
CALIBRACIÓN DE EQUIPOS TDR PARA SU USO EN SUELOS

NO DISTURBADOS

María Elena Naranjo y Michele Ataroff

RESUMEN

La tecnología de TDR (time domain reflectometers) ofrece una serie de ventajas que ha promovido su uso en el campo de la eco-hidrología. Se han empleado varios enfoques para convertir los datos de estos sensores a resultados volumétricos de humedad en el suelo, como calibraciones sitio-específicas, calibraciones generales y modelos generales o integrales. La falta de universalidad en las ecuaciones y modelos propuestos y las características de muchos suelos andinos con altos contenidos de arcilla y materia orgánica, hace que la generación de las curvas sitio-específicas siga siendo indispensable. En este trabajo se propone un protocolo para la construcción de curvas de calibración para

suelos naturales en laboratorio y se presentan diez curvas de calibración para suelos de selva nublada andina, empleando equipos de TDR marca Campbell, Modelo CS615. Las curvas de calibración mostraron un ajuste a ecuaciones de rectas, diferentes para cada suelo a pesar de su proximidad. Los suelos superficiales de selva nublada analizados mantuvieron su estatus hídrico a lo largo del año en términos de los balances mensuales, particularmente en aquellos bajo cobertura de selva. Esto indica el papel regulador de la selva en el recurso hídrico y enfatiza la importancia de un manejo del sistema ganadero que preserve esta función evitando compactación de los suelos.

Introducción

La variedad de dispositivos agrupados dentro de los equipos TDR (*time domain reflectometers*) se ha convertido en una de las técnicas modernas más ventajosas para el estudio de la humedad en el suelo, dadas la facilidad de su instalación, la posibilidad de obtener datos automatizados y continuos, y sus costos relativamente bajos. Además, ofrece una alternativa de alta precisión y resolución espacio temporal, rápida, confiable y que permite el acceso a muestras mínimamente disturbadas para medir el contenido hídrico y la conductividad hidráulica del suelo (Roth *et al.*, 1990; Jones *et al.*, 2002; Mojid y Cho, 2004).

Aunque factores tales como la cantidad de raíces y la

pedregosidad pueden alterar notablemente las medidas de los sensores (Reinhart, 1961; Mojid y Cho, 2004), algunos cálculos pueden corregir estos efectos. También resulta crítica la instalación de los instrumentos, pues se ha demostrado que la presencia de burbujas de aire alrededor de las varillas afecta las mediciones (Knight *et al.*, 1997; Walker *et al.*, 2004). La respuesta de los sensores puede variar con la textura del suelo, en particular para altos contenidos de arcilla, con el contenido de materia orgánica, la densidad aparente, la conductividad eléctrica y la temperatura del suelo (Campbell Scientific, 1996; Gong *et al.*, 2003).

El uso de los datos proporcionados por los equipos TDR requiere de la conversión de las lecturas del sensor,

expresadas originalmente en unidades de tiempo, a datos reales de humedad en el suelo. Considerando que tal conversión depende de los factores arriba mencionados, muchos investigadores han optado por emplear calibraciones sitio-específicas (Herkelrath *et al.*, 1991; Bruno *et al.*, 2006; Murillo *et al.*, 2008) o calibraciones más generales basadas en resultados de una amplia variedad de tipos de suelo en cuanto a textura, contenido de raíces, contenido de materia orgánica o concentración de sales, empleando medidas de tiempo de tránsito del pulso eléctrico entre las varillas de los TDR (Topp *et al.*, 1980; Jones *et al.*, 2002). Sin embargo, las generalizaciones como las de Topp *et al.* (1980) han resultado no ser tan universales como se

esperaba. Más aun, la inclusión de parámetros tales como contenido de arcillas y materia orgánica en calibraciones sitio-específicas no permite extrapolar los resultados a otros suelos (Jacobsen y Schjønning, 1993).

Otros autores han propuesto modelos que pretenden ser muy generales como los modelos dieléctricos mixtos (*dielectric mixing models*) basados en las constantes dieléctricas y en los volúmenes de las fracciones sólida, líquida y gaseosa que constituyen el suelo (Roth *et al.*, 1990; Dirksen y Dasberg, 1993) y que permiten conocer el contenido volumétrico de agua mediante la constante dieléctrica aparente. Sin embargo, este tipo de alternativa requiere conocer parámetros tales como porosidad y el número

PALABRAS CLAVE / Andes Venezolanos / Eco-hidrología / Selva Nublada / TDR /

Recibido: 29/10/2014. Modificado: 22/05/2015. Aceptado: 25/05/2015.

