

RÉGIMEN DE INFILTRACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE SUELOS EN TIEMPOS DE ENCHARCAMIENTO Y POSTERIORES AL FENÓMENO LLUVIA

Ana Cristina LONDOÑO G.* y Alejandro CHICA S. **

RESUMEN

El agua lluvia al caer al suelo se distribuye en dos componentes: El agua infiltrada y el agua libre en escorrentía. El agua infiltrada modifica el contenido de humedad del suelo y puede llegar a modificar sus propiedades geomecánicas, inclusive en muchos casos, a desestabilizarlo. El agua libre en escorrentía genera un tipo importante de erosión laminar, lo mismo que potencializa reptaciones y movimientos en masa de poca profundidad; igualmente puede dar origen a desbordamientos e inundaciones.

El presente trabajo resume las experiencias logradas para conocer el régimen de infiltración en diversos suelos y con algunos tipos de lluvia, con variables la intensidad y la duración de estas.

Para generar lluvias se construyó un **simulador de lluvias** portátil de 40 cm de diámetro, 60 cm aprox. de altura, discos con lluvias reales copiadas y sistema cerrado del agua utilizada. Para conocer el régimen de infiltración en tiempos inicial (antes de lluvia), de encharcamiento (comienzo de la escorrentía) y varios posteriores al tiempo de lluvia, se diseñó un método geoelectrico denominado **C.E.T.V.** (calicata eléctrica, transversal vertical, según dispositivo Wenner: 4 electrodos a iguales distancias).

La lectura de la C.E.T.V. en varios niveles (profundidades) del suelo, permitió elaborar **curvas Z (profundidad) vs ρ^* (resistividad absoluta, con el apoyo de un multímetro y una fuente de 9V)** que, a su vez, permitieron identificar muchos fenómenos del régimen de infiltración tales como: profundidad a tiempo de encharcamiento, "efectos pantalla" por lavado y arrastre de material o por niveles inferiores impermeables, fisuramientos del suelo, desconfinamientos, "pulsos" del agua infiltrada, variación de la profundidad de infiltración con la variación de la pendiente y otros.

ABSTRACT

Rain Water is classified as either percolated water when it infiltrates into the ground or runoff water when it flows on the ground surface. Percolated water affects the soil water content and may even modify the soil geomechanic properties to the point of generating instabilities. Runoff water produces a very important laminar erosion. It may as well initiate surficial ground mass movements, river overflows and flooding.

* Ingeniera Geóloga, Facultad de Minas.

** Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, A.A. 1027, Medellín.

This paper summarizes the results of research work carried out to investigate the water percolation process in different soil types. For the work rain intensity and length were varies.

In order to simulate rains, a device 40 cm in diameter and 60 cm high, and disks were designed and constructed. This device was named rain simulator. The work included a close water circuit. A geoelectric method named C.E.T.V was designed to investigate the infiltration regime at initial time, (previous to rain), at the time to become swampy (time required for runoff to start) and at several periods of time after the rain had ended.

Several aspects of the percolation process such as the depth of the water front at the time to become swampy, crossff effect due to dragging of small particles or to impervious layers, soil cracking, influence of ground slope on depth of infiltration and other aspects were investigated because the C.E.T.V. method allowed readings at several depths, which make possible the preparation of curves depth Vs absolute resistivity.

INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de investigaciones relacionadas con método y modelos de mapas de zonificación geológico-geotécnica de laderas, adelantado en la Unidad de Geología Aplicada, Departamento de Recursos Minerales, Facultad de Minas, se han logrado avances importantes tanto para zonificaciones regionales como para micro-zonificaciones.

En términos generales una zonificación incluye la preparación de los siguientes mapas:

1. Mapa de pendientes del terreno.
2. Mapa geológico detallado o de "Unidades Geotécnicas" (Unidades litológicas cartografiables y diferenciables tanto por el tipo de roca como por sus propiedades geomecánicas e hidrológicas, en gran parte función del estado de la misma).
3. Mapa de suelos y usos del mismo.
4. Mapa de eventos observados (procesos morfodinámicos) y esperados (potenciales).
5. Mapa (cualitativo) de infiltración-escorrentía potenciales.
6. Análisis de contrastes laterales y verticales de propiedades de las Unidades Geotécnicas; acciones y reacciones.

El estudio conjunto y superpuesto de todos los mapas, junto con los análisis mencionados y el concepto de **U.G.I** (Unidad Geomecánica Independiente), permite, como se ha demostrado con muchos estudios aplicados, elaborar mapas de zonificación geológico-geotécnica, según el modelo seleccionado.

En particular, el mapa 5 (Infiltración-escorrentía) se convirtió en la línea a seguir dentro de la investigación, sobre la base de la respuesta punto a punto del terreno al fenómeno **lluvia**, analizable por ajuste a modelos geoestadísticos de malla regular o irregular como función de las Unidades Geotécnicas afloradas. La investigación fue aprobada por el Consejo de Facultad de la Facultad de Minas en 1990 e inicialmente financiada por el CINDEC de la Universidad Nacional, Sede Medellín.

El estudio, punto a punto de un terreno, del **régimen de infiltración y comportamiento** (respuesta) **del suelo** ante este fenómeno, implicó diseñar y considerar tres aspectos fundamentales, a saber:

- a. Construcción y normalización de un simulador de lluvias portátil, apto para reproducir cualquier intensidad de lluvia.
- b. Diseño y puesta a punto de un método de lectura por niveles del agua infiltrada y de la respuesta del terreno.
- c. Definición de los criterios de interpretación de los resultados del método de lectura utilizado.

La primera fase de esta investigación fue realizada a través del Trabajo Dirigido de Grado "**VARIACIÓN DEL RÉGIMEN DE INFILTRACIÓN EN UN SUELO EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA Y PENDIENTE DEL TERRENO**", realizado por **Ana Cristina Londoño García**, 1995. El presente artículo se basa esencialmente en dicho estudio, recoge las conclusiones más relevantes y las enmarca en un contexto teórico más general, lo cual permitirá orientar las investigaciones venideras.

CONSIDERACIONES INICIALES

En principio, el **régimen de infiltración** del agua generada por lluvia se puede dividir en tres partes, a saber:

1. Infiltración (q_e) hasta el momento de **encharcamiento superficial** (comienzo de la escorrentía), denominado **tiempo de encharcamiento** (t_e).
2. Infiltración durante el tiempo de lluvia.
3. Infiltración (q_i) después de finalizada la lluvia.

