



**Por un Desarrollo
Agrario Integral
y Sostenible**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN DIFERENTES
SUELOS DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE LOS
REMATES, BOACO 2009.**

AUTORES:

**Br. Rosa Azucena Enríquez Juárez
Br. Osmar Alexander Orozco Gómez**

ASESORES:

**Ing. MSc. Gerardo Murillo Malespín
Ing. Víctor Manuel Calderón Picado**

**MANAGUA, NICARAGUA
Septiembre, 2011**



"Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible"

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN DIFERENTES SUELOS DEL MUNICIPIO DE
SAN JOSÉ DE LOS REMATES, BOACO 2009**

AUTORES:

**Br. Rosa Azucena Enríquez Juárez
Br. Osmar Alexander Orozco Gómez**

ASESORES:

**Ing. MSc. Gerardo Murillo Malespín
Ing. Víctor Manuel Calderón Picado**

**MANAGUA, NICARAGUA
Septiembre, 2011**

INDICE DE CONTENIDO

| SECCIÓN | PÁGINA |
|---|---------------|
| DEDICATORIA | <i>i</i> |
| AGRADECIMIENTOS | <i>ii</i> |
| ÍNDICE DE CUADROS | <i>iii</i> |
| ÍNDICE DE FIGURAS | <i>iv</i> |
| ÍNDICE DE ANEXOS | <i>v</i> |
| RESUMEN | <i>vi</i> |
| ABSTRACT | <i>vii</i> |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 2 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 3 |
| 3.1 Localización y descripción del sitio | 3 |
| 3.2 Equipo | 3 |
| 3.2.1 Infiltrómetro de minidisco | 3 |
| 3.2.2 Infiltrómetro de doble cilindro | 4 |
| 3.3 Recolección de datos | 5 |
| 3.4 Pruebas de infiltración de campo | 5 |
| 3.5 Análisis de datos | 6 |
| 3.5.1 infiltrómetro de minidisco | 6 |
| 3.5.1 infiltrómetro de doble cilindro | 8 |

| | |
|--|----|
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 10 |
| 4.1 Conductividad hidráulica no saturada por el método de minidiscos | 10 |
| 4.1.1 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 7 bajo cobertura de grama en la finca La Primavera, 2010. | 11 |
| 4.1.2 Conductivida hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 8 bajo cobertura de grama en la finca La Primavera, 2010. | 11 |
| 4.1.3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 9 bajo cobertura de grama en la finca La Primavera, 2010. | 12 |
| 4.1.4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 10 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 12 |
| 4.1.5 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 11 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 13 |
| 4.1.6 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 12 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 13 |
| 4.1.7 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 22 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010. | 14 |
| 4.1.8 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 23 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010. | 14 |
| 4.2 Conductividad hidráulica saturada por el método del doble cilindro | 15 |
| V. CONCLUSIONES | 17 |
| VII. LITERATURA CITADA | 18 |
| VIII. ANEXOS | 19 |

Dedicatoria

A Dios quien me da la fuerza para seguir adelante y por su inmenso amor.

A mis padres, a mis hermanos por estar siempre a mi lado.

A mis amigos y amigas de quienes he recibido su apoyo incondicional.

Br. Rosa Azucena Enríquez Juárez

Dedicatoria

A Dios principalmente, por regalarme el don de la vida, y por las maravillosas cosas que hace con su gran amor y poder.

A mis padres, esposa y hermanos por sus grandes esfuerzos y sacrificios que han hecho por ayudarme a llegar hasta donde estoy.

A mis amigos, que me han apoyado en todo momento.

A mis maestros, que me han dado su apoyo incondicional y que sin duda alguna han sembrado ambiciones superiores, éticas y progresistas el cual me han hecho valorar la importancia, la capacidad y el amor que nace por mi carrera.

Br. Osmar Alexander Orozco

Agradecimiento

Primeramente a Dios creador del universo y de todo lo que en el existe.

A mis padres Rosa Emalina Juárez y Severo Henríquez Herrera

A mis hermanos Dinora, Hilder, Damaris, Argelio, Danelia y Kevin

A la dirección de servicios estudiantiles que abrió sus puertas para hacerme crecer profesionalmente y personalmente juntas con ellas: Idalia Casco, Lucia, Erika y doña Eudomilia a ellas gracias

A los profesores del departamento de ingeniería agrícola por su disponibilidad a mis inquietudes y por apoyarme durante mi estadía en la universidad y La Ing. .Adriana Sánchez por su ayuda.

Al Ingeniero Roberto Larios por sus enseñanzas y amistad.

A mi amiga Alba mi ángel de la guarda, te quiero mucho

Br. Rosa Azucena Enríquez Juárez

Agradecimiento

Agradezco al divino creador por regalarme la vida. Así como, a mis padres, esposa y hermanos quienes con su amor, cuidados y protección han hecho de mí, un hombre de bien, también, a nuestra Universidad Nacional Agraria por brindarnos las mejores condiciones y especialidades en las diversas carreras, al igual que sus maestros destacados por su anhelo y en especial al profesor Gerardo Murillo, quien tuvo paciencia en ayudarme a ver y corregir mis errores.

Especialmente agradezco a, Don Lucio y a Mariana, quienes me brindaron su amistad y me abrieron las puertas de su hogar durante mi estadía en la etapa de campo. Así como, también a mi amiga y compañera de tesis Azucena Enríquez, con quien juntos luchamos por lograr nuestras metas.