María Elena Naranjo. Licenciada en Biología, Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. M.Sc. en Gestión de Recursos Naturales Renovables y Medio Ambiente, Centro Interamericano de Desarrollo Ambiental

y Territorial, Venezuela. Doctora en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE-ULA), Venezuela. Profesora, ULA, Venezuela. e-mail: mnanranjo@ula.ve

Michele Ataroff. Licenciada en Biología, ULA, Venezuela. M.Sc. y Doctora en Ecología Tropical, ICAE-ULA, Venezuela. Profesora del ICAE-ULA, e-mail: ataroff@ula.ve

CALIBRATION OF TDR EQUIPMENTS FOR USE IN UNDISTURBED SOILS

María Elena Naranjo and Michele Ataroff

SUMMARY

TDR (time domain reflectometer) equipments offer a group of advantages that have promoted its use in the field of hydro-ecology. Several approaches have been employed to convert the data from these sensors to soil water volumetric results, such as site-specific calibrations, general calibrations and general or integral models. Due to the lack of universality of the proposed models and equations, and the characteristics of many Andean soils with high content of clay and organic matter, the generation of site-specific curves continues to be indispensable. A protocol for the construction of calibration curves for natural soils in the labo-

ratory is proposed in this paper, and ten calibration curves for Andean cloud forest soils are presented, using Campbell Model CS615 TDR sensors. The calibration curves showed a good fit to straight line equations, and were different for each soil despite their proximity. The analyzed cloud forest superficial soils maintained their water status along the year in terms of their water balance, particularly those under forest cover. This indicated the forest regulatory for the water resources and emphasizes the importance of a cattle system management that preserves this function, avoiding soil compaction.

CALIBRAGEM DE EQUIPAMENTOS TDR PARA SEU USO EM SOLOS NÃO DISTURBADOS

María Elena Naranjo e Michele Ataroff

RESUMO

A tecnologia TDR (time domain reflectometers) oferece uma série de vantagens que tem promovido seu uso no campo da ecologia. Tem-se empregado vários enfoques para converter os dados destes sensores em resultados volumétricos de umidade no solo, como calibrações sítio-específicas, calibrações gerais e modelos gerais ou integrais. A falta de universalidade nas equações e modelos propostos e as características de muitos solos andinos com altos conteúdos de argila e matéria orgânica, faz com que a geração das curvas sítio-específicas continue sendo indispensável. Neste trabalho se propõe um protocolo para a construção de curvas de calibragem para

solos naturais em laboratório e se apresentam dez curvas de calibragem para solos de selva nublada andina, empregando equipes TDR marca Campbell, Modelo CS615. As curvas de calibragem mostraram um ajuste em equações de retas, diferentes para cada solo apesar de sua proximidade. Os solos superficiais, de selva nublada, analisados mantiveram seu status hídrico ao longo do ano em termos dos balanços mensais, particularmente naqueles sob cobertura de selva. Isto indica o papel regulador da selva no recurso hídrico e enfatiza a importância de um manejo do sistema de criação de gado que preserve esta função evitando compactação dos solos.

dieléctrico de la matriz del suelo, cuya medida resulta más complicada que el obtener una curva de calibración sitio-específica, o no resultan funcionales bajo algunos tipos de suelo, especialmente arcillosos, orgánicos, muy húmedos o salinos (Jones *et al.*, 2002; Gong *et al.*, 2003).

El desarrollo de modelos más integrales orientados a simular el crecimiento de las plantas y el movimiento del agua, nutrientes y pesticidas en la zona radicular, y que permiten estimar el contenido de agua en el perfil del suelo, como el modelo de calidad de agua en la zona radicular (Ahuja *et al.*, 2000; Heathman *et al.*, 2003), todavía reclama la disponibilidad de datos reales de campo que puedan soportar el marco conceptual en el que se basan (Heathman *et al.*, 2003).

Por otro lado, muchos de los estudios en el campo de la eco-hidrología se han dirigido a resolver problemas en agro-ecosistemas, donde los suelos están alterados por las prácticas de manejo, con homogenización y mezcla de horizontes, pérdida de la estructura y de la densidad aparente original, y cambios en la composición, particularmente en términos de materia orgánica y nutrientes. Ese tipo de suelos se ajusta mejor a las curvas de calibración generales presentadas en los manuales de los sensores de humedad, como los fabricados por Campbell Scientific, aunque algunos autores han sugerido que siempre es conveniente la calibración (Murillo *et al.*, 2008). Sin embargo, el estudio en ecosistemas naturales requiere obligatoriamente de la construcción de curvas de

calibración para cada suelo bajo estudio, puesto que sus condiciones físico químicas suelen alejarse considerablemente de las de aquellos suelos disturbados.

Diversos estudios en suelos andinos venezolanos muestran que los altos contenidos de materia orgánica y de arcilla son condiciones frecuentes en las selvas nubladas y pasturas de reemplazo (Vera y López, 1995; Oballos, 1997), lo cual plantea la necesidad de emplear calibraciones sitio-específicas para esta extensa área geográfica. En este trabajo se propone un protocolo de calibración de equipos de TDR para suelos naturales en laboratorio, se presentan diez curvas de calibración para suelos de una selva nublada andina, se estudia el curso hídrico anual de suelos superficiales de esa selva y su pastura de

reemplazo, y se analiza la variabilidad espacial de la humedad en suelos naturales.

Métodos

Suelos naturales

Los suelos empleados provinieron de la Finca El Cañadón, sector Capaz, 9km ESE de La Azulita, Estado Mérida, Venezuela (239561 Este, 962642 Norte; Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19), a 2200msnm.