En esta fase de la investigación se estudió el régimen de infiltración y la respuesta del suelo a tiempos de encharcamiento (t_e) y posteriores al fenómeno lluvia (t_i ; $i = 1, 2, \dots, x, y$). La cantidad de agua llovida (q_t) durante el tiempo de ensayo

siempre fue calculada pero no separada en agua infiltrada (q_i) y de escorrentía ($q_E = q_t - q_i$) por falta del anillo que aisla el área de ensayo y permite recuperar el agua de escorrentía (q_E) y el producto de la erosión superficial. Lo anterior significa que la investigación se centró en el régimen de infiltración y en la respuesta del suelo o medio rocoso ensayado.

En general, en estas investigaciones se pueden presentar dos casos como función de las condiciones iniciales del área de ensayo:

Caso A: Suelo previamente saturado

Bajo esta condición inicial no se presenta fase de infiltración antes del encharcamiento puesto que $t_e = 0$ seg. Como tal, la escorrentía se presenta prácticamente en el mismo momento del comienzo de la lluvia.

El régimen de infiltración después de finalizada la lluvia (fase de descarga sub-superficial), es lento como seguramente lo fue durante la lluvia, pero no necesariamente el volumen de agua en descenso es nulo o constante en cada nivel de suelo considerado.

Caso B: Suelo inicialmente no saturado (húmedo o seco)

En este caso sí se presenta fase de encharcamiento en la que se puede determinar: t_e (tiempo de encharcamiento), q_e (cantidad de agua infiltrada, no calculada como ya se anotó), Z_e (profundidad de infiltración a t_e), relación Z_e vs a (pendiente del área ensayada) y, entre otras, la respuesta del suelo en lo relacionado con desconfinamiento o pérdida de masa por disolución o arrastre (lavado matricial).

Esta fase de encharcamiento es función de la duración de ésta y, el régimen de infiltración es investigable como función del tipo de suelo, de la intensidad de la lluvia y de factores propios del sitio de ensayo (pendiente, humedad inicial: q_i , aire en el suelo, raíces, fisuras, capacidad de retención superficial de agua de las partículas del suelo, capacidad de adsorción, permeabilidad, cabeza de succión y otros).

La fase de descarga dependerá, entre otras, de si los niveles de suelo afectados por la infiltración llegaron o no al punto de saturación durante el tiempo de lluvia y, de allí, los fenómenos presentados tanto como régimen de infiltración, investigable como anteriormente se planteó, como respuesta del medio rocoso afectado (suelo o roca).

Con el método que se explicará más adelante se pudieron investigar de manera clara y confiable los fenómenos asociados con la infiltración y la respuesta del medio, como se anotó, a tiempo de encharcamiento (t_e) y posteriores a la lluvia (t_x , t_y , etc.), en varios sitios de ensayo previamente seleccionados, lo que permitió, en primera instancia, validar el método para futuras investigaciones.

La investigación permite derivar criterios o formas de concluir aspectos aplicables en geotecnia (factores de inestabilidad, condiciones de suelos en estados saturados o no y, otros, tanto para terrenos planos como inclinados), en hidrogeología (aplicabilidad en medios tropicales de principios y formulaciones desarrollados en otros medios) y en otras disciplinas del conocimiento técnico-científico desarrolladas en otras ingenierías o ciencias puras y aplicadas. Se investigaron tres tipos de ensayos:

Ensayo tipo I:

Suelos heterogéneos conformados por depósitos por flujo de lodos de anfibolita totalmente meteorizada. Urbanización Mirador del Poblado, Vía Las Palmas.

Ensayo tipo II:

Suelos homogéneos en roca totalmente meteorizada proveniente de roca híbrida de contacto anfibolita-granito. Este tipo de ensayo permitió, dada la homogeneidad del suelo, observar el régimen de infiltración como función de la pendiente del terreno, al seleccionar tres áreas de ensayo con $\alpha = 5^\circ$, $12^\circ - 15^\circ$, 35° respectivamente. Finca la Felisa, San Félix.

Ensayo tipo III:

Suelo heterogéneo derivado de un depósito por flujo de lodos de anfibolita totalmente meteorizada. Se seleccionó una sola área de ensayo en donde se simuló un período invernal de cinco días, con intensidades de lluvia prácticamente crecientes.

Todas las lluvias simuladas fueron con caída vertical de gotas y duraciones de 15 y 20 minutos. La homogeneidad o heterogeneidad del suelo fue sustentado con análisis de laboratorio para muestras globales y por niveles de lectura de infiltración y respuesta del suelo. Los tres tipos de ensayo se llevaron a cabo bajo condiciones iniciales de suelo húmedo no saturado excepto los días 4° y 5° del período invernal simulado del ensayo tipo

III. En todos los casos el terreno fue preparado con descapote y corte vertical para la instalación del sistema de lectura utilizado y propuesto (Ver Fig. 1). El descapote se realizó con el ánimo de conocer el régimen de infiltración propia del suelo sin el efecto mediador de la cubierta vegetal (pastos y rastrojos en la mayoría de los sitios).

MÉTODO PUESTO EN PRACTICA

Como ya se hizo referencia, de manera muy resumida la investigación se apoyó en tres elementos fundamentalmente:

Simulador de lluvias portátil (ver fig. 1)

Este equipo diseñado y construido, a nivel de prototipo, en la Facultad de Minas, basa su principio de funcionamiento en lo siguiente:

a. Las lluvias reales se copian de manera directa sobre cartulinas, durante un tiempo adecuado (4 seg., 10 seg., etc.); inmediatamente después se trazan los contornos de las gotas para definir el área de esparcimiento de cada una de ellas. Lo anterior da la base para perforar el denominado **disco superior** de manera tal que los diámetros de los agujeros definan a una altura de 55 cm (distancia entre el disco superior y el suelo) gotas con iguales áreas de esparcimiento que las copiadas en la cartulina. Este disco superior, sirve, a su vez, de fondo del **recipiente portador del agua** para el ensayo. Para dichos ensayos, se debe mantener constante una columna de agua (~ 4 cm de altura) en el recipiente portador de ésta.

b. En el denominado **disco inferior**, se copia de manera aleatoria la lluvia configurada en el disco superior. En este caso solo es necesario conservar para cada agujero la distancia al centro del disco del correspondiente del disco superior. los agujeros de este disco inferior son de diámetros iguales con medida superior al diámetro de la gota de mayor área de esparcimiento configurada en el disco superior; llevan a su vez instaladas boquillas de 2 cm aproximadamente, las cuales sirven como receptores de los chorros generados al pasar el agua por el disco superior. Con la ayuda de anillos de acrílico y caucho, se define entre los discos superior e inferior una **cámara de fuga** del agua en exceso ensayo, la cual se recupera por los **desagües fijo y móvil** del simulador.

