

## CARACTERIZACION HIDRAULICA DE ANDOSOLES E HISTOSOLES DEL AUSTRAL DEL ECUADOR

Pablo Borja Ramón<sup>1</sup>, Vicente Iñiguez<sup>1</sup>, Patricio Crespo<sup>1,2</sup>, Pedro Cisneros<sup>1</sup>, Felipe Cisneros<sup>1</sup>, Jan Feyen<sup>1</sup>

### RESUMEN

En primer lugar se evaluó la curva de retención de agua (curva de pF) tanto en laboratorio como en condiciones cercanas a las de campo a partir de muestras inalteradas, provenientes de una zona de páramo. Aparentemente los métodos de laboratorio no estarían describiendo adecuadamente la curva de pF. Por otro lado se obtuvo una curva de calibración para sensores de TDR (suelos Andosoles e Histosoles) y para una sonda de capacitancia (suelos Andosoles) con valores de  $R^2$  superiores a 0.80 en todos los casos, a partir de muestras inalteradas tomadas en anillos con un volumen representativo de suelo. Con estos datos fue posible monitorear el contenido de humedad de un perfil de suelo Andosol en diferentes profundidades durante un período de 9 meses y con información registrada cada 15 minutos, en una zona cercana a lugar de procedencia de las muestras usadas para la calibración de los TDR's.

### INTRODUCCION

El entendimiento de la producción de agua en microcuencas de los páramos del sur del Ecuador requiere la caracterización de las propiedades hidráulicas de los suelos, formados a partir de la acumulación de cenizas volcánicas y materia orgánica. En la actualidad existe una carencia de información de suelos de páramo respecto a las propiedades hidráulicas. Los métodos de laboratorio utilizados para la determinación de la curva de retención de agua (curva de pF) no han sido validados adecuadamente, por esta razón son necesarias mediciones a partir de volúmenes más grandes de muestra. Por otro lado, son escasos los estudios acerca de monitoreos continuos del contenido de agua del suelo en este ecosistema particular.

**Palabras clave:** suelos de páramo, propiedades hidráulicas, curva de retención de agua del suelo, TDR, sonda de capacitancia.

### MATERIALES Y METODOS

#### Zona de estudio

La investigación se llevó a cabo en una zona de páramo del Austral Ecuatoriano denominada Quimsacocha a una altitud superior a los 3700 m s.n.m., ubicada a unos 85 km al Sur - Oeste de la ciudad de Cuenca (Figura 1).

Los suelos dominantes en este ecosistema son los Andosoles e Histosoles (ISSS Working Group RB, 1998), cuyos perfiles representativos pueden verse en las Figuras 2 y 3. La vegetación que predomina está representada por *Calamagrostis sp.* (pajonal, en suelos Andosoles) y *Plantago rigida* (almohadillas, en suelos Histosoles). Estos suelos están caracterizados por una alta capacidad de retención de agua la cual es atribuida principalmente al elevado contenido de materia orgánica (Buytaert, 2004). Otras características son: baja densidad aparente (0.27 – 0.94 para Andosoles y 0.04 – 0.27 g cm<sup>-3</sup> para Histosoles); bajo pH en agua (4 - 5.1 para Andosoles y 4 - 7 para Histosoles), de

<sup>1</sup> Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca.

<sup>2</sup> Institute of Landscape, Ecology and Resources Management, Justus-Liebig University Giessen, Germany.  
Correo electrónico: [mborja77@geologist.com](mailto:mborja77@geologist.com)

acuerdo con los datos obtenidos a partir de muestras tomadas en diferentes sitios dentro del área de estudio.