Entre los años 2004 y 2010 esta zona registró en promedio 1137mm de precipitación anual, distribuidos en un régimen bimodal con máximos en mayo y agosto-octubre y con isoterma anual de 14,3°C (Naranjo, 2013). La vegetación original del área correspondía a una selva nublada montana alta con estructura compleja,

dosel irregular de unos 30m y con una alta diversidad vegetal, particularmente de árboles y epifitas (Ataroff y Sarmiento, 2003; Schwarzkopf *et al.*, 2011). En la actualidad, quedan fragmentos dispersos, en su mayoría con tamaños <10ha, debido al reemplazo de la selva original principalmente por pasturas de *Pennisetum clandestinum* (kikuyo) y *Melinis minutiflora* (capín melao o yaraguá) para la cría de ganado vacuno (Rodríguez-Morales *et al.*, 2009).

Estudios realizados dentro de esta misma cuenca han encontrado que los suelos de los sectores de La Carbonera y San Eusebio, bajo cobertura de selva nublada, corresponden a Ultisoles e Inceptisoles de la Formación Colón (Oballos, 1995) y que la fracción mineral gruesa está constituida fundamentalmente por lutitas en diversos grados de alteración (Oballos, 1997).

Los suelos empleados se ubicaron en dos posiciones topográficas, ladera y tope, de dos unidades ecológicas: fragmento de selva nublada y pastura de *Melinis minutiflora* (Tabla I). La caracterización de los suelos presentada en la Tabla I se hizo siguiendo técnicas estandarizadas: método de Bouyoucos para la textura, método del hoyo para la densidad aparente, y tamizado de los suelos a 2mm para obtención de pedregosidad y cantidad de raíces (Motta *et al.*, 1990). Los datos de materia orgánica fueron determinados

en el Laboratorio de Suelos, Instituto de Geografía, Universidad de Los Andes, mediante el método de combustión húmeda de Walkley y Black (Walkley, 1947).

Protocolo para calibración

Se colectaron 4-6kg de suelo en peso seco para cada curva de calibración. El suelo se extendió y secó a temperatura ambiental en el laboratorio durante un mes aproximadamente. Las muestras no fueron tamizadas para conservar la fracción gruesa y los agregados primarios, que forman parte de las condiciones naturales en las que efectivamente miden los sensores en el campo.

El suelo y los equipos de TDR se instalaron en bandejas rectangulares plásticas para evitar la alteración de las medidas de los sensores (Campbell Scientific, 1996) y la pérdida de agua. En ellos se acomodó una base de suelo de 4cm de profundidad, luego se instaló el equipo de TDR en posición horizontal y finalmente se cubrió con otra capa de suelo similar, ejerciendo una leve compactación con las manos. Los recipientes fueron cuidadosamente cubiertos con láminas de plástico para evitar evaporación.

Al inicio de los experimentos se extrajo una pequeña muestra de suelo para determinar el contenido inicial de agua por gravimetría, cuantificando peso húmedo y peso seco, una vez sometido a estufa a 105°C por 48h.

Se aplicaron dos riegos diarios de 100ml de agua hasta llegar a saturación, haciendo una distribución lo más uniforme posible para evitar las subestimaciones debidas a la heterogeneidad de la humedad en el suelo (Mojid y Cho, 2002). El dato del TDR que correspondió a cada riego se tomó a partir de los valores registrados 1h antes de la siguiente adición de agua y habiendo pasado al menos 5h desde el riego anterior. Finalmente, las muestras de suelo completas se llevaron a peso constante mediante secado en la estufa a 105°C y luego se tamizaron a 2mm para hallar el peso de la fracción fina.

a. *Volumen de agua.* El volumen de agua contenido en la muestra de suelo al inicio del experimento se calculó como

$$V_{H_2O}^{\circ} = \frac{(PHm - PSm)}{PSm} \times PSTff$$

donde PHm: peso húmedo de la muestra de suelo tomada para determinación gravimétrica de agua, PSm: peso seco de esta misma muestra tamizada a 2mm, y PSTff: peso seco de todo el suelo usado en la calibración (sin tamizar).

A este volumen inicial se sumó la cantidad de agua de riego agregada para obtener la cantidad de agua acumulada en el suelo de la calibración:

$$V_{H_2O}^1 = V_{H_2O}^{\circ} + \text{Riego}_1$$

$$V_{H_2O}^n = V_{H_2O}^{n-1} + V_{H_2O} \text{Riego}_n$$

b. *Densidad aparente de la muestra de suelo.* Debido a la manipulación (extracción, transporte y montaje de los experimentos), los suelos naturales inevitablemente pierden parte de su estructura original, siendo necesario determinar la nueva densidad aparente (Da_{sd}) a la que se realizan las calibraciones. Para ello se empleó el peso de suelo seco de la fracción fina pasada por estufa durante 72h a 105°C y tamizada a 2mm y se dividió entre el volumen total que ocupaba ese suelo en el recipiente en el que se realizó la calibración.

c. *Volumen de la fracción fina del suelo.* La estimación del contenido de humedad del suelo sobre la base del volumen total puede sobreestimar el agua debido a la presencia de piedras, donde la diferencia con los valores reales incrementa con la pedregosidad. Por recomendaciones de Reinhart (1961), los cálculos finales de contenido volumétrico de humedad del suelo se realizaron sobre la base del volumen de suelo sin piedras. El cálculo del volumen de la fracción fina de suelo (V_{ff}) requiere el peso seco de la fracción fina (tamizada a 2mm, PST) y la densidad aparente del suelo disturbado (Da_{sd}):

$$V_{ff} = \frac{PST}{Da_{sd}}$$

d. *Contenido relativo de humedad $\theta_{v/v}$.* Se obtuvo dividiendo cada dato de volumen de agua (calculado en a) entre el volumen de la fracción fina del suelo (calculado en c).