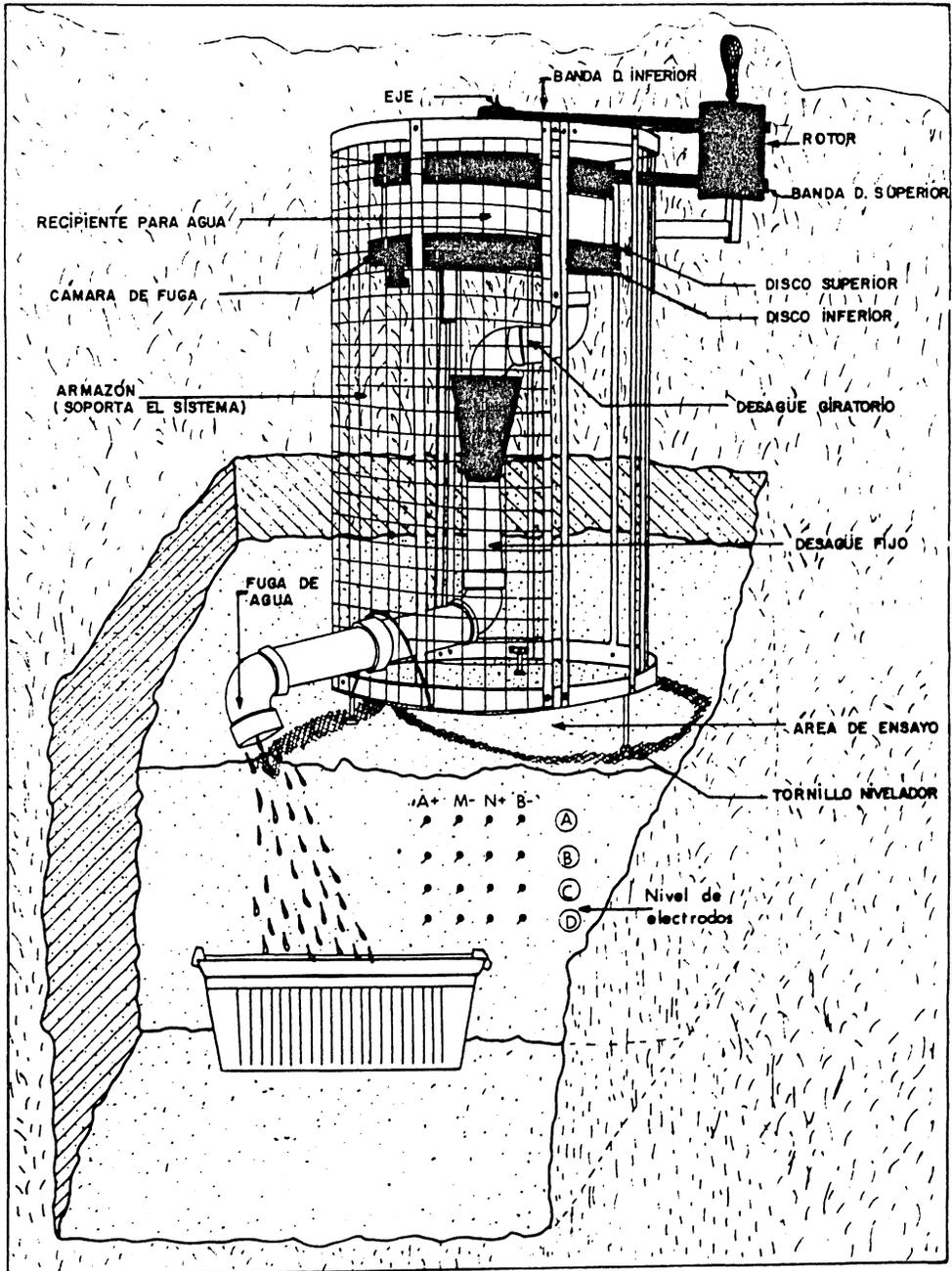


Fig. 1. Simulador de lluvias portátil en sitio de ensayo preparado y con niveles de electrodos instalados.

c. Un **rotor manual** transmite movimiento giratorio diferente a los discos superior e inferior del simulador. Lo anterior se logra con la ayuda de dos bandas de caucho: la banda que hace girar el disco superior rodea al rotor y al recipiente portador de agua y, la banda que hace girar el disco inferior rodea al rotor y a un pequeño anillo localizado en la parte alta del eje central del equipo, el que a su vez transmite el movimiento a dicho disco inferior por un sistema de balineras. La velocidad del disco superior debe ser tal que cada giro completo de éste se de a un tiempo igual al invertido en el copiado de la lluvia sobre una cartulina. La velocidad del disco inferior es mayor que la del superior lo que permite que los chorros generados en éste, sean cortados por las boquillas del disco inferior dando origen a gotas; el agua en exceso se recupera en la cámara de fuga y finalmente en el recipiente receptor al final del desagüe.

d. **Armazón y tornillos niveladores.** El equipo es fácilmente transportable y permite nivelarse en cualquier pendiente de terreno. El área de ensayo corresponde aproximadamente a un círculo de 40 cm de diámetro.

Método para lectura de agua infiltrada y respuesta del suelo o medio rocoso (ver fig. 1 y 2)

El método puesto en práctica y verificado con pruebas de campo y de laboratorio está basado en la Calicata Eléctrica (C.E.) según el dispositivo Wenner. Este dispositivo consta de cuatro electrodos: los dos exteriores, A+ y B-, sirven para inducir corriente eléctrica al terreno y, los dos interiores, M y N, para, con ayuda de un voltímetro o equipo equivalente, leer la diferencia de potencial obtenida y aplicada en el punto medio de la distancia MN. Las distancias AM, MN y NB son iguales y cuando son de orden métrico, las lecturas corresponden a resistividades aparentes del medio (r_a), tal que $r_a = f(a)$, siendo "a" la distancia entre electrodos ($a = AM = MN = NB$).