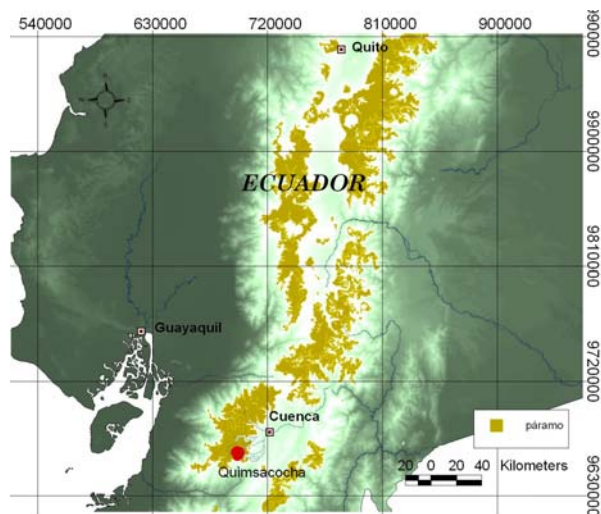


Figura 1: Zona de estudio



Figura 2: Perfil de Andosol

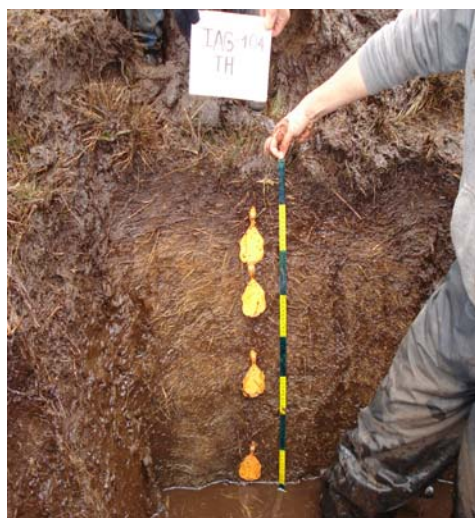


Figura 3: Perfil de Histosol

## METODOS

El método de flujo de salida por etapas múltiples (Multistep out-flow) (van Dam et al., 1992) fue aplicado en muestras tomadas en anillos de Kopecky con un volumen de  $100 \text{ cm}^3$ , para obtener la curva de humedad del suelo en laboratorio. Paralelamente el contenido de agua del suelo y la correspondiente carga de presión fueron medidos utilizando el método de TDR (Time Domain Reflectometry) y tensiómetros. Para esto se emplearon grandes anillos con muestras de suelo en volúmenes de  $20\ 000$  y  $65\ 000 \text{ cm}^3$  (Figura 4), para garantizar que las características de distribución de poros del suelo estén bien representadas. Las 3 muestras de Andosol fueron tomadas en los anillos más grandes ( $65\ 000 \text{ cm}^3$ ), mientras que las 3 muestras de Histosol fueron tomadas en los anillos de

20 000 cm<sup>3</sup>. Para la determinación del contenido volumétrico de agua se utilizaron cilindros pequeños (2 cm de diámetro), los cuales sirvieron para extraer muestras de suelo de forma periódica y tomando como referencia los cambios registrados por los tensiómetros con el propósito de poder construir una curva de pF que refleje el comportamiento del suelo en cuanto a su contenido de humedad.



Figure 4: Sensores en las muestras inalteradas de suelo



Figura 5: Sonda de capacitancia en una muestra de Andosol

Adicionalmente en una de las muestras alteradas la humedad fue monitoreada periódicamente utilizando una sonda de capacitancia (Troxler Sentry 200-AP) (Figura 5). Las muestras grandes fueron expuestas bajo condiciones naturales permitiendo el drenaje libre y la evapotranspiración (Figura 6). Previo al monitoreo del descenso del contenido de humedad de las muestras, estas fueron completamente saturadas. Para evitar que la lluvia afecte el experimento, las muestras se colocaron dentro de una estructura cubierta con plástico de invernadero, lo cual contribuyó además a acelerar el proceso de secamiento. El invernadero poseía paredes que podían ser plegadas en caso de que la temperatura al interior fuera excesiva. De esta manera se consiguió que las especies vegetales que crecían en las muestras se mantuvieran vivas hasta el final del experimento.



Figura 6: Invernadero usado para acelerar el secamiento de las muestras de suelo y protegerlas de la lluvia

En el sitio donde las muestras de Andosol fueron tomadas, se instalaron una estación meteorológica y TDR's enterrados a varias profundidades, para monitorear la variación del contenido de humedad durante un período de 9 meses. Este período fue dividido en dos partes: Junio – Diciembre (período seco) y Enero – Marzo (período húmedo).