e. *Regresiones de calibración.* Los contenidos relativos de humedad $\theta_{v/v}$ procedentes del experimento (calculado en d) se graficaron en función de la medida del TDR que corresponde al tiempo de tránsito del pulso eléctrico entre las dos varillas (τ ; ms). A esos datos experimentales se ajustó una ecuación lineal.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS BAJO ESTUDIO EN EL FRAGMENTO DE SELVA NUBLADA Y LA PASTURA DE *Melinis minutiflora*

Unidad (pendiente)	Horizonte	Prof (cm)	a (%)	L (%)	A (%)	Ped. (%V/V)	Raíces (% P/P)	DA (g·cm ⁻³)	MO (%)
Fragmento en ladera (30°)	OL,OF,OH	8	38	29	33	0,2	8,80	0,86	26,26
	A1	0 a 16	57	18	26	2	0,19	1,14	10,39
	C	32 a >84	59	18	23	36	<0,09	2,35	4,76
Fragmento en tope (3°)	OL,OF,OH	13	70	20	10	0	9,29	0,34	66,00
	A11	0 a 22	45	22	33	0	0,78	0,87	12,23
Pastura en ladera (26°)	A1 (Ap)	0 a 14	53	24	20	6	1,05	1,07	15,61
	AC1	14 a 23	52	28	20	38	1,49	1,20	6,84
	C	39 a >67	55	24	20	47	0,31	1,84	1,87
Pastura en tope (5°)	A1	0 a 8	70	20	10	0,8	1,59	0,96	15,61
	AC1	8 a 22	27	32	41	13	0,95	0,95	13,50

Prof: límites de profundidad de la capa de suelo, a: arena, L: limo, A: arcilla, Ped: pedregosidad, DA: densidad aparente determinada por el método del hoyo, MO: materia orgánica.

Contenido de agua en el suelo con datos de campo

Una vez obtenidas las curvas de calibración es posible transformar datos de los sensores instalados en el campo a cantidades reales de agua. La expresión de los datos de campo en mm de agua depende del volumen de la fracción fina en los suelos naturales, el cual se calcula a partir del espesor del horizonte, descontando la pedregosidad (expresada en V/V) y ajustando por la pendiente (1/coseno de la pendiente).

Como una forma de ejemplificar la aplicabilidad de las curvas de calibración obtenidas según este protocolo, se ajustaron los datos de ocho equipos TDR Campbell CS615 instalados horizontalmente en las capas superficiales del suelo de tope y ladera en un fragmento de selva nublada y en la pastura de *Melinis minutiflora*, que midieron de manera intermitente entre los años 2005 a 2009, con registros cada 10min.

Variación espacial de los registros en campo

Con el objeto de analizar la variación espacial en la humedad de los suelos se compararon pares de registros en ms de dos equipos instalados en el mantillo del tope y ladera del fragmento y dos en el horizonte A1 del tope y la ladera de la pastura, separados por una distancia de 10-20m y aplicando pruebas de Wilcoxon para dos muestras relacionadas (Zar, 1999). Los registros correspondieron a los meses de enero a diciembre del año 2008, salvo para el caso del mantillo del fragmento que sólo incluye datos de enero a junio del 2008.

Resultados

Curvas de calibración

Los sensores respondieron linealmente a los cambios de humedad para todos los suelos bajo estudio y las calibraciones quedaron ajustadas a ecuaciones

de rectas diferentes para cada capa de suelo (Figura 1), aun cuando estas pertenecieron bien sea al mismo perfil o a perfiles diferentes cercanos, separados por unos 200m entre sí.

En la Tabla II se presentan las ecuaciones que se ajustan a las lecturas de los TDR registradas en v/v para los mismos suelos y experimentos de calibración de la Figura 1. Aunque están elaboradas empleando equipos TDR CS615, los registros en v/v deben coincidir con cualquier otro modelo de TDR a diferencia del tiempo de tránsito τ en ms presentado en la Figura 1.

Aplicación a datos de campo

En comparación con el patrón de precipitación del área de estudio, que muestra dos máximos en el año, la cantidad de agua que retiene el suelo resultó bastante regular en su patrón mensual (Figura 2). Las diferencias entre los promedios máximos y mínimos mensuales de la cantidad de agua en las capas superficiales del suelo alcanzaron entre 11 y 42mm, dependiendo de la capa de suelo; la mayor variabilidad ocurrió en la pastura respecto al fragmento de selva, particularmente en posición de tope (Figura 2). Los promedios anuales de agua en estos suelos oscilaron entre 36 y 90mm para los 8cm iniciales de cada capa, donde el periodo de menores cantidades de agua

coincidió con el periodo de menores precipitaciones, con pérdida neta de agua en el suelo, mientras que ocurrió una acumulación paulatina de agua durante los meses de mayores precipitaciones y hasta finales del año.