La C.E. es el resultado r_a vs X, cuando el punto medio del dispositivo (punto medio de MN) se desplaza a lo largo de un perfil del terreno, conservando la distancia "a" entre electrodos. Es de anotar que los electrodos A, M, N y B se desplazan a lo largo del perfil longitudinalmente.

En esta investigación, el punto medio del dispositivo se desplaza en un perfil vertical del terreno (Ver Fig. 1) y los electrodos se instalan en niveles perpendiculares al perfil vertical definido por la línea que une los puntos medios de lectura; de allí que en el estudio el método se denomine **calicata eléctrica transversal vertical (C.E.T.V.)**. Cada nivel

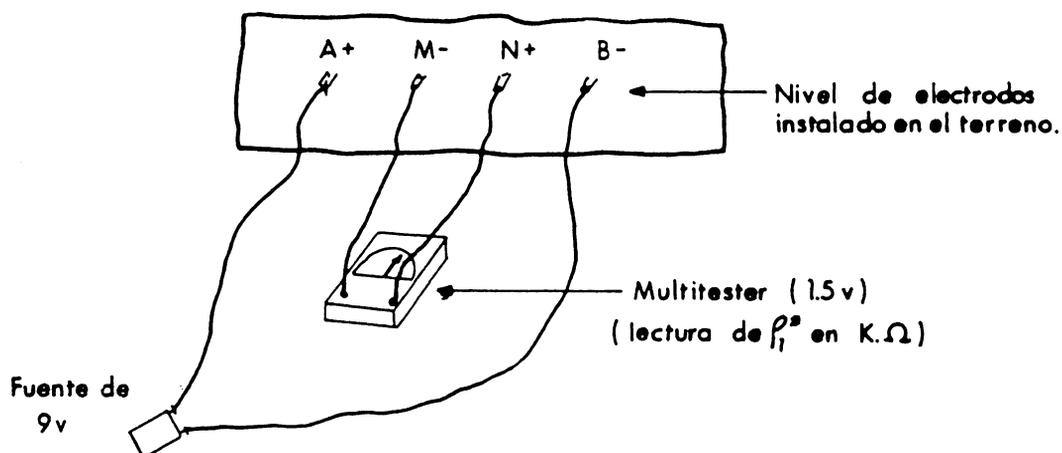


Fig. 2. Lectura de un nivel de electrodos de la C.E.T.V.

de electrodos corresponde a una profundidad en el terreno (Z en cm); se implementaron varios denominados con letras A, B, C, D, etc. Para cada ensayo, siempre con distancia "a" entre electrodos de orden centimétrico, lo que aproxima las lecturas a resistividades absolutas r_1^* (en KW) y no aparentes r_a . La lectura de todos los niveles permite entonces elaborar perfiles r_1^* vs Z .

Como lo muestra la fig. 2, por los electrodos de corriente, A+ y B- se induce corriente proveniente de una batería de 9V y por los electrodos de potencia, una carga adicional de 1,5V. En dichos electrodos de potencia, M- y N+, se instala un tester que permite leer r_1^* en KW.

En el terreno, desde el corte vertical preparado, los niveles de electrodos se implementaron con cable de cobre con los extremos descubiertos, de tal manera que los extremos interiores llegaran al plano vertical central del área de ensayo. Exteriormente los electrodos se instalan rigurosamente con una distancia "a" entre ellos pero en profundidad, esta distancia inter-electródica lo más seguro es que no se conserve, lo que obligó a hacer perfiles r_1^* vs Z antes de cada ensayo para definir la curva de "ceros" del medio y, con base en ella, hacer las interpretaciones.

Criterios de interpretación

Para tal efecto, cada ensayo tuvo el siguiente orden operativo:

- a. Descapote y preparación del corte vertical.
- b. Instalación de los niveles de electrodos A, B, C, D, etc.
- c. Lecturas para curva i de $r_1^*(KW)$ vs Z (cm): **curva de ceros.**
- d. Preparación del simulador de lluvias portátil con la lluvia seleccionada. Instalación en el área de ensayo.
- e. Generación de lluvia simulada hasta tiempo de encharcamiento (te). Con ayuda de un cronómetro se hacen las lecturas de tiempo y con recipientes medidos, los gastos de agua.
- f. Lecturas para **curva e** (encharcamiento).
- g. Reiniciación de la lluvia simulada durante el tiempo definido (15, 20 minutos, etc.).
- h. Lecturas para:

CURVA 1	X min. después de lluvia.
CURVA 2	Y min. después de lluvia.
CURVA 3	(etc.)

En los ensayos, se hicieron lecturas en tiempos iguales a 1, 5, 8, 15, 20 y 30 minutos.

- i. Elaboración de las siguientes curvas complementarias.
 - CURVA e - CURVA i (resta de lecturas)
 - CURVA 1 - CURVA e
 - CURVA 2 - CURVA 1 , ETC.
 - CURVA FINAL - CURVA i de cada ensayo
 - CURVA FINAL - CURVA i de todo un período invernal simulado.

La interpretación de resultados se explicará en los capítulos siguientes, los que constituyen la investigación adelantada propiamente dicha.

PRIMERAS CONCLUSIONES (FUNDAMENTOS DE INTERPRETACIÓN)

Pruebas sencillas a nivel de laboratorio, permitieron reconfirmar lo que sería el principio fundamental de interpretación: **A medida que aumenta el contenido de agua, la resistividad absoluta r_1^* disminuye; en la medida en que el suelo se desconfina o pierde masa, la resistividad absoluta r_1^* aumenta.**

En los gráficos elaborados, r_1^* aumenta de derecha a izquierda y Z aumenta de arriba hacia abajo. El principio anterior, conocido de tiempo atrás, aplicado al método de lectura implementado y a las diferentes curvas elaboradas, permiten extraer las siguientes

primeras conclusiones que, a su vez, son los fundamentos de interpretación de esta investigación:

Caso 1 (Ver Fig. 3)

La relación entre la **curva** i y la **curva** e permite observar no sólo la ganancia de agua por el medio debido a la fase de encharcamiento de una lluvia, sino también la profundidad de infiltración a tiempo de encharcamiento (t_e), identificada por el punto a partir del cual las dos curvas coinciden. De alguna manera el área sombreada es proporcional al volumen de agua infiltrado en el medio en el período de tiempo referido.

Caso 2 (Ver Fig. 3)

Cuando una **curva** X de tiempo t_x , se localiza a la derecha de una **CURVA** Y de tiempo t_y , menor que t_x , indica que en el intervalo de tiempo entre t_y y t_x , se presentó una disminución en la resistividad absoluta r_1^* , lo que significa un aumento en el contenido de agua en el suelo o medio rocoso, en los niveles de electrodos donde se observa el fenómeno.