Br. Osmar Alexander Orozco

ÍNDICE DE CUADROS

| CUADRO | | PÁGINA |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Conductividad hidráulica no saturada por el método de minidiscos | 10 |
| 2 | Conductividad hidráulica saturada por el método del doble cilindro. Fuente: Rosa Enríquez y Osmar Orozco, 2010 | 15 |

INDICE DE FIGURA

| FIGURA | | PÁGINA |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Diagrama Infiltrómetro Minidiscos | 3 |
| 2 | Infiltrómetro doble cilindro | 4 |
| 3 | T3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 7 bajo condición de grama en la finca La Primavera, 2010. | 11 |
| 4 | T3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 8 bajo condición de grama en la finca La Primavera, 2010. | 11 |
| 5 | T3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 9 bajo condición de grama en la finca La Primavera, 2010. | 12 |
| 6 | T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 10 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 12 |
| 7 | T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 11 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 13 |
| 8 | T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 7 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010. | 13 |
| 9 | T8 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 22 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010. | 14 |
| 10 | T8 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang, en el perfil 23 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010. | 14 |

INDICE DE ANEXOS

| ANEXO | | PÁGINA |
|--------------|---|---------------|
| 1 | Descripción del perfil 7 grama 2010. | 20 |
| 2 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 7. | 21 |
| 4 | T4 Descripción del perfil 8 parte media grama 2010. | 21 |
| 5 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 8. | 23 |
| 6 | T4 Descripción del perfil 9 grama parte baja | 23 |
| 7 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 9. | 24 |
| 8 | T4 Descripción del perfil 10 Parte Alta bosque. | 25 |
| 9 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 10. | 26 |
| 10 | T4 Descripción del perfil 11 parte media bosque. | 27 |
| 11 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 11 parte media. | 28 |
| 12 | T4 Descripción del perfil 12 parte baja bosque. | 28 |
| 13 | Cuadro de datos de laboratorio perfil 12. | 29 |
| 14 | Conductividad hidráulica no saturada por el método de minidiscos. | 30 |
| 15 | Conductividad hidráulica en suelos no saturados. | 33 |
| 16 | Clases de conductividad saturada. Soil Survey Manual (1993). | 34 |
| 17 | Formato de campo para la recopilación de datos. | 35 |
| 19 | Mapa a mano alzada de la zona de estudio. | 36 |

Resumen

La conductividad hidráulica es un factor importante que determina el movimiento del agua en el suelo, estrechando una íntima relación con el escurrimiento superficial. Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de la metodología del infiltrómetro de tensión de minidiscos, comparado con el infiltrómetro de doble cilindro para determinar la conductividad hidráulica (K) en condiciones de laderas en el municipio de san José de los Remates, Boaco. La obtención de conductividad hidráulica no saturada se realizó por medio de dos metodologías Ankeny *et al*; (1991) y Zhang (1997). La conductividad hidráulica a saturación se obtuvo mediante el infiltrómetro de doble cilindro utilizando la ecuación de Reynolds (2002). Los diversos valores obtenidos, remarcan el carácter variable de este parámetro. El doble cilindro presentó valores más altos al compararse con los datos de la tensión más cercana a saturación debido a que es un suelo franco arcilloso. Los datos de conductividad generados por las ecuaciones de Ankeny y Zhang presentaron diferencias ya que los primeros fueron en promedio mayor. El método infiltrómetro de tensión de mini disco resulta ser más práctico en términos de su facilidad, tiempo, número de operarios, número de repeticiones, consumo de agua especialmente en zonas de difícil acceso, ambos se realizaron en condiciones naturales del suelo (Campo) lo cual permite mayor confiabilidad del método.

Palabras claves: Conductividad hidráulica (K), Infiltrómetro de tensión de disco,

Abstract

Hydraulic conductivity is an important factor that determines the movement of water on the floor, showing a close relationship with surface runoff. This study aims to evaluate the performance of the methodology of MD tension infiltrometer, compared with double-cylinder infiltrometer to determine the hydraulic conductivity (K) in terms of slopes in the town of San José de los Remates, Boaco. Obtaining unsaturated hydraulic conductivity was performed by two methods Ankeny et al, (1991) and Zhang (1997). Saturated hydraulic conductivity was obtained by double-cylinder infiltrometer using the equation of Reynolds (2002). The different values obtained, emphasize the variability of this parameter. The double cylinder presented higher values when compared with data from the voltage closer to saturation because it is a clay loam soil. Conductivity data generated by the equations of Ankeny and Zhang showed differences since the former were on average larger. The tension infiltrometer method mini disc turns out to be more practical in terms of ease, time, number of operators, number of repetitions, water consumption, especially in remote areas and especially that the tests were conducted in natural soil conditions allowing greater reliability of the method.

Keywords: hydraulic conductivity (K), disc tension infiltrometer,

I. INTRODUCCIÓN

El movimiento del agua al interior del suelo y la naturaleza de los poros y el contenido del agua son factores importantes que determinan la parte de la precipitación que penetra al terreno y la que se escurra sobre el mismo. Por lo tanto las tasas elevadas de infiltración no solo aumentan la cantidad de agua que se almacena en el suelo para uso de las plantas sino también reducen los riesgos de inundación y de erosión que son consecuencia de los escurrimientos (Foth, 1986). La baja conductividad hidráulica puede también contribuir notablemente a elevar el grado de erosión al aumentar las aguas de escorrentía por una disminución de la permeabilidad de los suelos (Laurent, 1967).