La posición topográfica parece generar mayores contrastes de humedad en las capas superficiales del suelo (8cm iniciales) bajo la pastura que bajo el fragmento. La posición más desfavorable correspondió a la ladera de la pastura en la que se registraron los menores valores de humedad a lo largo del año, lo que contrastó con el tope de la pastura cuyos contenidos de agua superaron en más del doble los de la ladera y fueron los mayores entre los cuatro suelos evaluados. El contraste topográfico entre los suelos de fragmento fue sensiblemente menor.

Variación espacial de los registros en campo

La comparación entre series de datos de pares de equipos TDR CS615 instalados en las mismas capas de suelo reveló variaciones en los registros (Mantillo en ladera de fragmento N=6401; Z=-69,291; Mantillo en tope del fragmento N=3786; Z=-53,053; Horizonte A1 en ladera de la pastura N=25347; Z=-137,880; Horizonte A1 en tope de la pastura N=13732; Z=-66,337; para todos los casos P<0,001).

Así, estos dispositivos mostraron valores diferentes bajo condiciones de humedad equivalentes dentro del mismo suelo. Sin embargo, los registros sí parecen coincidir en las variaciones relativas cuando se ordenan los datos; esto es, los pares de TDR coinciden en registrar aumento o disminución de la humedad, aunque no con el mismo valor absoluto.

Discusión

Las curvas de calibración para todos los suelos mostraron un ajuste a diferentes ecuaciones de rectas con altos coeficientes de correlación. Para seis de los diez suelos los datos también mostraron un buen ajuste a funciones sigmoideas, mejorando los coeficientes de determinación en una centésima. Sin embargo, por el hecho que cuatro de los suelos no mostraron ajuste sigmoideal, por los altos coeficientes de determinación encontrados con ecuaciones lineales, dada la mayor sencillez de cálculo de una recta en comparación con una sigmoideal y por tener mayor facilidad para ser comparadas, se proponen calibraciones lineales para los suelos aquí estudiados. Curvas de calibración presentadas en otros trabajos se han ajustado a funciones polinomiales (Campbell Scientific, 1996) o sigmoideas (Bruno *et al.*, 2006) para el modelo CS615,

TABLA II
CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA EQUIPOS DE TDR CAMPBELL CS615
EN SUELOS DE UN FRAGMENTO DE SELVA NUBLADA Y PASTURA
DE *Melinis minutiflora* EN LOS ANDES VENEZOLANOS

Unidad	Capa de suelo	Ecuaciones de calibración	R ²	Intervalo de humedad ($\theta_{v/v}$)
Fragmento en ladera	Mantillo	$\theta_{v/v} = 0,932 \theta_{TDR, v/v} + 0,140$	0,851	0,16-0,54
	A1	$\theta_{v/v} = 0,937 \theta_{TDR, v/v} + 0,092$	0,938	0,18-0,66
	C	$\theta_{v/v} = 2,402 \theta_{TDR, v/v} - 0,106$	0,908	0,08-0,26
Fragmento en tope	Mantillo	$\theta_{v/v} = 0,804 \theta_{TDR, v/v} + 0,494$	0,957	0,53-0,83
	A11	$\theta_{v/v} = 1,340 \theta_{TDR, v/v} + 0,356$	0,947	0,46-0,97
Pastura en ladera	A1	$\theta_{v/v} = 0,582 \theta_{TDR, v/v} + 0,195$	0,980	0,26-0,70
	AC1	$\theta_{v/v} = 0,845 \theta_{TDR, v/v} + 0,140$	0,932	0,19-0,76
	C	$\theta_{v/v} = 0,500 \theta_{TDR, v/v} + 0,207$	0,790	0,21-0,45
Pastura en tope	A1	$\theta_{v/v} = 0,453 \theta_{TDR, v/v} + 0,303$	0,867	0,30-0,62
	AC1	$\theta_{v/v} = 0,683 \theta_{TDR, v/v} + 0,185$	0,968	0,20-0,64

$\theta_{v/v}$: contenido relativo de humedad (en v/v), $\theta_{TDR, v/v}$: lectura del TDR en v/v.