Caso 3 (Ver Fig. 3)

Bajo el supuesto de un suelo o medio rocoso inmodificado por el agua infiltrada, cuando una **curva** X de tiempo t_x , se localiza a la izquierda de una **curva** Y de tiempo t_y , menor que t_x , ello significa un aumento en la resistividad absoluta r_1^* , correspondiente a una disminución de la cantidad de agua en los niveles de electrodos donde se observa el fenómeno. Es normal y posible observar que la pérdida de agua en unos niveles del suelo se refleje, a partir del punto de cruce de curvas, en una ganancia de agua en niveles más profundos; en la figura 3, las **curvas** 1 de tiempo t_1 y 2 de tiempo t_2 , mayor que t_1 , muestran dicho fenómeno de pérdida de agua en los niveles A, B y C y, ganancia de agua en los niveles D y E.

Caso 4 (Ver Fig. 3)

Cuando una curva X de tiempo t_x , se localiza a la izquierda de la **curva** i (**Curva de ceros**), indica un aumento de la resistividad absoluta r_1^* por encima de la definida como inicial o "**cero**" de ese nivel de electrodos, se considera anormal pues se espera disminución de la resistividad por aumento en el contenido de agua. Normalmente esto se debe a desconfinamiento o pérdida de

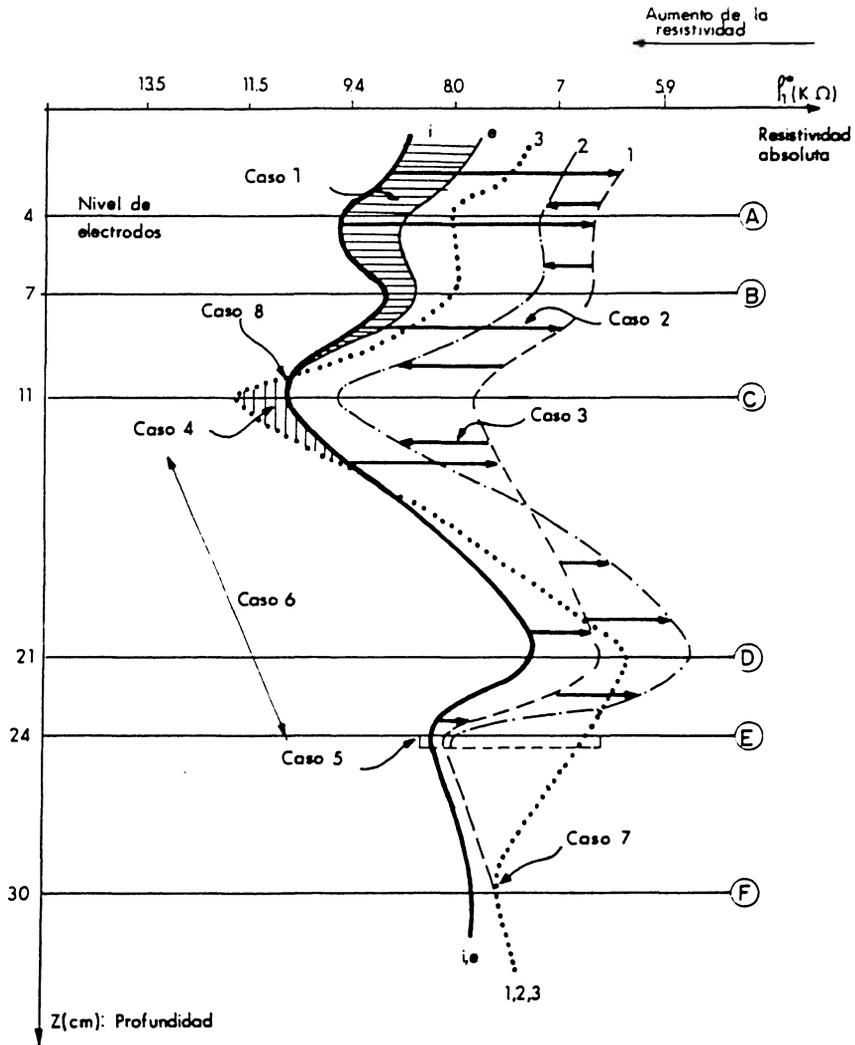


Fig. 3. Casos investigados en la infiltración de agua lluvia y respuesta del suelo, según el método de lectura utilizado (C.E.T.V.).

masa del medio rocoso en el volumen de influencia del nivel de electrodos donde se observa el fenómeno. Una interpretación, aunque eventual, que se debe tener en cuenta es la posibilidad de que al momento de la lectura para la **curva** *i*, en dicho nivel de electrodos (entiéndase volumen de influencia de un nivel de electrodos), había agua retenida temporalmente y, al aumentar la columna de agua como consecuencia del agua infiltrada de la lluvia simulada, se presentó una descarga súbita dejando en el sitio una cantidad de agua menor que la inicial. Muchas veces el

estudio riguroso de todas las curvas de un ensayo, permite diferenciar las descargas súbitas de los desconfinamientos o pérdidas de masa.

A veces es posible diferenciar los desconfinamientos de las pérdidas de masa; esto cuando la masa desplazada se identifica como acumulada en otro nivel de electrodos cuando en éste sin presentarse aumento de agua, se lee una disminución de la resistividad absoluta r_1^* .

Caso 5 (Ver Fig. 3)

Cuando un nivel de electrodos se observa como un sitio donde se dificulta la circulación del agua infiltrada, reflejado esto como una muy baja variación de la resistividad absoluta en dicho nivel de electrodos y un aumento gradual del contenido de agua en niveles superiores (en la figura 3, el nivel de electrodos E muestra muy poca variación de r_1^* , mientras que el nivel D muestra, según las **curvas** 1 y 2, un aumento del contenido de agua).