Es la conductividad hidráulica el parámetro hidrofísico más determinante a la hora de cuantificar las diferentes componentes del balance global de agua. La determinación de la conductividad hidráulica refleja mejor las condiciones de campo, y la medida de esta a distintas profundidades en un suelo permite poner de manifiesto diferencias en la capacidad de transmisión de agua por parte de los distintos horizontes debido a la heterogeneidad del suelo. Con relación a la conductividad hidráulica del suelo se ha señalado (Saunders et al, 1978) que este es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo y, consecuentemente para solucionar problemas que envuelven irrigación, drenaje, recarga y conservación del suelo. La conductividad hidráulica es afectada por la textura y estructura del suelo, (Reichardt, 1985) siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados.

Es importante saber que a nivel mundial se han hecho estudios para calcular la K por diferentes métodos llegando a la conclusión de que el valor de K ha influido notablemente en la evaluación y conservación de suelos

II. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar conductividad hidráulica en los transeptos ubicados en el municipio de San José de los Remates, departamento de Boaco, por el método del minidisco y doble Cilindro.

Objetivos Específicos

Calcular los valores de conductividad hidráulica obtenidos por el método de minidisco, Ankeny *et al.*, (1968) y Zhang (1997)

Estimar el valor de Conductividad hidráulica por el método doble cilindro a través de la ecuación de Reynolds *et al.* (2002).

Estimar el mejor comportamiento en la determinación de los valores de K por ambos métodos y su aplicabilidad efectiva.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización y descripción del sitio de estudio

El área experimental está ubicada en la finca La Primavera comarca Cerro Alegre municipio de san José de los Remate, departamento de Boaco, cuyas ubicación es latitud norte $12^{\circ}36'43''$ y longitud oeste $85^{\circ}44'07''$ a una altura de 1200 msnm, la zona que se caracteriza por tener un clima semi-húmedo de sabana tropical con una temperatura entre los 25°C - 27°C , el rango de la precipitación oscila entre los 1 000 mm con una distribución durante todo el año.

3.2. Equipo

3.2.1 Infiltrómetro de mini discos

El infiltrómetro de mini disco consiste en un tubo de ensayo de 32.7 cm. de longitud y 3.1 cm. de diámetro. En la parte superior se encuentra un tapón de goma con un capilar graduado en centímetros para determinar la succión a utilizar. En su parte inferior posee un disco de acero inoxidable de 4.5 de diámetro y 3mm de grosor.

Separado en dos cámaras por una placa de goma, la cámara superior llamada cámara de burbujas controla la succión sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo, su función principal es crear una succión constante sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo La cámara inferior esta graduada en centímetros y contiene el agua a aplicar en la prueba, posee un tubo mariotte que se comunica con la cámara superior.

Para su utilización se llena de agua ambas cámaras tapándose herméticamente con el disco y el tapón de goma, se coloca verticalmente sobre la superficie del suelo.

Previamente se coloca un anillos de plástico de 2mm de grosor relleno de arena de 0.5 mm diámetro, a fin de lograr un buen

contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo. Una vez hecho esto el agua dentro del tubo fluye y se infiltra dentro del suelo a una tensión igual a la que produce el capilar dentro de la cámara de burbujas de -0.5cm,-1.0cm hasta -6.0cm de columnas de agua.

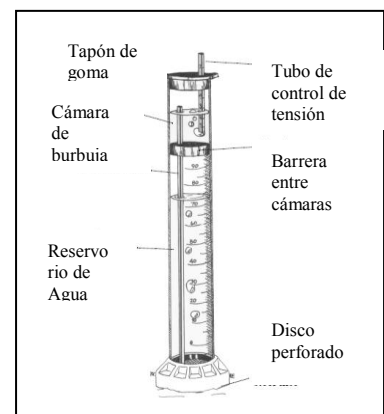


Diagrama de Infiltrómetro

En el caso de la tensión -0.5 cm la succión es menor, por tanto la fuerza vertical creada entre por la cohesión y la tensión superficial es menor, al ir disminuyendo las tensiones hasta -6.0 cm. la fuerza vertical incrementa.

Considerando al suelo como un conjunto interconectado de tubos capilares de diferente diámetro, cuando el agua del infiltrómetro empieza a circular sólo se llenaran los poros que provoquen una tensión superior a la succión creada por el infiltrómetro sobre la superficie de contacto. Debido a que el infiltrómetro posee una succión ajustable es posible controlar el paso del agua a los poros de diferentes diámetros existentes en el suelo

3.2.2 Infiltrómetro de doble cilindro

Los anillos infiltrómetro consisten de un juego de dos anillos de 25 cm de alto. El exterior de 55 cm. de diámetro y el interior de 35 cm. de diámetro; una boya con una escala graduada en cm. y mm para realizar las mediciones. La profundidad a la que penetraron los anillos fue de 15 cm. Un método ampliamente usado para determinar la infiltración de un suelo es el del cilindro infiltrómetro, el cual es adecuado para métodos de riego que permiten mojar directamente una gran superficie de suelo (bordes, regueros en contorno, aspersion).

La limitación más seria para el uso de cilindros infiltrómetros es que su emplazamiento en el suelo provoca un cierto grado de alteración de sus condiciones naturales (destrucción de la estructura o compactación produciendo cierta variación en la cantidad de agua que penetra en el suelo.