**RESULTADOS**

Las Figuras 7 y 8 describen las señales de salida versus la fecha para las sondas de TDR insertadas en las muestras de Andosoles e Histosoles. A partir del descenso de la señal se puede concluir que el drenaje y secamiento de las muestras tuvo lugar de forma muy uniforme. Sin embargo se pueden ver claras diferencias entre las señales correspondientes a una muestra con almohadillas como vegetación predominante (muestra 1, Fig. 8) y una con vegetación de tipo musgos (muestra 2, Fig. 8). En ambos casos (Fig. 8) los suelos fueron Histosoles y los resultados apuntan a que la vegetación principalmente compuesta por musgo es más susceptible a la pérdida de humedad frente a condiciones de secamiento. Esto también se pudo comprobar por el hecho de que al final del experimento casi el 100 % de la vegetación de tipo musgo había muerto, mientras que las especies de tipo almohadillas permanecieron con vida en un alto porcentaje.

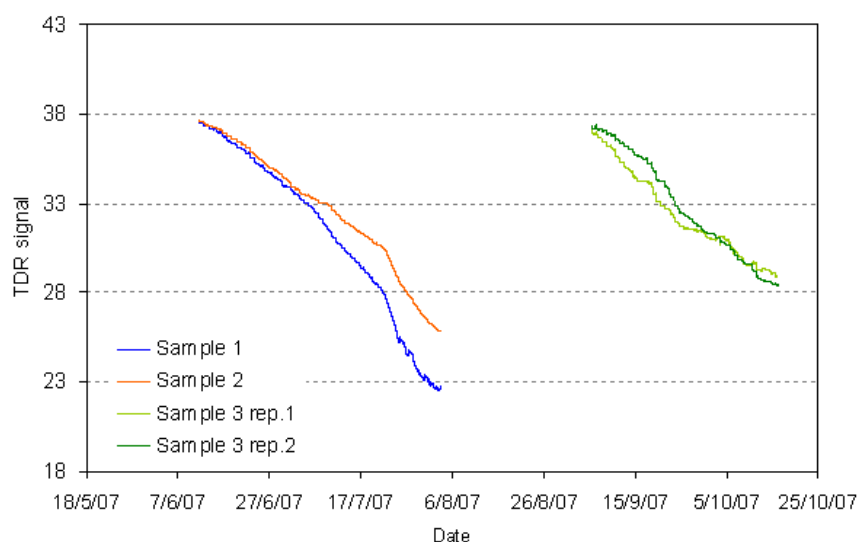


Figura 7: Señal de TDR para Andosoles

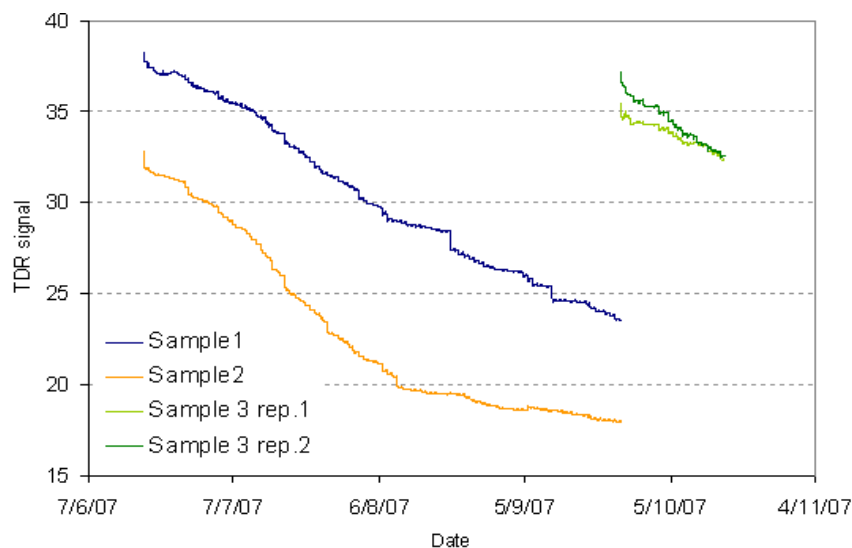


Figura 8: Señal de TDR para Histosoles

Las Figuras 9, 10 y 11 presentan una regresión lineal entre las señales del TDR y de la sonda de capacitancia vs. el contenido de agua del suelo. El coeficiente de determinación fue mayor que 0.8. El rango de la señal de TDR, dentro de la calibración que fue llevada a cabo, es de 31 – 37  $\mu$ s (micro segundos) para el caso de los Andosoles, mientras que para el caso de los Histosoles está entre 32 – 36  $\mu$ s. En el caso de la sonda de capacitancia, para una muestra de Andosol, el rango de la señal es de 3300 – 3900.

