductividad hidráulica con el método de cilindro de

metal (Richards, 1941; Forsythe, 1985; Henríquez y Cabalceta, 1999). Con lo anterior, se realizó la

clasificación taxonómica de los suelos a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2010).

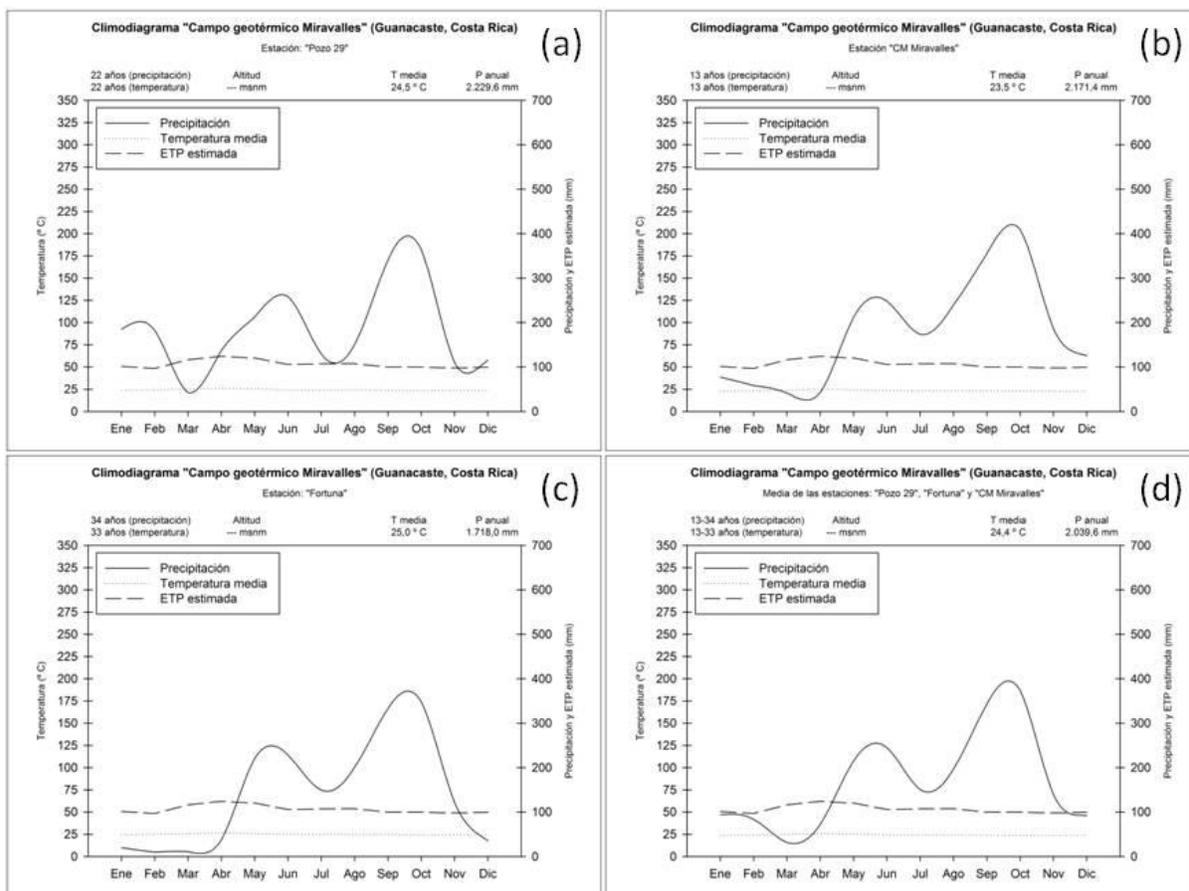


Figura 2 Detalle del clima en la región de estudio, “Campo geotérmico Miravalles” en el piedemonte del volcán Miravalles (Bagaces, Guanacaste, Costa Rica): (a), (b) y (c) climodiagramas de las estaciones dentro de la zona de estudio (CM Miravalles, Fortuna y Pozo 29); (d) climodiagrama promedio para la región en base a los anteriores.

Balance hídrico de suelos

Se tomaron muestras no-disturbadas de cada uno de los horizontes de los perfiles estudiados para calcular: retención de agua (gravimétrica) a 0,33 y 15 atm, densidad aparente y densidad de partículas. Con base en estas variables se calculó la capacidad de reserva de agua en el suelo (Gandullo 2000). Para la determinación del balance hídrico de suelos, se considera que la reserva de agua en el suelo se agota y éste se seca cuando el agua está retenida a más de 15 atm (Soil Survey Staff 1999).