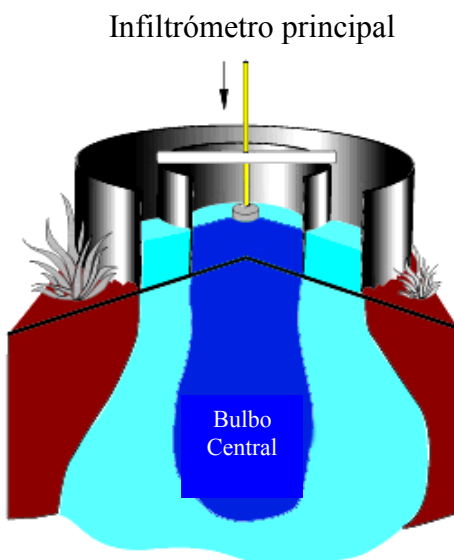


Figura 2. Infiltrómetro de doble cilindro

Además, la interfase entre el suelo y el lado del cilindro metálico puede causar una entrada anormal de agua, resultando un mayor volumen de agua que se infiltra en un tiempo dado. Otra de las limitaciones que presenta el uso de cilindros es el problema del aire atrapado al interior de la columna de suelo. La incapacidad del aire para escapar desde el suelo bajo condiciones de flujo saturado, generalmente crea un cojín interno de aire que resulta en un impedimento para el movimiento vertical del agua, resultando velocidades de infiltración menores.

Aplicable también para determinar la conductividad hidráulica saturada en la superficie del suelo y consiste en un juego de cilindros uno interno y otro externo insertados en la capa superficial del suelo, cada cilindro es suplido por un potencial hidráulico constante. La conductividad hidráulica puede ser estimada una vez que el flujo de agua en el cilindro interno se ha estabilizado.

La aplicación de agua a un área conocida en la cual el rango de infiltración es determinado por la acumulación de agua infiltrada en el suelo por unidad de superficie en una unidad de tiempo la infiltración puede ser medida en ambos cilindros siendo preferente hacer las lecturas en el cilindro interno ya que el cilindro externo ayuda a reducir el error que puede resultar por efecto del flujo lateral del agua en suelo.

El cilindro interno virtualmente torna el flujo tridimensional a un flujo unidimensional al permitir que el agua que se encuentra en el cilindro interno fluya casi estrictamente de forma vertical

3.3 Modo de empleo de minidisco

La recolección de datos se realizó en tres toposecuencias (3,4 y 8) cada una en áreas con diferentes cobertura vegetal (grama, café y bosque respectivamente) subdivididas cada una en tres perfiles ubicados en parte alta, media y baja de laderas a diferencias de la toposecuencia 4 en la que están situados dos perfiles parte alta y baja (**ver anexo 24**), con análisis de suelo correspondiente a cada perfil.

3.4 Modo de empleo de infiltrómetro minidiscos

El minidisco se ubica en cada superficie del horizonte, colocando un anillo de plástico de 2mm de grosor con relleno de arena de 0.5 mm diámetro, a fin de lograr un buen contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo, se hicieron tres repeticiones cada una es medida en un tiempo de 30 min en las tensiones -6, -5,-4 y en las tensiones -3 -2 en un tiempo de 20 min y en la tensión -1y -0.5 de 15 min en una lectura cada 30 segundos. Haciendo un total de 2hrs y 45 min en cada repetición, las pruebas se establecieron en orden ascendente terminando siempre con el potencial de saturación con el fin de reducir los efectos de histéresis. Según Cook y Broeren (1994) citado por Prieto *et al* (2006)

3.5 Modo de empleo del doble cilindro en el campo

Las pruebas de doble cilindro se realizaron aproximadamente a 1 m del perfil de suelo con tres repeticiones al mismo tiempo ubicando los cilindros externos e internos en la superficie de suelo limpiándola adecuadamente no alterando la naturaleza de la superficie del suelo, introduciendo los dos aparatos paralelamente a una profundidad promedio de 5 a 10 cm, con la ayuda de un martillo de tamaño de 60 cm con un peso de 15 lb y una cruz ubicada arriba de los dos cilindros de manera que se introdujera a la misma profundidad tratando de no alterar las condiciones del suelo. Ya colocado se incorporo el agua de manera que no haga un contacto directo al suelo usando un plástico de 80cm cuadrado haciendo que el agua llegue directamente al plástico y luego de manera dúctil se incorpore al suelo. Establecido el sistema, se recopilan datos correspondientes como la profundidad de agua en el cilindro externo e interno, luego con una boya graduada en cm se toman datos de la profundidad que el nivel del agua alcanza en el anillo interno cada 30 segundos durante 30 min, posteriormente cada 1min durante 30 min y 5 min durante 1 hrs después cada 10 min completando las 3 hrs hasta alcanzar un flujo casi estacionario.

3.6 Análisis de los datos

Con los datos obtenidos en campo se calculó la conductividad hidráulica a saturación utilizando las ecuaciones desarrolladas para cada método.