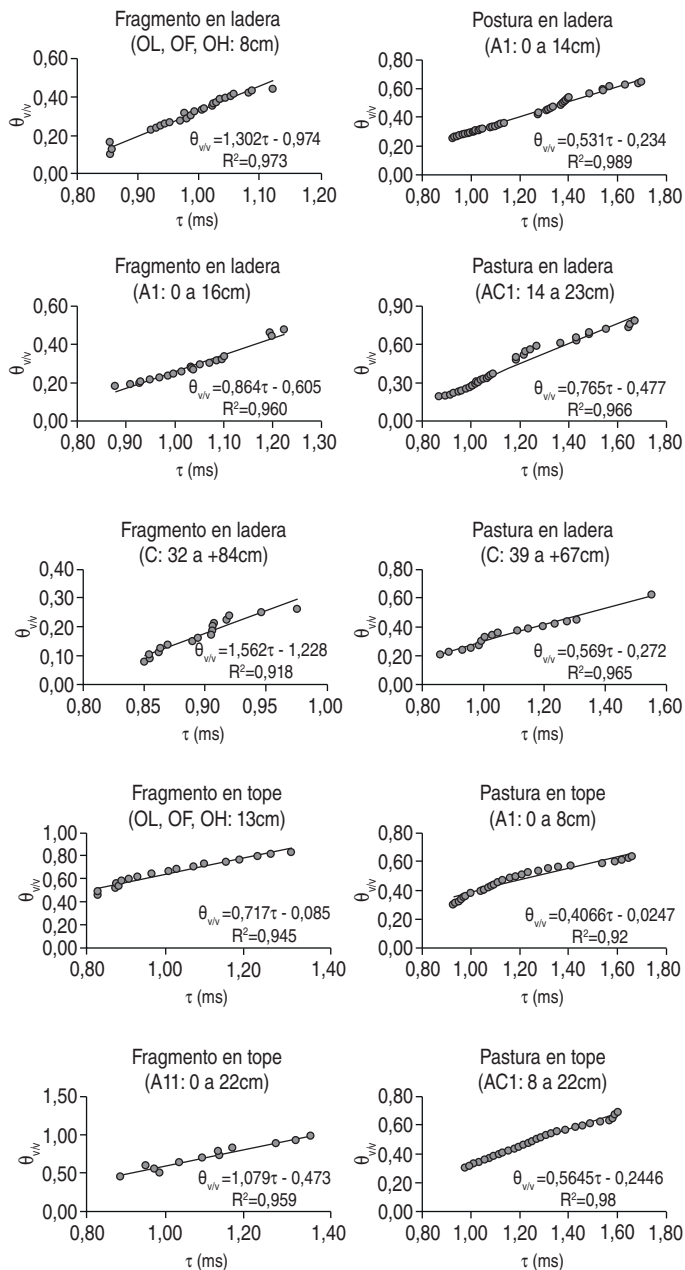


Figura 1. Curvas de calibración para equipos de TDR Campbell CS615 en suelos de un fragmento de selva nublada y una pastura de *Melinis minutiflora* en Los Andes venezolanos. τ : tiempo de tránsito en ms, θ_{vv} : contenido relativo de humedad en v/v.

así como a rectas para otros modelos de equipos TDR (Herkelrath *et al.*, 1991; Schaap *et al.*, 1996).

A pesar de la proximidad de los suelos estudiados, dentro del mismo perfil o de perfiles muy cercanos, fueron notorias las diferencias en cuanto a su comportamiento hídrico, en el sentido de la conversión de la lectura del sensor a su significado en términos de

milímetros, incluso para espesores comparables. Esto enfatiza la necesidad de construir curvas de calibración para interpretar los valores arrojados por el equipo y demuestra que la interpretación sin conversión es errónea. Por ello llama la atención el uso de valores crudos para comparar la humedad del suelo en parches de selvas tropicales y campos adyacentes (Giambelluca *et al.*, 2003), así

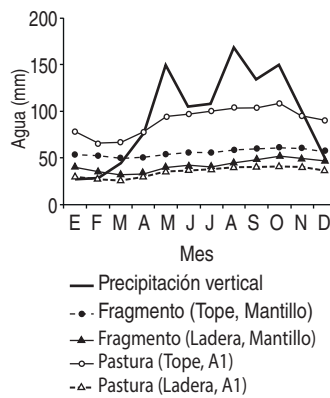


Figura 2. Patrón mensual de agua para los 8cm iniciales de los perfiles suelo en tope y ladera de un fragmento de selva nublada y una pastura de *Melinis minutiflora*. Cálculos a partir de datos fraccionados de 2005 a 2009.

como el uso de solo dos curvas aplicadas a datos de suelos de una selva tropical amazónica de todo un perfil que cubrió hasta 10m de profundidad (Bruno *et al.*, 2006), lo cual contrasta con los presentes hallazgos de marcadas diferencias dentro del mismo perfil de suelo. Sin embargo, calibraciones de equipos TDR en cinco selvas de pino y roble han resultado en una sola curva de calibración con un alto coeficiente de determinación (0,961) de acuerdo a Schaap *et al.* (1996). Igualmente, Young *et al.* (1997) lograron combinar las curvas de calibración para tres suelos de diferente textura: arenoso, franco arenoso y franco limoso.

Las diferencias en el comportamiento hídrico de cada suelo en el presente estudio podrían deberse a la sinergia entre varios factores, tales como la posición topográfica que determina la dirección y velocidad de los flujos hídricos y la cobertura vegetal que determina la velocidad y cantidad de infiltración y escurrimiento. También debe considerarse que hay grandes diferencias en el contenido de materia orgánica, puesto que dos de las capas analizadas corresponden al mantillo del fragmento (en tope y ladera) que está fundamentalmente compuesto de raíces,

hojas y troncos en descomposición. Ello, aunado a un aumento progresivo en la pedregosidad hacia las capas más profundas, determina un gradiente de la densidad aparente en aumento a medida que se profundiza en el perfil de los suelos.

También se trata de suelos arcillosos que son difíciles de incluir en calibraciones generales, probablemente porque el TDR subestima la cantidad de agua para valores de contenido volumétrico por debajo de $0,20-0,25\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ debido a las fuerzas de cohesión del agua en las arcillas, mientras que sobreestima para valores altos de humedad por efecto de la conductividad eléctrica (Gong *et al.*, 2003).

Por otra parte, las diferencias en la respuesta de equipos TDR instalados a poca distancia dentro del mismo suelo dan cuenta de la alta variabilidad de los mismos, lo cual resta confiabilidad a datos de campo que frecuentemente carecen de réplicas o que cuentan con un número de muestras muy bajo.