El fenómeno anterior puede deberse a dos causas principalmente: la primera, a que el nivel de electrodos que dificulta la circulación del agua infiltrada (en el ejemplo, el nivel E) llegó a punto de saturación y ello se reflejará en que el fenómeno se mantiene invariable para tiempo de lecturas posteriores; la segunda, a un "efecto pantalla temporal" producto de algunos factores (succión, aire, fuerzas iónicas entre agua retenida temporal y no temporal o de adsorción más retención superficial, entre otros factores) el cual desaparece al aumentar la columna de agua sobre dicho nivel de electrodos, detectable a veces con lecturas posteriores (en el ejemplo, la **curva** 3 muestra en relación con la **curva** 2, en el nivel D una disminución del contenido de agua y, en el nivel E -nivel pantalla- un aumento súbito del contenido de agua, lo que podría significar la eliminación del "efecto pantalla" en dicho nivel E de electrodos). En todos los casos, como es normal, antes de concluir algún fenómeno, se debe tener el máximo de certeza de éste.

Caso 6 (Ver Fig. 3)

Si a partir de un tiempo dado para lecturas, se presentan los casos 4 y 5 simultáneamente, podría interpretarse, si ello se concluye en el ensayo, la pérdida de masa en un nivel de electrodos (en el ejemplo, el nivel C) y la acumulación temporal o definitiva de ésta en un nivel más profundo (en el ejemplo, en el nivel E la acumulación de masa parece haber sido temporal para

las curvas 1 y 2, fenómeno que desapareció para el tiempo de lectura de la **curva 3**).

Caso 7 (Ver Fig. 3)

Cuando, después de un determinado tiempo, todas las curvas de tiempos posteriores, muestran en un nivel de electrodos la misma resistividad absoluta r_1^* ,. Esto puede deberse al agotamiento del agua de circulación o a que en dicho nivel de electrodos, se llegó a punto de saturación. El punto de saturación se muestra como un "efecto pantalla" no temporal o transitorio sino permanente, reflejado en la dificultad de circulación del agua infiltrada, la cual se va acumulando en los niveles superiores del suelo, lo que puede ocasionar fugas laterales de agua, desconfinamientos, reptaciones y, en casos extremos movimientos rápidos de masa. En estos casos se hace muy importante el tiempo de duración de la lluvia y, lógicamente, la profundidad del nivel donde se presenta el punto de saturación, para hacer cálculos de estabilidad de terrenos, entre otros.

Caso 8 (Ver Fig. 3)

Es uno de los fenómenos mencionados en el caso 7. El punto a partir del cual dos curvas se hacen coincidentes puede indicar agotamiento del agua infiltrada de circulación. El agua infiltrada se descompone gradualmente en agua adsorbida, agua retenida superficialmente, agua retenida temporalmente, agua perdida por fuga lateral y, el resto, en agua de circulación la cual se agota en determinado tiempo, a menos que defina un frente húmedo en avance o se incorpore al agua freática.

Caso 9 (Ver Fig. 4)

Al parecer, de acuerdo con el ensayo tipo II realizado en la finca La Felisa, Corregimiento San Félix - Antioquia, en roca híbrida de contacto anfibolita-granito totalmente meteorizada pero homogénea según pruebas de laboratorio, el punto de agotamiento del agua infiltrada de circulación, es menos profundo en la medida en que la pendiente del terreno aumenta. Lo anterior posiblemente se debe a que las líneas de flujo sub-superficial buscan el paralelismo con el terreno en niveles cada vez menos profundos en la medida en que la pendiente de éste aumente. en la figura la CURVA Y es de tiempo t_y menor que el tiempo t_x de la CURVA X.

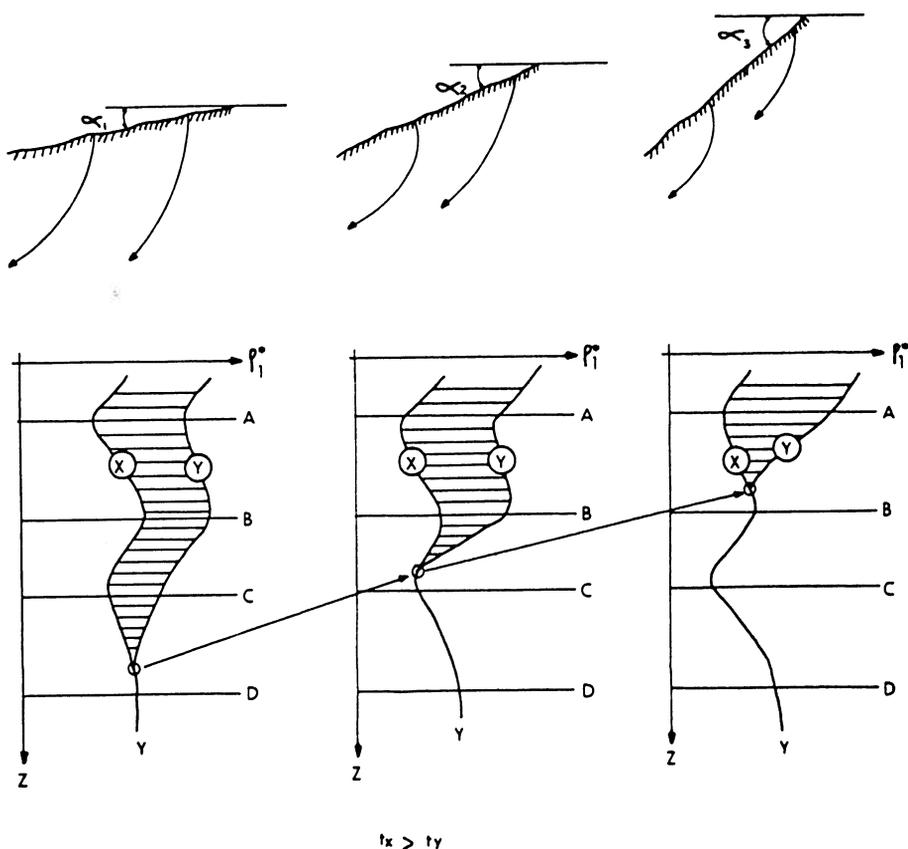


Fig. 4. CASO 9: Fenómeno de la relación entre CURVAS de lectura de la C.E.T.V. y la pendiente del terreno.

Caso 10 (Ver Fig. 5)

El análisis comparativo de las curvas:

curva e - curva i (diferencia de lecturas), **curva 1 - curva e**, **curva 2 - curva 1**, etcétera, deja ver que el agua lluvia infiltrada avanza en profundidad en forma de **pulsos**. Dichos pulsos pueden corresponder, en la investigación adelantada, a los siguientes factores:

Pulso 1: El agua infiltrada hasta tiempo de encharcamiento pues, en los ensayos a tiempo t_e , se suspende la lluvia simulada para hacer las lecturas para la **curva e**.