3.6.1 Infiltrómetro de mini discos

Se determinó a conductividad hidráulica por dos métodos, el primero propuesto por Zhang (1997), ajustado a la siguiente función:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \quad (1)$$

Conocido los valores de infiltración, la conductividad hidráulica no saturada se calcula a partir de:

En la cual C_1 es la infiltración básica y $K = \frac{C_1}{A}$ el parámetro A se obtiene de:

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_o]}{(\alpha r_o)^{0.91}} \quad n \geq 1.9$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_o]}{(\alpha r_o)^{0.91}} \quad n < 1.9$$

6

(3)

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[7.5(n - 1.9)\alpha h_o]}{(\alpha r_o)^{0.91}}$$

Donde n y α son los parámetros de Van Genuchten para el suelo, r_o es el radio del disco, y h_o es la succión en la superficie del disco.

El segundo método es el propuesto por Ankeny *et al* (1991) estima la conductividad hidráulica en campo K , a diferentes potenciales de presión χ está basado en la ecuación de Wooding para un flujo tridimensional que procede de una fuente circular a un potencial de presión constante en la superficie de infiltración (Wooding, 1968). Si asumimos que K es mucho mayor que la conductividad hidráulica en la presión inicial podemos escribir la ecuación de Wooding (1968) como:

$$Q = \frac{\pi r^2 K + 4rK}{\alpha} \quad (4)$$

Donde Q es el flujo volumétrico en estado estacionario, r es el radio de la fuente circular y α es una constante que relaciona, la infiltración obtenida y la diferencia de tensión aplicada.

La metodología presentada en este estudio es la utilizada por Messing y Joel (2000). Valores de conductividad hidráulica (K) ($L T^{-1}$) en función de potenciales de presión de agua en el suelo (χ) (L) se obtuvieron a partir de las tasas de infiltración básica en diferentes potenciales aplicados, siguiendo la teoría descrita por Ankeny *et al.* (1991) y Reynolds & Elrick (1991) el cual está basada en la ecuación (4), y la función de Gardner (1958):

$$K = K_s \exp(\psi\alpha) \quad (5)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada en el campo ($L T^{-1}$), α es una constante que relaciona el radio del infiltrómetro, la infiltración obtenida y la diferencia de tensión aplicada, y χ es la presión del agua en el suelo (Reynolds & Elrick, 1991). Siendo entonces:

$$\text{Donde } q \text{ es el módulo de } q = \left(1 + \frac{4}{\pi\alpha}\right) \text{ infiltración } (L T^{-1}), K \text{ es la } \quad (6)$$

conductividad hidráulica en el potencial de presión suministrado (χ) (L) y r es el radio de la superficie de infiltración (L). En la derivación de (6) es implícito asumir que los valores de conductividad hidráulica subsiguientes en el frente de humedad serán menores que el obtenido con el potencial inicial.

Si también se asume que las ecuaciones (4) y (5) pueden aplicarse en tramos tal que α es constante entre dos potenciales consecutivos χ_i y χ_{i+1} tendremos:

$$\alpha_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\ln\left(\frac{q_i}{q_{i+1}}\right)}{\psi_i - \psi_{i+1}} \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (7)$$

Siendo q la tasa de infiltración en estado estacionario ($= Q/\pi r^2$), y n el numero de presiones aplicadas. Debe de notarse que $\chi_i > \chi_{i+1}$ por tanto $q_i > q_{i+1}$, además las mediciones en campo debe hacerse en una secuencia ascendente. Despejando K en (5) se obtiene:

$$K_{i+\frac{1}{2}} = \frac{q_{i+\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha_{i+\frac{1}{2}}}\right)} \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (8)$$

Donde $q_{i+1/2}$ es la tasa de infiltración en los puntos medios, obtenida por:

$$q_{i+\frac{1}{2}} = \exp\left(\frac{\ln q_i + \ln q_{i+\frac{1}{2}}}{2}\right) \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (9)$$

Los parámetros K y α se estimaron a través de una regresión lineal de los datos de la tasa de infiltración haciendo uso de Mathcad PLUS 5.0.

3.6.2 Infiltrómetro de doble cilindro

El modelo utilizado fue el de Kostiakov (1932), que consiste en describir la infiltración del agua en el suelo con un modelo potencial ($I_a = at^b$), para obtener de esta manera los modelos de infiltración acumulada, velocidad de infiltración e infiltración básica. La infiltración básica así obtenida equivale a la K_s según lo establecido por Green y Ampt (1911) y analizado por Fuentes (1997) citados por Prieto et al (2006). Para un mayor ajuste de estos datos la estimación final de la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) se determinó por el procedimiento descrito por Reynolds *et al.* (2002). En el cual K_{sat} es:

$$K_s = \frac{q_s}{\left[\frac{H}{C_1 d + C_2 a_r} \right] + \left\{ \frac{1}{\alpha (C_1 d + C_2 a_r)} \right\} + 1} \quad (10)$$

Donde q_s ($L T^{-1}$) es la tasa de infiltración cuasi estacionario que es relativamente constante cuando las diferencias de las tasas de infiltración entre dos mediciones continuas es inferior al 10% , H (L) es la altura del agua dentro del cilindro interior, $C_1 = 0.316\pi$ y $C_2 = 0.184\pi$ son constantes cuasi empericas adimensionales, d (L) es la profundidad de inserción de los anillos, a_r (L) es el radio del anillo interior, y α (L^{-1}) es el parámetro inverso de la longitud capilar microscópica del suelo (Gardner 1958).