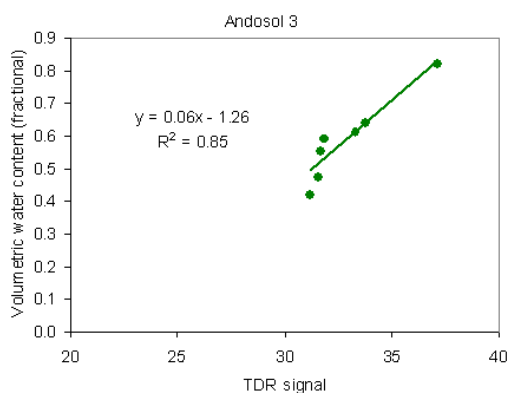


Figura 9: Curva de calibración de TDR para la muestra 3 de Andosol

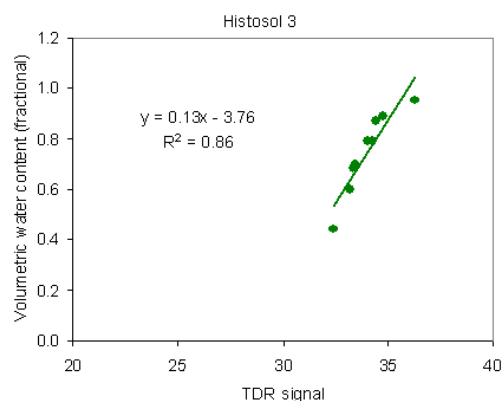


Figura 10: Curva de calibración de TDR para la muestra 3 de Histosol

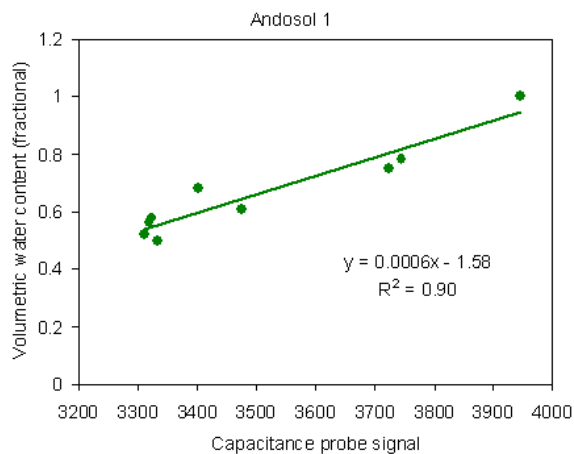


Figura 11: Curva de calibración de la sonda de capacitancia para la muestra de Andosol

La curva de retención de agua de las muestras de suelo fue reconstruida en el rango de presión de -561cm hasta saturación (rango correspondiente al tensiómetro). Para diferentes cargas de presión en este rango se encontraron diferencias significativas entre el contenido de agua del suelo medido con el método de flujo de salida por etapas múltiples (Multistep Outflow) y el contenido de agua monitoreado en las muestras cilíndricas grandes (Figuras 12 y 13).