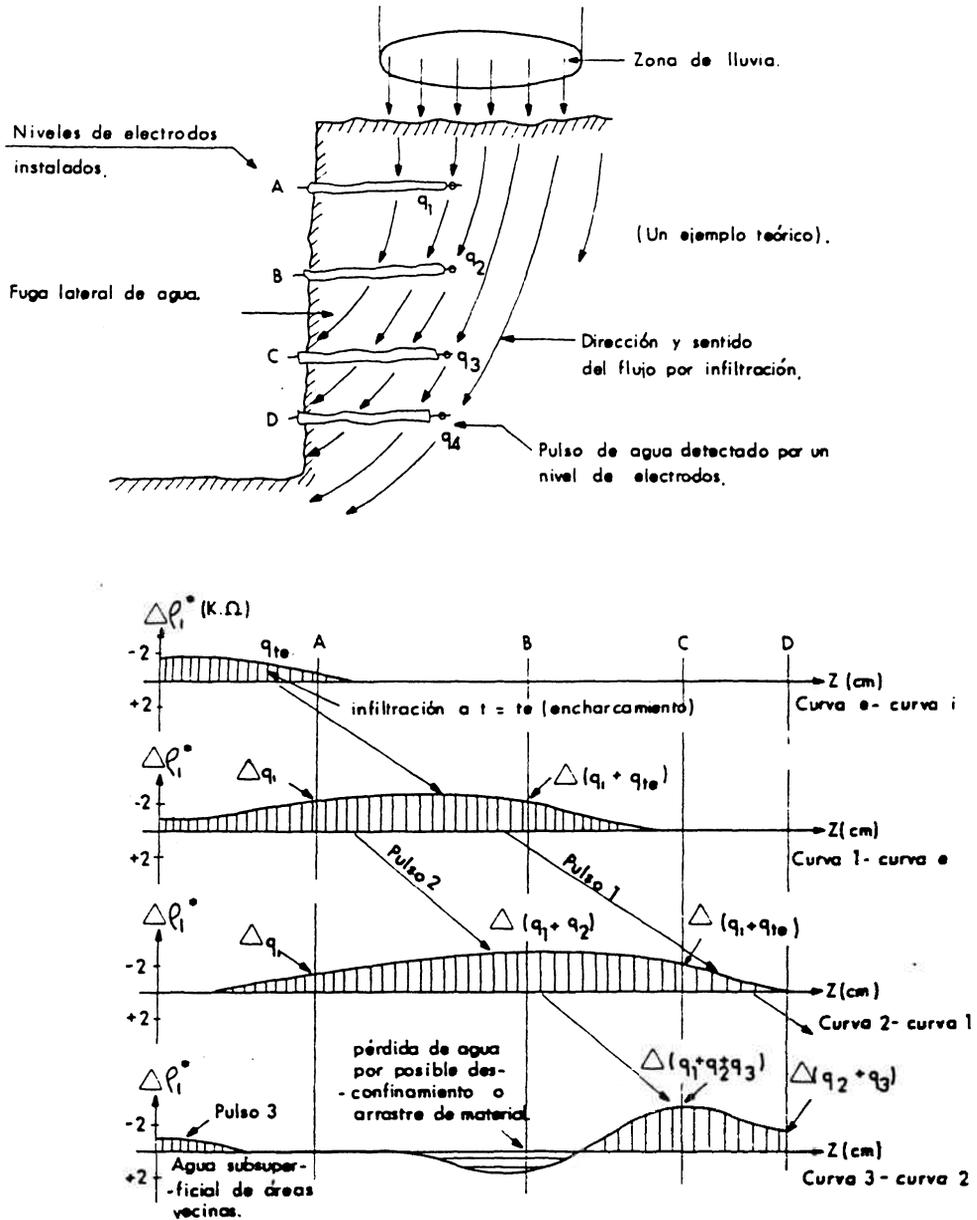


Fig. 5. CASO 10: Fenómeno de pulsos de agua infiltrada observado con diferencia entre curvas de lecturas de la C.E.T.V.

Pulso 2: El agua infiltrada durante la lluvia simulada desde el momento de encharcamiento hasta la suspensión de ésta.

Pulso 3: Agua subsuperficial de parte del área ensayada, alejada del plano vertical central definido por los extremos interiores de los electrodos instalados.

El pulso 2 puede dividirse en varios pulsos tanto por el fenómeno del pulso 3 como por los "efectos pantalla" temporales y los desconfinamientos o pérdidas de masa. En parte el fenómeno de "pulsos" se observa, y esto se determinará con certeza en investigaciones futuras, a que las lecturas son **discretas** y no **continuas**, desde el punto de vista estadístico. En las curvas-diferencia, las escalas positiva y negativa de r_1^* se invierten de lo usual para mostrar por encima del cero cuando hay aumento o ganancia de agua en el suelo (Dr_1^* negativos) y, por debajo, la disminución o pérdida de agua (Dr_1^* positivos).

La curva-diferencia **curva final - curva i**, ya sea de un ensayo o de un período invernal simulado, es muy importante pues deja ver el incremento del agua retenida, si aún hay agua en circulación, si se presentaron o no desconfinamientos y/o pérdidas de masa, entre otros aspectos.

El gráfico de **curvas i** de un período invernal deja ver: El incremento de agua retenida no temporalmente (agua adsorbida más agua retenida superficialmente). El tiempo de encharcamiento en un período invernal en el que las **curvas i** se localicen siempre de derecha a izquierda en la medida en que correspondan al mismo orden de los eventos "lluvia" sucedidos, se va haciendo menor lo que, a su vez, significa la aparición cada vez más rápido de la escorrentía. En los medios tropicales (posiblemente también en otros) la situación anterior no siempre se presenta pues ello depende del orden dado a las intensidades de las lluvias, al tiempo y clima entre lluvias y a las variaciones del suelo debido a desconfinamientos y/o pérdidas de masa, entre otros factores.

Finalmente, la separación entre dos curvas cualesquiera (**curva 1 y curva 2** por ejemplo) es el resultado de la suma vectorial de factores que hacen disminuir a r_1^* (aumento de agua y/o masa) y de factores que hacen aumentar a r_1^* (desconfinamientos, disminución de agua, pérdida de masa, otros).

CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Por considerarse que los gráficos correspondientes a los fundamentos de interpretación (primeras conclusiones) ilustran bien los fenómenos investigados, no se incluyen en este artículo los gráficos de los ensayos realizados. Para ello se remite al

lector al Trabajo Dirigido de Grado "**Variación Del Régimen De Infiltración En Un Suelo En Función De La Intensidad De Lluvia Y Pendiente Del Terreno**" Londoño Garcia, Ana Cristina, 1995, consignado en la biblioteca de la Facultad de Minas.

Las conclusiones de los ensayos fueron las siguientes:

1. En terrenos de la Urbanización "Mirador del Poblado" en la vía Las Palmas, que comunica a Medellín con Rionegro, se hicieron **ensayos tipo I** en depósitos de flujo de lodos de anfíbolita totalmente meteorizada. Allí, los ensayos de laboratorio permitieron concluir la heterogeneidad granulométrica del sitio punto a punto. Los ensayos con el simulador de lluvias portátil se llevaron a cabo de la siguiente manera:

- Las lecturas para **curvas i** se hicieron en áreas muy cercanas (15 a 20 cm de distancia) a aquellas donde se simularon las lluvias pero sin ser afectadas o influenciadas por éstas.

- Las lecturas para **curvas e**, 1, 2, etc. se hicieron en cortes verticales de terreno en las zonas centrales de las áreas que recibieron las lluvias simuladas.

No se observó ninguna correlación o resultado lógico al comparar las **curvas i** con las **curvas e**, 1, 2, etc. lo que dejó ver un fenómeno de heterogeneidad granulométrica o composicional del terreno, conclusión compatible con las pruebas de laboratorio. lo anterior se hace muy importante en el momento de caracterizar geomecánica e hidrológicamente los lotes urbanísticos, pues dicha heterogeneidad implica un muestreo en malla que garantice geoestadísticamente los valores de los parámetros buscados, tales como cohesión, ángulo de fricción interna, densidad, contenido de humedad, coeficiente de permeabilidad, etc.

2. En terrenos de la finca La Felisa, Corregimiento San Félix, correspondientes a roca híbrida de contacto entre anfíbolita y granito, totalmente meteorizada pero homogénea, se hicieron los **ensayos tipo II**. Utilizando la misma intensidad de lluvia y la misma duración de ésta, en tres áreas de ensayo con inclinaciones de 5°, 12° a 15° y 35° a 37° respectivamente, se observó que el punto de agotamiento aparente (o real?) del agua infiltrada se presentó menos profundo en la medida en que la pendiente del terreno era mayor. lo anterior puede significar que las líneas de flujo buscan el paralelismo con el terreno a profundidad menor en la medida en que la pendiente del terreno aumenta.

Adicionalmente, se observaron niveles del terreno que sufrían desconfinamiento por acción del agua infiltrada, lo mismo que algunas fugas laterales del agua infiltrada de circulación.

3. En predios de la finca La Fabiana, propiedad de la Facultad de Minas y contigua a ésta, sobre área preparada (descapote, corte vertical e instalación de electrodos) y conformada por material de depósito por flujo de lodos de anfibolita totalmente meteorizada, se efectuó el **ensayo tipo III**, el cual consistió en un período invernal simulado de 5 días, así:

DÍA 1 ... Lluvia N° 1 ...	10 min...	El área se plastificó después del ensayo
DÍA 2 ... Lluvia N° 1 ...	15 min...	El área se plastificó después del ensayo
DÍA 3 ... Lluvia N° 2 ...	15 min...	El área se plastificó después del ensayo
DÍA 4 ... Lluvia N° 1 ...	15 min...	El área recibió después lluvia real
DÍA 5 ... Lluvia N° 2 ...	20 min	

Las intensidades de las lluvias fueron altas, tal que la lluvia N°1 se calculó en 120 mm/h y la lluvia N°2 en 140 mm/h, aunque no se tuvieron en cuenta fuentes de error en los cálculos por no considerarse el factor determinante para esta fase de la investigación.

Los tiempos de encharcamiento (t_e) y las profundidades de infiltración [$F(t_e)$] leídas a tiempo t_e , dieron así:

DÍA	t_e	$F(t_e) = Z_e$
1	146 seg.	7 cm
2	63 seg.	entre 4 y 7 cm
3	58 seg.	entre 4 y 7 cm
4	5 seg.	menor de 4 cm
5	0 seg.	0 cm

Los resultados anteriores tienen la tendencia esperada según la Ecuación de Horton pero no se ajustan rigurosamente a ella y ello se considera normal en nuestros medios tropicales. Se observa que el contenido de humedad del suelo aumenta en la medida en que avanza el período invernal, lo que refleja en una disminución gradual de la capacidad real de infiltración, situación que, a su vez, produce la aparición cada vez más rápida de la escorrentía.

También se observaron dos niveles de riesgo: el nivel C ($Z = 11$ cm) por desconfinamiento y el nivel F ($Z = 25$ cm) por recarga de agua infiltrada, sobrepresión y empuje hidrodinámico. Al parecer el nivel F coincidió con un punto de saturación que generó un "efecto pantalla" no transitorio. Estos datos son muy

importantes en el momento de adelantar cálculos de factores de seguridad de cortes del terreno para vías u otros proyectos.

En próximas fases de la investigación se harán estudios comparativos en áreas de ensayo homogéneas, así:

a. Con descapote y corte vertical para instalación de electrodos.

b. Con descapote e instalación de electrodos desde superficie y sin corte vertical.

c. Sin descapote e instalación de electrodos desde superficie y sin corte vertical.

Todo lo anterior bajo las modalidades de lecturas para lluvias simuladas y reales.

Se deja entonces esta línea de investigación para su análisis, crítica y aporte.

BIBLIOGRAFÍA

LINDSLEY, KOHLER, PAULUS, 1986, Hidrología Para Ingenieros. Editorial Mc. Graw-Hill, México, pag. 211 a 213.

LONDOÑO GARCIA, A. C., 1995,. Variación del Régimen de Infiltración de un Suelo en Función de la Intensidad de Lluvia y Pendiente del Terreno. Trabajo Dirigido de Grado. Facultad de Minas. Medellín.

PARASNIS, S.D. , 1970, Principios de Geofísica Aplicada. Editorial Paraninfo, Madrid, pag. 82 a 87.

TE CHOW, V., MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W., 1994, Hidrología Aplicada. Edición Española. Editorial Mc. Graw-Hill, Bogotá, Traducción Juan G. Saldarriaga. Ingeniero Civil. Universidad de los Andes. Colombia, pag 20 a 34 y 101 a 122.