IV. Resultados y discusión

Tabla 1. Conductividad hidráulica no saturada por el método de minidiscos

| perfil | | -0.5 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 |
|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| 7 | Zhang | 22.40 | 11.42 | 6.24 | 3.72 | 10.33 | 6.28 | 4.64 |
| | ankeny | 163.21 | 61.36 | 58.49 | 13.71 | 12.46 | 8.5 | 3.67 |
| 8 | Zhang T=3 | 141.91 | 48.73 | 14.95 | 8.92 | 5.52 | 3.78 | 3.3 |
| | ankeny | 108.31 | 73.63 | 41.20 | 25.08 | 15.78 | 10.11 | 7.55 |
| 9 | Zhang | 264.29 | 115.45 | 135.11 | 119.33 | 22.54 | 55.61 | 124.73 |
| | ankeny | 144.29 | 93.04 | 49.04 | 27.56 | 17.43 | 12.54 | 9.39 |
| 10 | Zhang | 8.99 | 6.51 | 3.62 | 2.17 | 1.88 | 1.56 | 1.18 |
| | ankeny | 70.95 | 55.21 | 30.62 | 20.06 | 17.62 | 16.86 | 15.19 |
| 11 | Zhang T=4 | 22.62 | 19.18 | 7.67 | 4.78 | 2.27 | 1.49 | 1.29 |
| | ankeny | 118.86 | 95.17 | 43.24 | 26.86 | 17.29 | 47 | 9.37 |
| 12 | Zhang | 28.53 | 8.58 | 2.16 | 1.99 | 0.28 | 0.2 | 0.2 |
| | ankeny | 189.09 | 58.03 | 55.5 | 16.42 | 5.63 | 8.3 | 11.73 |
| 22 | Zhang | 56.49 | 40.56 | 159.91 | 15.30 | 60.16 | 11.30 | 9.81 |
| | ankeny | 2.40 | 1.61 | 0.65 | 0.32 | 0.18 | 0.45 | 0.08 |
| 23 | Zhang T=8 | 19.31 | 56.94 | 14.36 | 11.66 | 41.91 | 13.04 | 3.86 |
| | ankeny | 0.74 | 0.46 | 0.23 | 0.24 | 0.21 | 0.14 | 0.08 |

4 Fuente: Rosa Enríquez y Osmar Orozco, 2010.

El comportamiento de la Conductividad Hidráulica depende de la tensión aplicada, por lo tanto la variable dependiente es la Conductividad Hidraulica y la independiente la tensión aplicada, como se observa en las siguientes gráficas.

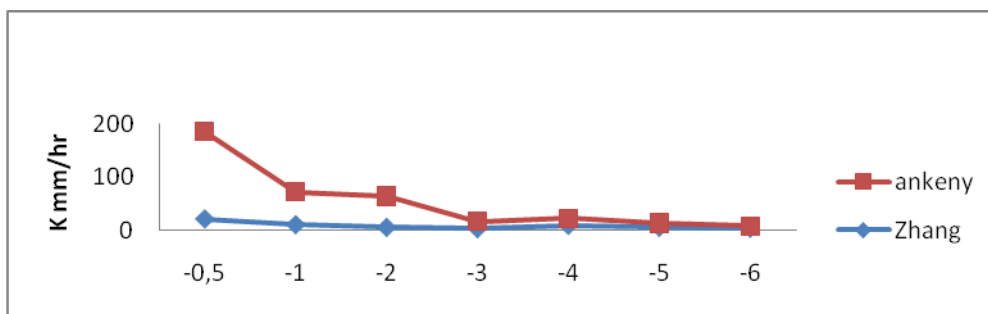


Figura 1. T3 Conductivida hidraulaca según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 7, parte alta de la ladera, bajo condición de grama, finca La Primavera, 2010.

Esta grafica presenta un comportamiento normal de orden ascendente, en la cual, el valor de la Conductividad Hidráulica aumenta, cuando mayor sea el valor de la tensión aplicada.

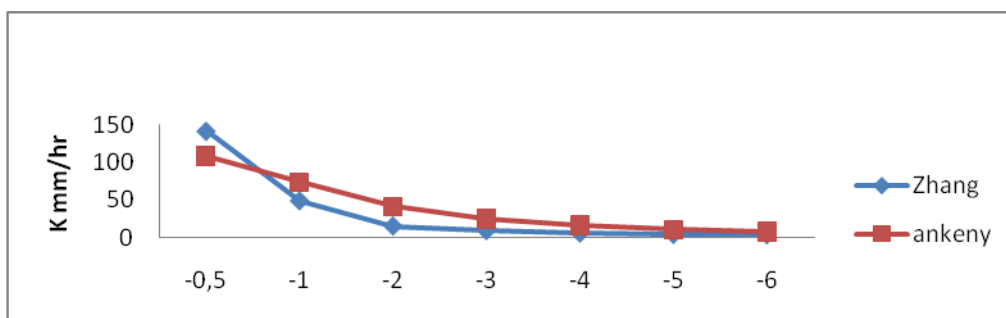


Figura 2. T3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 8, parte media de la ladera, bajo condición de grama, finca La Primavera, 2010.

En este caso presenta un comportamiento relativamente normal, bajo la salvedad que se produjo un descenso en los valores obtenidos en la tensión -0.5, con la ecuación de Ankeny, y un aumento desde 80, hasta 145 mm/hr, en el caso de los valores obtenidos con la ecuación de Zhang.

Esta variación en los valores se debió a que; el porcentaje de materia orgánica es mayor con respecto al perfil anterior.