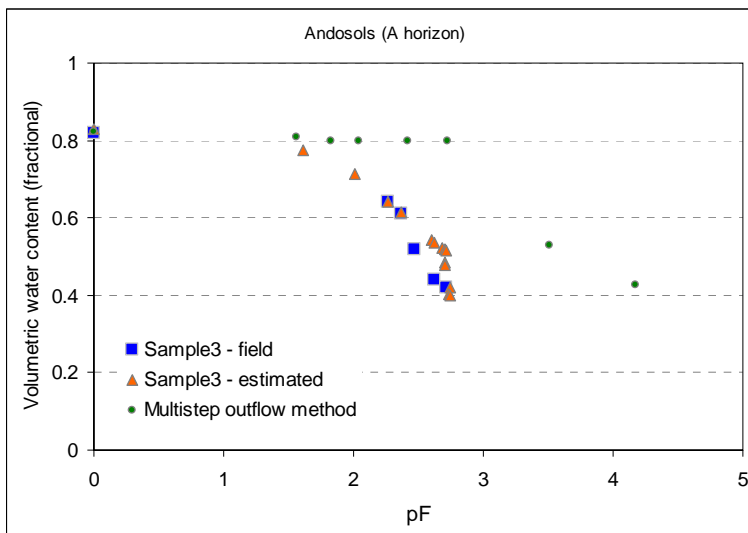


Figura 12: Curva de pF para Andosoles

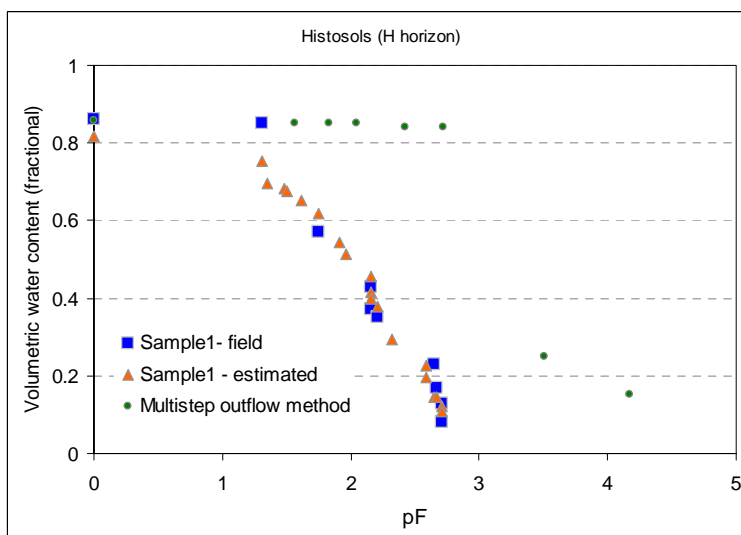


Figura 13: Curva de pF para Histosoles

La curva correspondiente al método de salida de flujo por etapas múltiples escasamente presenta variación a partir de la saturación hasta  $pF \approx 2.7$  para ambos tipos de suelo (Figuras 14 y 15). Se observa que existe una buena concordancia entre la curva determinada bajo condiciones de campo (muestras de suelo y tensiómetro) vs. la curva determinada a partir de la señal de TDR transformada a contenido volumétrico de agua mediante la curva de calibración obtenida en esta investigación.



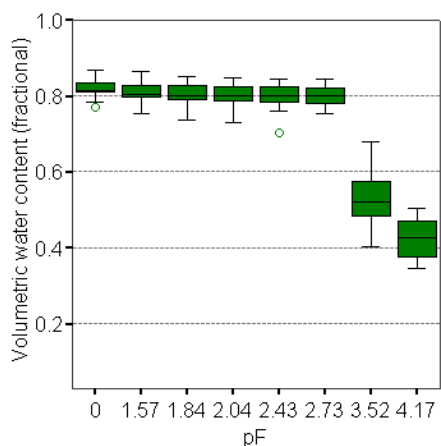


Figura 14: Curva de pF determinada en anillos de Kopecky de 100 cm<sup>3</sup> empleando el método de flujo de salida por etapas múltiples (valores promedio para Andosoles)

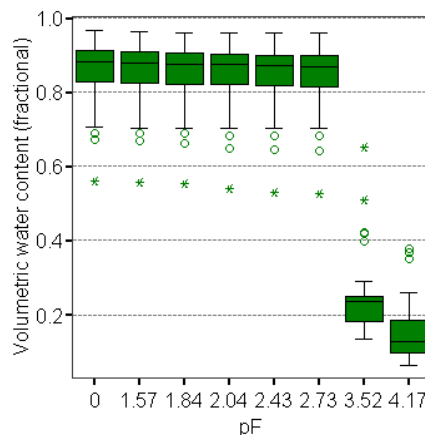


Figura 15: Curva de pF determinada en anillos de Kopecky de 100 cm<sup>3</sup> empleando el método de flujo de salida por etapas múltiples (valores promedio para Histosoles)

El método de flujo de salida por etapas múltiples parece sobreestimar sistemáticamente la retención de agua del suelo, lo cual de acuerdo con Vereecken et al. (1998) es principalmente debido a un estado incompleto de saturación inicial de las muestras de suelo y el contenido extremadamente alto de materia orgánica (Borja y Garrido, 2003; Buytaert, 2004).