Para realizar el balance hídrico de los perfiles estudiados se utilizó la metodología de Thornthwaite (1955 y 1957) modificada por Gandullo (2000). Así, se combinaron los datos climatológicos con la capacidad de reserva de agua en el suelo.

RESULTADOS

Balance hídrico climático

Los climodiagramas de las 3 estaciones analizadas (Figura 2) muestran variaciones entre ellas, aunque siguen una tendencia similar. La estación “Pozo 29” presenta valores más altos de precipitación y menos meses secos que las otras estaciones; la estación “CM Miravalles” refleja valores más bajos de precipitación, mayor cantidad de meses secos y mayor intensidad de sequía en estos que las otras estaciones; quedando la estación “Fortuna” como intermedia entre las dos anteriores. Se estima que el clima promedio del área de estudio se caracteriza por una precipitación media anual de 2.039 mm, una temperatura media anual de 24.4 °C y 5 meses secos: diciembre – abril (Figura 2). Se

consideran como meses secos aquellos en los que la precipitación es menor que la ETP. El periodo entre diciembre y febrero se caracteriza por tener una intensidad de sequía baja (la precipitación es ligeramente menor a la precipitación) con déficits hídricos entre 7.2 y 13.2 mm. Sin embargo, la intensidad de la sequía aumenta en los meses de marzo y abril, con déficits hídricos de 84.6 y 51.4 mm, respectivamente.

Teniendo en cuenta estas estimaciones climáticas, al ser el periodo seco mayor de 90 días, se considera que el régimen de humedad de los 7 perfiles analizados es ústico (Soil Survey Staff, 1999).

Balance hídrico de suelos

La capacidad de reserva de agua en los suelos analizados presenta variaciones entre los 16.53 y 246.05 mm (Tablas 1-7). Estas diferencias se deben principalmente a (1) las propiedades físicas del suelo como capacidad de retención de agua (entre 0.33 y 15 atm) y densidad aparente del suelo; y (2) a la profundidad del suelo. Las diferencias en capacidad de reserva de agua en el suelo se traducen en diferencias importantes en cuanto al comportamiento hidrológico de los mismos; ya que bajo las mismas condiciones climatológicas responden de manera muy diferente, como muestran los balances hídricos de suelo de los 7 perfiles analizados (Tablas 8-14).

Tabla 1. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°1 “Tajo Gris” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm-3)	D.p. (gcm-3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
A	305	55	49	6	0,68	2,47	37,4	33,3	4,1	12,44
B	115	55	50	5	0,71	2,36	39,1	35,5	3,6	4,08
TOTAL										16,53

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica

Tabla 2. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°2 “Pozo 37” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm-3)	D.p. (gcm-3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
A	440	60	48	12	0,86	2,47	51,6	41,28	10,32	45,408
B	420	34	25	9	0,7	2,29	23,8	17,5	6,3	26,46
TOTAL										71,868

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 3. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°3 “Satélite 2” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm-3)	D.p. (gcm-3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
A	450	40	33	7	0,89	2,63	35,6	29,37	6,23	28,035
B	320	34	25	9	0,65	2,64	22,1	16,25	5,85	18,72
TOTAL										46,755

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 4. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°4 “Pozo 29” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm- 3)	D.p. (gcm- 3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
A	300	42	35	7	1,12	2,29	47,04	39,2	7,84	23,52
B	1100	45	28	17	1,19	2,4	53,55	33,32	20,23	222,53
TOTAL										246,05

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 5. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°5 “Pozo 29” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm- 3)	D.p. (gcm- 3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
A	500	59	40	19	0,8	2,16	47,2	32	15,2	76
B	400	61	41	20	0,85	2,56	51,85	34,85	17	68
TOTAL										144

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 6. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°6 “Caldera de Guayabo” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm- 3)	D.p. (gcm- 3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
Ap	150	85	69	16	0,69	2,47	58,65	47,61	11,04	16,56
A2	290	75	67	8	0,76	2,24	57	50,92	6,08	17,632
Cg	410	58	41	17	1,06	2,57	61,48	43,46	18,02	73,882
TOTAL										108,074

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 7. Capacidad de reserva de agua (mm) y otras propiedades físicas para el perfil n°7 “Talud 2” (Campo geotérmico Miravalles, Guanacaste, Costa Rica)

Horizonte	Prof. (mm)	Retención de agua (%) [Hg]		Hg útil (%)	D.ap. (gcm- 3)	D.p. (gcm- 3)	Retención de agua (%) [Hv]		Hv útil (%)	Capacidad de retención de agua (mm)
		0,33	15				0,33	15		
Oc1	320	34	25	9	0,74	2,71	25,16	18,5	6,66	21,312
Oc2-Oc3	300	90	76	14	0,7	2,14	63	53,2	9,8	29,4
Oi	350	187	167	20	0,36	1,93	67,32	60,12	7,2	25,2
TOTAL										75,912

Prof.: profundidad del horizonte. Hg: Humedad gravimétrica. D.ap.: Densidad aparente. D.p.: Densidad de partículas. Hv: Humedad volumétrica.