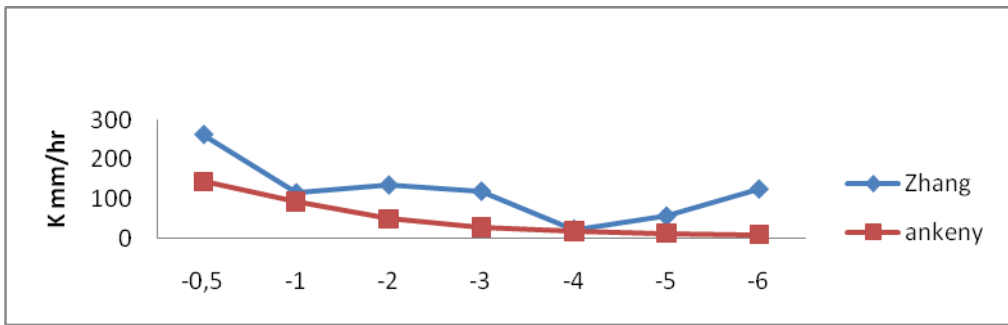


Figura 3.T3 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 9, parte baja de la ladera, bajo condición de grama en la finca La Primavera, 2010.

El perfil 9, es un caso muy particular, ya que los resultados obtenidos con la ecuación de Zhang, son mayores que los resultados adquiridos por medio de la ecuación de Ankeny, Por la razón, que se encuentra en la parte baja de la ladera y por lo tanto el porcentaje de materia orgánica es superior que en la parte superior de la ladera debido a la acunulación de materiales sedimentarios.

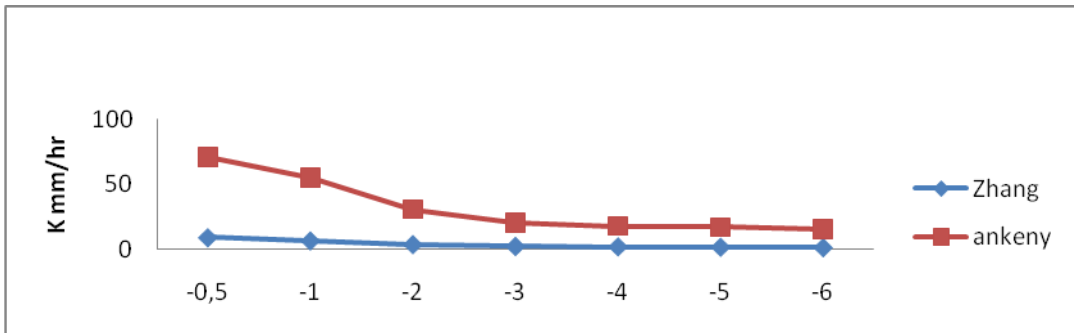


Figura 4. T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 10, parte alta de la ladera, bajo condición de bosque, finca La Primavera, 2010.

El perfil 10 presenta un comportamiento normal con una Conductividad Hidráulica de orden ascendente, con los valores obtenidos por la ecuación de Ankeny mayores con respecto a los resultados por la ecuación de Zhang.

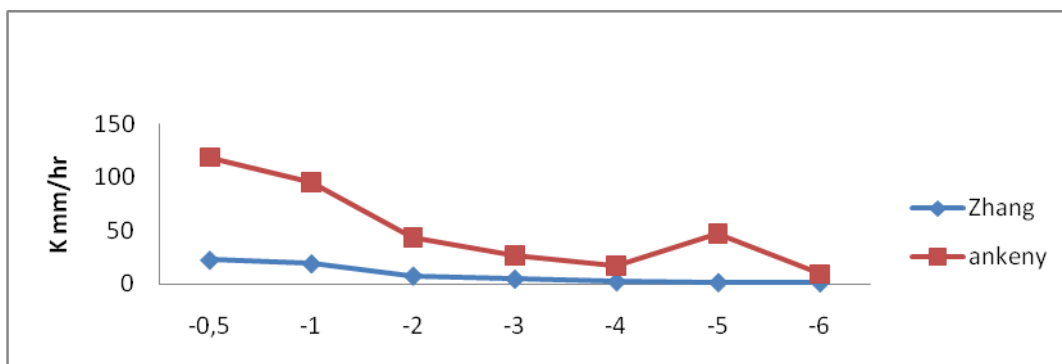


Figura 5. T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 11, parte media de la ladera, bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010.

En este caso se observa que en la tensión -5, para la ecuación de Ankeny se dió un aumento considerable de 50 mm/hr, debido a que existe presencia de raíces, y en cuanto a los datos de Zhang presentaron un orden normal ascendente.

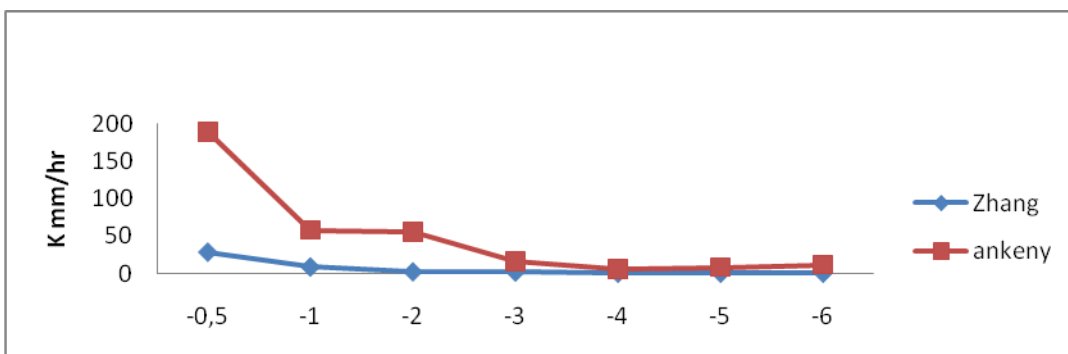


Figura 6. T4 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 12 bajo condición de bosque en la finca La Primavera, 2010.