Sustentado en varios experimentos, el uso de equipos TDR ha sido recomendado por varios autores, desde el reconocido trabajo de Topp *et al.* (1980), con sustanciales mejoras en esta técnica desde entonces. Algunos autores como Walker *et al.* (2004) han obtenido mejores resultados con los TDR tipo conector que con los TDR CS615 y han reportado que estos últimos sobreestiman el contenido de agua en condiciones de saturación. Sin embargo, no hicieron las curvas de calibración como las que pensamos se requieren para la interpretación de las medidas y no especifican si usaron alguna ecuación previamente publicada para sus suelos, ubicados en el este de Australia.

Como una recomendación general, resulta de suma utilidad acompañar los resultados de contenido de humedad de los suelos estudiados con datos más completos que el reporte de textura, que es el único que se suele incluir en los trabajos de este tipo. Esto es relevante

en el contexto de la interpretación adecuada de los resultados de humedad, la posibilidad de relacionar estos resultados con diversas características de los suelos y del desarrollo de modelos más generales que puedan incluir la mayor variedad posible de suelos. Una vez obtenida en términos volumétricos la cantidad de agua en el suelo, después de la aplicación de la curva de calibración correspondiente, es relativamente sencillo transformar los resultados a mm de agua, con datos de espesor del horizonte, pedregosidad y pendiente. Esta conversión permite conocer los valores absolutos de agua en el suelo y es mucho más útil en estudios eco-hidrológicos y de distribución del agua en los diversos componentes y flujos de agua ecosistémicos.

Los suelos de selva nublada analizados en este trabajo fueron capaces de mantener su estatus hídrico con relativa independencia de las variaciones en la precipitación en términos de los balances mensuales y respecto a los suelos de pastura, lo cual podría darle estabilidad al sistema puesto que garantiza la disponibilidad de agua en el suelo durante las épocas de menores ingresos. El patrón de baja variabilidad en el contenido hídrico mensual en el suelo coincide con los hallazgos de Bruno *et al.* (2006), quienes encontraron que el contenido de agua fue casi constante durante la estación húmeda en suelos de selva amazónica (ambiente con $P_v = 1273$ mm anuales); sin embargo, en cuanto a valores absolutos, ellos encontraron valores de humedad mayores durante la época seca ($>0,42$ a $0,44 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) y valores similares a ligeramente mayores durante la época húmeda ($>0,44$ a $>0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

En la cuenca experimental del Río Little Washita en Oklahoma, en época de sequía Heathman *et al.* (2003) registraron un contenido volumétrico de humedad que varió entre 0,01 y $0,31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para suelos francos entre 0 y 5 cm de profundidad y bajo cobertura de pasturas de diferentes especies. Se trata de valores bastante

más bajos que los obtenidos en el presente trabajo bajo un clima marcadamente estacional, pero de los que no se conoce cuánto pueden representar en mm para esos suelos. Además, estos valores también podrían estar afectados por la evaporación, ya que responden a una capa de suelo muy fina.

El cambio de cobertura arbórea a pastura genera importantes cambios en el contenido de humedad, particularmente en las posiciones de tope, lo cual podría ser atribuido a la pérdida de la capa orgánica que permitiría una mejor regulación de los flujos hídricos edáficos tanto a lo largo del año como respecto a la topografía. Aunque todos los suelos mostraron estabilidad en el contenido de agua a lo largo del año, aquellos bajo cobertura de selva experimentaron menores variaciones en comparación con los suelos bajo pasturas, tanto en posición de tope como en ladera, evidenciando una capacidad reguladora del agua en el suelo superior en los bosques frente a sus sistemas de reemplazo. Un caso similar fue presentado Davidson *et al.* (2000), quienes encontraron que los contenidos volumétricos de agua en el suelo de selva primaria de la Amazonia brasilera variaron entre $<0,2$ hasta $0,45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ a lo largo del año, mientras que la pastura activa mostró los menores contenidos de humedad mensual, así como los valores más extremos entre los ambientes comparados.

En general, los cambios de cobertura por deforestación e instalación de pasturas para ganadería generan cambios físicos e hidrológicos en el suelo, debido a que la compactación incrementa la densidad aparente, disminuye la infiltración y genera pérdidas de materia orgánica, sobre todo en las capas más superficiales (Alegre y Lara, 1991; Amézquita y Pinzón, 1991; Lal, 1996; Islam y Weil, 2000). Claramente es una condición de los suelos que debería evitarse en los sistemas de ganadería que son tan extendidos en las cuencas andinas

como actividad económica de los pobladores, a través del control de la densidad de animales, la rotación de potreros y la implementación de medidas de mitigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jesús Vielma y Genaro Vielma por permitirnos el acceso y la instalación de equipos en la Finca El Cañadón, así como la valiosa ayuda de Alexander Nieto, Zulay Méndez y Francis Guillén. Las discusiones con Daniel Machado fueron determinantes para concretar el protocolo de cálculo.

REFERENCIAS

Alegre JC, Lara PD (1991) Efecto de los animales en pastoreo sobre las propiedades físicas de los suelos de la región tropical húmeda de Perú. *Past. Trop.* 13(1): 18-23.

Amézquita E, Pinzón A (1991) Compactación de suelos por pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Past. Trop.* 13(2): 21-26.