Tabla 8. Balance hídrico de suelos para el perfil n°1 “Tajo Gris” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4*
Reserva en el suelo (mm)	6,8	3,1	0,0**	0,0**	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	10,5
ETRMP (mm)	97,8	87,4	34,8	72,9	198,6	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	98,2
Sequía (mm)	3,5	9,5	81,6	51,4								1,4
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

** En color rojo y en fuente negrita (con las celdas remarcadas también en rojo) se observan los dos meses en los que se llega a secar completamente el suelo, agotándose la capacidad de reserva de agua del mismo.

Tabla 9. Balance hídrico de suelos para el perfil n°2 “Pozo 37” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	58,6	48,8	15,0	7,3	71,9	71,9	71,9	71,9	71,9	71,9	71,9	64,8
ETRMP (mm)	100,3	93,4	65,5	80,6	150,6	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,3
Sequía (mm)	1,0	3,4	50,9	43,7								0,4
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

Tabla 10. Balance hídrico de suelos para el perfil n°3 “Satélite 2” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	34,2	25,8	4,2	1,4	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	39,9
ETRMP (mm)	99,8	92,0	53,3	75,7	169,8	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,1
Sequía (mm)	1,5	4,8	63,1	48,6								0,6
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

Tabla 11. Balance hídrico de suelos para el perfil n°4 “Pozo 29” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	231,8	219,7	155,8	126,4	246,1	246,1	246,1	246,1	246,1	246,1	246,1	238,7
ETRMP (mm)	101,0	95,7	95,7	102,3	95,5	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,6
Sequía (mm)	0,3	1,1	20,7	22,0								0,1
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

Tabla 12. Balance hídrico de suelos para el perfil n°5 “Pozo 29” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	130,1	118,7	65,9	46,1	144,0	144,0	144,0	144,0	144,0	144,0	144,0	136,8
ETRMP (mm)	100,8	95,0	84,5	92,7	117,3	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,5
Sequía (mm)	0,5	1,8	31,9	31,6								0,2
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

Tabla 13. Balance hídrico de suelos para el perfil n°6 “Caldera de Guayabo” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	94,4	83,5	38,2	23,7	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	100,9
ETRMP (mm)	100,6	94,5	77,1	87,4	130,8	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,4
Sequía (mm)	0,7	2,3	39,3	37,0								0,3
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

Tabla 14. Balance hídrico de suelos para el perfil nº7 “Talud 2” (Campo geotérmico Miravalles, Costa Rica)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmedia (° C)	23,8	24,3	24,9	25,8	25,2	24,4	24,3	24,3	24,0	23,7	23,8	23,7
ETP estimada (mm)	101,3	96,8	116,4	124,3	120,3	105,7	107,2	107,6	99,9	99,8	97,6	99,7
Lluvia (mm)	94,1	83,6	31,7	72,9	215,2	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	92,2
Superavit (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	
Déficit (mm)	7,2*	13,2*	84,6*	51,4*								7,4
Reserva en el suelo (mm)	62,6	52,6	17,3	8,8	75,9	75,9	75,9	75,9	75,9	75,9	75,9	68,8
ETRMP (mm)	100,3	93,6	67,1	81,4	148,0	244,8	150,9	197,7	343,1	373,8	139,5	99,3
Sequía (mm)	1,0	3,2	49,3	42,9								0,4
Drenaje (mm)					94,8	139,1	43,7	90,1	243,2	274,0	41,9	0,0

* En color rojo se observan los meses con déficit hídrico teniendo en cuenta sólo el clima.

DISCUSIÓN

Pese a observarse cinco (5) meses secos en el climodiagrama medio (Figura 2) en los que la ETP es mayor que la precipitación, los datos muestran que las reservas de agua en el suelo se agotan durante 2 meses (marzo y abril) en el perfil nº1 (Tabla 8), mientras que no llegan a agotarse en ningún mes del año para los perfiles nº 2-7 (Tabla 9-14). Según los criterios de Soil Survey Staff (1999), al estimarse el periodo seco (i.e. sin reservas de agua) en menos de 90 días en todos los casos, se considera que el régimen de humedad de los 7 perfiles analizados es údico en lugar de ústico como hubiese resultado de haber realizado el balance hídrico basado únicamente en parámetros climáticos.