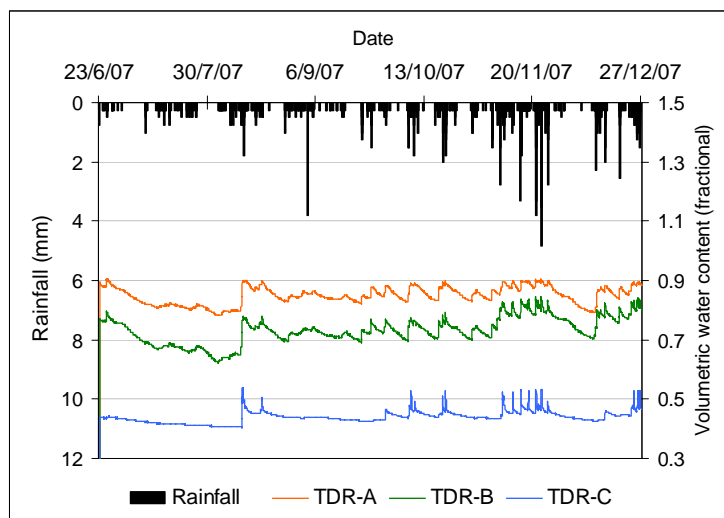


Figura 16: TR-A en posición horizontal (10 cm de profundidad); TDR-B: en posición vertical (10 – 30 cm) y TDR-C: en horizonte C (>70 cm)

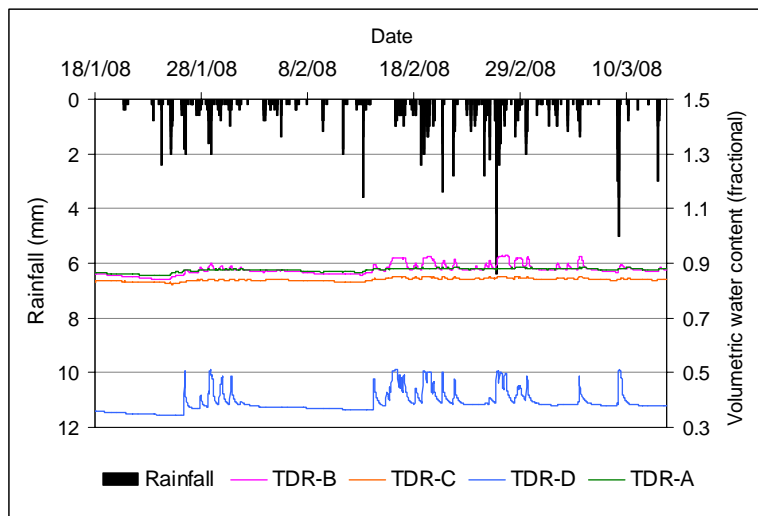


Figura 17: TDR-A (0 – 30 cm); TDR-B: (20 – 50 cm), TDR-C: (40 – 70 cm) y TDR-D: en horizonte C (>70 cm)

En cuanto al monitoreo de las variaciones de humedad del suelo in situ, los resultados en las Figuras 16 y 17 revelan que el contenido de humedad registrado por los TDR en el material parental y en el horizonte Andico es muy diferente. Ambas figuras también muestran que el contenido de agua del suelo en el horizonte subsuperficial C (1.31 % de materia orgánica) responde de manera más evidente a la lluvia que el horizonte Andico con alto contenido orgánico (33.21 % de materia orgánica). Pero este comportamiento sucede durante el período húmedo (Fig. 17) cuando la capa orgánica (0 – 70 cm) permanece casi en un estado de saturación, condición evidenciada por la señal casi constante del TDR. También es evidente que el contenido volumétrico de agua de la capa orgánica en los suelos de páramo (Andosoles) nunca es menor que 0.65 aún durante el período seco. Las características del perfil del suelo en donde se colocaron los sensores pueden verse en la Figura 2.