Ataroff M, Sarmiento L (2003) *Diversidad en Los Andes de Venezuela. I Mapa de las Unidades Ecológicas del Estado Mérida*. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. Universidad de Los Andes. Venezuela. CD-ROM.

Bruno RD, da Rocha HR, de Freitas HC, Goulden ML, Miller SD (2006) Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrol. Proc.* 20: 2477-2489.

Campbell Scientific (1996). CS615 *Water Content Reflectometer*. Instruction manual. Ver. 8221-07, Rev. 10/96. Campbell Scientific Inc. Logan, UT, EEUU.

Davidson EA, Verchot LV, Henrique Cattânio J, Ackerman IL, Carvalho JEM (2000) Effects of soil water contents in soil respiration in forests and cattle pastures of Eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48: 53-69.

Dirksen C, Dasberg S (1993) Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 660-667.

Giambelluca TW, Ziegler AD, Nullet MA, Truong DM, Tran LT (2003) Transpiration in a small tropical forest patch. *Agric. Forest Meteorol.* 117: 1-22.

Giertz S, Diekkrüger B (2003) Analysis of the hydrological processes in a small headwater catchment in Benin (West Africa). *Phys. Chem. Earth* 28: 1333-1341.

Gong Y, Cao Q, Sun Z (2003) The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrol. Proc.* 17: 3601-3614.

Heathman GC, Starks PJ, Ahuja LR, Jackson TJ (2003) Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content. *J. Hydrol.* 279: 1-17.

Herkelrath WN, Hamburg SP, Murphy F (1991) Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resource. Res.* 27: 857-864.

Islam KR, Weil RR (2000) Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79: 9-16.

Jackson RB, Anderson LJ, Pockman WT (2000) Measuring water availability and uptake in ecosystem studies. En Sala O, Jackson R, Money H, Howarth W (Eds.) *Methods in Ecosystem Science*. Springer, New York. pp. 199-214.

Jacobsen OH, Schjønning P (1993) A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *J. Hydrol.* 151: 147-157.

Jones SB, Wraith JM, Or D (2002) Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrol. Proc.* 16: 141-153.

Knight JH, Ferré PA, Rudolph DL, Kachanoski RG (1997) Numerical analysis of the effects of coating and gaps upon relative dielectric permittivity measurement with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 33: 1455-1460.

Lal R (1996) Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in Western Nigeria. I. Soil physical and hydrological properties. *Land Degrad. Devel.* 7: 19-45.

Mojid MA, Cho H (2002) Response of the core and shield rods of time-domain reflectometry probe to transverse soil-water content heterogeneity. *J. Hydrol.* 262: 21-27.

Mojid MA, Cho H (2004) Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)-measured composite dielectric constant of root mixed soils for estimating soil-water content and root density. *J. Hydrol.* 295: 263-275.

- Motta B, Rodríguez C, Montenegro H, Marulanda J, Correa A, Bendeck M (1990) *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos*. 5ª ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 502 pp.
- Murillo J, Villafañe R, Basso C, Trujillo A (2008) Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco. *Rev. Fac. Agron. LUZ* 25: 211-222.
- Naranjo ME (2013) *Impacto de la Fragmentación de la Selva Nublada y su Reemplazo por Pasturas sobre su Estructura y Ecohidrología en Los Andes Venezolanos*. Tesis. Universidad de Los Andes. Venezuela.
- Oballos J (1995) *Caracterisation des Sols de la Region de Las Cruces-Santa Elena de Arenales (Mérida, Venezuela)*. Tesis. Université de Toulouse-Le Mirail. Francia. 204 pp.
- Oballos J. (1997). Micromorfología de los suelos en la cuenca del río Capaz, región Las Cruces-Santa Elena de Arenales. Mérida-Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 41(1): 53-59.
- Reinhart KG (1961) The problem of stones in soil-moisture measurement. *Soil Sci. Soc. Proc.* 25: 268-270.
- Rodríguez-Morales M, Chacón-Moreno E, Ataroff M (2009) Transformación del paisaje de selvas de montaña en la cuenca del río Capaz, Andes Venezolanos. *Ecotropicos* 22: 64-82.
- Roth K, Schulin R, Flüher H, Attinger W (1990) Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26: 2267-2273.
- Schaap MG, de Lange L, Heimovaara TJ (1996) TDR calibration of organic forest floor media. *Soil Technol. 11*: 205-217.
- Schwarzkopf T, Riha SJ, Fahey TJ, Degloria S (2011) Are cloud forest tree structure and environment related in the Venezuelan Andes? *Aust. Ecol.* 36: 280-289.
- Topp GC, Davis JL, Annan AP (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.
- Vera M, López R (1995) Estabilidad estructural de suelos en zona de selvas nubladas de Los Andes de Mérida, Venezuela. *Venezuelos* 3: 37-45.
- Walkley A (1947) A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils - Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-264.
- Walker JP, Willgoose GR, Kalma JD (2004) In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *J. Hydrol.* 293: 85-99.
- Young MH, Fleming JB, Wierenga PJ, Warrick AW (1997) Rapid laboratory calibration of time domain reflectometry using upward infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 707-712.
- Zar JH (1999) *Biostatistical Analysis*. 4ª ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, EEUU. 663 pp.