Los resultados mostrados son estimaciones ya que la metodología seguida no permite afirmar con seguridad el régimen de humedad del suelo, al no haberse seguido exactamente la metodología establecida por Soil Survey Staff (1999). No obstante, estas estimaciones son relativamente asequibles en tiempo y presupuesto para casi cualquier estudio de suelos que se realice y ofrecen una mejor representación de la realidad que las técnicas que se utilizan habitualmente (exclusivamente climáticas).

El uso de la fórmula de Thornthwaite para estimar la ETP no es recomendable, especialmente para zonas tropicales, y puede estar infraestimando la radiación solar y la ETP. La ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006) o incluso la de Hargreaves (Listo, 2009; Sánchez, 2010) son las recomendadas para la estimación de la ETP; no obstante, estas no se pudieron utilizar debido a la

falta de datos meteorológicos requeridos por esos modelos.

CONCLUSIONES

Las diferencias en capacidad de reserva de agua en el suelo se traducen en diferencias importantes en el comportamiento hidrológico de los mismos; ya que bajo las mismas condiciones climatológicas responden de manera muy diferente, como muestran los balances hídricos de suelo de los siete perfiles analizados. Así, se recomienda el estudio detallado de los balances hídricos del suelo en lugar de simplemente los datos climáticos, para un correcto análisis y clasificación del régimen humedad de los suelos. Pese a observarse cinco meses secos en el climodiagrama (ETP > precipitación); las reservas de agua en los suelos analizados no llegan a agotarse durante de más de 90 días, de manera que, se considera que el régimen de humedad de los siete perfiles analizados es údico.

REFERENCIAS

- ALVARADO G. 2000. Los volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural. 2 ed. EUNED. San José, Costa Rica. 284 p.
- ALVARADO G, SIGARAN C, PEREZ W. 2000. Vulcanismo: Sus productos y geoformas. In: Denyer P; Kussmaul S. Geología de Costa Rica. p.133-154
- BLAKEMORE LC, SEARLE PL, DALY BK. 1987. Method for chemical analysis of soil. Soil Bureau Scientific, No 2. pp. 45-46.
- BOLAÑOS RA, WATSON V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica según el sistema de clasificación

- de zonas de vida del mundo de LR Holdridge. San José, CR, Centro Científico Tropical. 1:200,000.
- BRAUMAN KA, DAILY GC, DUARTE TK. 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources* 32:67-98.
- BRUIJNZEEL LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104:185-228.
- BUOL SW, HOLE FD, MCCRAKEN RJ. 1989. Soil genesis and classification. 3ª ed. Iowa State University Press, Ames. USA. 446 p.
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Roma, Italia.
- FORSYTHE W. 1985. Física de suelos: manual de laboratorio. San José, CR, IICA. 212p.
- GANDULLO JM. 2000. Climatología y Ciencia del suelo. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid, España.
- HENRÍQUEZ C, CABALCETA G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 112p.
- HORNECK DA, MILLER RO. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. In: Kalra YP (ed) *Handbook of reference methods for plant analysis*. Soil and Plant Analysis Council Inc. and CRC Press, pp. 75-83
- IGN (Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica). 1962. Hoja cartográfica Miravalles (3344 IV). Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Esc. 1:50,000.
- LISTO E. 2009. Balance Hídrico en cuencas forestales prioritarias para el abastecimiento de agua en Centroamérica. Tesis M Sc Ingeniería de Montes. ETSI Montes-Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- MUNSELL COLOR COMPANY. 1994. Munsell soil color charts. Maryland, USA.
- RICHARDS LA. 1941. A pressure - membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science* 51:377-386.
- SÁNCHEZ SR FJ, en prensa. Cálculo de la Evapotranspiración potencial mediante la fórmula de Hargreaves. Consultado el día 30 de junio de 2010 [http://web.usal.es/~javisan/hidro/practicass/ET/ET_Hargreaves.pdf]
- SOIL SURVEY STAFF. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11º ed. USDA.
- SOIL SURVEY STAFF 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agricultural Handbook* nº 436. USDA.
- VARGAS G. 2008. Fragmentación y conectividad de ecosistemas en el sector del Proyecto Geotérmico Miravalles y sus alrededores. 1975 - 2007. *Rev. Reflexiones* 87(2):9-38.
- VARGAS JR, BARQUERO R. 1998. Estudio Geológico para la construcción de la casa de máquinas del Proyecto Geotérmico Miravalles. Dirección de Ingeniería Civil. ICE. 38 p.
- VEGA E. 2005. Geologic model of the Miravalles geothermal field, Costa Rica. ICE-Centro de servicios recursos geotérmicos. San José, CR. In: *Proceedings world geothermal congress 2005*. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- ZALEWSKI M. 2002. Ecohydrology—the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. *Hydrological Sciences Journal* 47(5):823-832.