Parece ser que debido a las características del horizonte C (principalmente la textura de tipo: Franco - arcillo - arenosa), la humedad se transmite por la matriz del suelo de forma más rápida que si se la compara con el horizonte A. Sin embargo los valores de  $K_s$  (conductividad hidráulica saturada) para el horizonte C son casi similares a los del horizonte A (1.08 y 1.04  $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  respectivamente).

Esto se explicaría por el hecho de que en el horizonte C el agua no se estaría moviendo en condiciones de saturación (según el gráfico esta capa se mantiene en valores promedio de humedad de suelo de alrededor del 40 %), lo cual hace que la velocidad con la que se infiltra el agua en el suelo sea mayor. Según la curva de infiltración de agua en el suelo, los valores iniciales son mayores y se estabilizan cuando el suelo ha alcanzado un estado de saturación. Conforme la infiltración avanza, el suelo va aumentando su contenido de humedad causando que la tasa de infiltración disminuya con el tiempo hasta alcanzar un valor estable. La tasa de infiltración final es equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_s$ ) (Neitsch et al., 2001).

Además se puede apreciar que la precipitación que llega a la superficie del suelo transmite una especie de honda de humedad a través de los horizontes con características Andicas (los mismos que se mantienen casi sin variaciones significativas), pero que al llegar al horizonte C aumenta su contenido de humedad de forma muy notoria. Por las condiciones de sequedad de este horizonte, el incremento de humedad no se mantiene y baja casi de forma inmediata. También se observa (Figura 17) que frente a un evento de precipitación, la respuesta en el horizonte C sucede con algunas horas de desfase (en algunos casos hasta de más de 24 h) lógicamente dependiendo de las condiciones de humedad de esta capa de suelo.



### CONCLUSIONES

Mediante experimentos que permitan considerar las características de la matriz del suelo es posible obtener curvas de calibración adecuadas para relacionar las señales de TDR y sonda de capacitancia con el contenido de humedad. Además las señales producidas por estos sensores (principalmente los de TDR) parecen ser lo suficientemente claras como para usarse con seguridad para monitorear el contenido de agua del suelo y sus variaciones en el tiempo.

En condiciones de muy alta humedad (época de invierno, cuando el suelo está saturado), el principal proceso es el de escorrentía superficial por lo que los horizontes superiores casi se mantienen inactivos en cuanto a variaciones de contenido de humedad. Sin embargo en las capas más profundas y de tipo mineral se puede observar una respuesta casi inmediata a los eventos de precipitación, lo que evidencia que el horizonte C también es activo y contribuye en los procesos hidrológicos que se dan en los suelos de páramo.

Parece ser que algunos de los métodos tradicionalmente usados en la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo podrían estar dando mediciones incorrectas. Por esta razón es importante continuar realizando pruebas para validar estas metodologías en suelos de páramo.

Un reto para investigaciones futuras es la determinación in-situ, bajo condiciones naturales, de la curva de retención de agua de ambos suelos.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Internacional Foundation for Science (IFS) y a la compañía minera IAMGOLD ECUADOR S.A. por auspiciar el proyecto de investigación. La asistencia de Juan Sigüenza y José Tenecora durante las campañas de trabajo de campo ayudó significativamente al equipo de investigación. Finalmente los autores desean agradecer al Dr. Bert De Bièvre y al Dr. Wouter Buytaert por el apoyo brindado durante la etapa de formulación y aprobación del proyecto.

### BIBLIOGRAFIA

- Borja, P. and J. Garrido. 2003. Análisis de las características hidrofísicas de los Andosoles y la influencia del uso del suelo en su capacidad de retención de agua. PROMAS – Universidad de Cuenca. Tesis de grado.
- Buytaert, W. 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. PhD thesis.
- ISSS Working, Group R.B. 1998. World Reference Base for Soil Resources: Introduction. (Deckers, J.A., Nachtergaele, F.O. y Spaargaren, O.C.) First Edition. International Society of Soil Science (ISSS), International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Acco. Leuven, 157 pp.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, y J.R. Williams. 2001. Soil and Water assessment tool, user manual. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Texas.
- van Dam, J.C., J.N. Stricker, and P. Droogers. 1992. Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments. Soil Science Society of America Journal, 56: 1042-1050.



Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148: 389-403.