El perfil 9 es un caso muy particular, ya que los resultados obtenidos con la ecuación de Zhang, son mayores que los de la ecuación de Ankeny por la razón de que el porcentaje de materia orgánica es considerablemente alto.

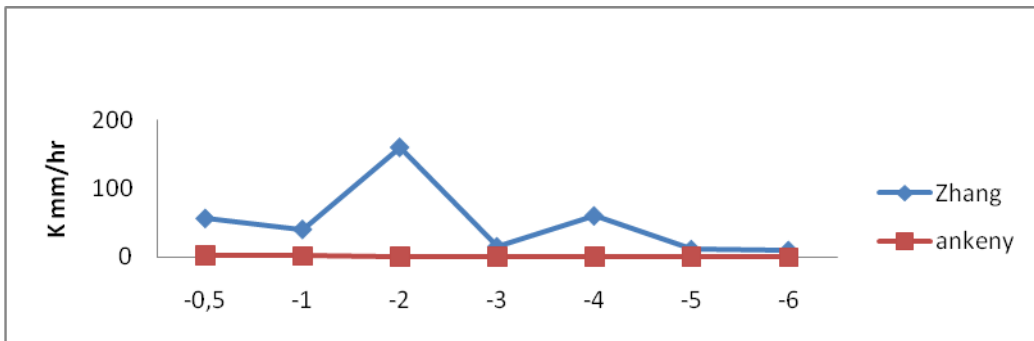


Figura 7. T8 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 22 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010.

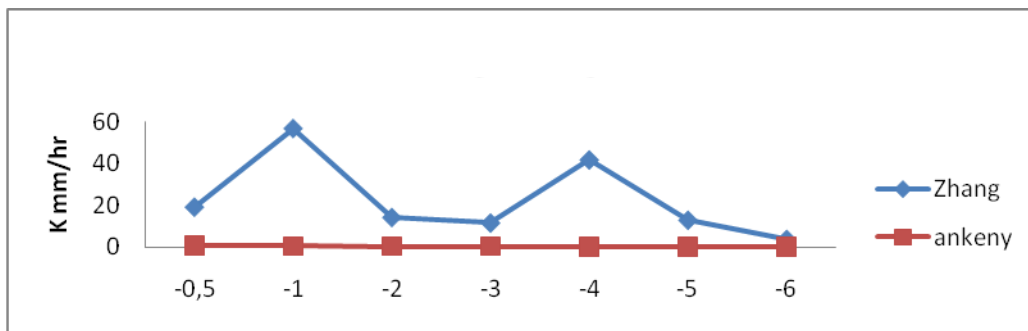


Figura 8. T8 Conductividad hidráulica según ecuaciones de Ankeny y Zhang en el perfil 23 bajo condición de cafe en la finca La Primavera, 2010.

| año | Toposecuencia | Perfiles | Profundidad | K mm/h |
|------|---------------|----------|-------------|--------|
| 2009 | T3 | 7 | 0-13 | 116,77 |
| 2009 | T3 | 8 | 0-10 | 48,35 |
| 2009 | T3 | 9 | 0-10 | 112,98 |
| 2010 | T4 | 10 | 0-12 | 91,24 |
| 2010 | T4 | 11 | 0-22 | 194,78 |
| 2010 | T4 | 12 | 0-28 | 153,19 |
| 2010 | T8 | 22 | 0-30/20 | 255,41 |
| 2010 | T8 | 23 | 0-25 | 280,42 |

Cuadro2. Conductividad hidráulica saturada por el método del doble cilindro. Fuente: Rosa Enríquez y Osmar Orozco, 2010.

La conductividad hidráulica, además de influir sobre la distribución de las aguas en el perfil del suelo y la facilidad de drenar los terrenos encharcados, puede también contribuir notablemente a elevar el grado de erosión al aumentar las aguas de escorrentía por una disminución de la capacidad de infiltración de los suelos.

De acuerdo a las graficas se muestran que a mayor tensión, mayor es la infiltración del agua por lo tanto la conductividad hidráulica es mayor. En casos como en el perfil 9, por el método de ankeny en comparación con el perfil 7 y 8 tuvo un comportamiento variante, ya que en el caso de ankeny tiene la tendencia de aumentar su valor por las condiciones edafoclimáticas de la zona.

Las mayores diferencias entre los valores se observo en las tensiones menores es decir la más cercanas a saturación en la cual el flujo de agua se mueve a todos los orificios dentro del suelo, en la ecuación de Zhang el parámetro A depende de la textura del suelo (Anexo 20) y la tensión aplicada por tal razón en los perfiles 21 y 22 se da un cambio en donde el comportamiento de la k es inversa al comportamiento de los valores de Ankeny, aunque los perfiles en su mayoría posean un alto contenido de arcilla y se considere que suelos arcillosos presentarán un flujo lento no habrá que pasar por alto el agrietamiento característico de estos suelos, por tanto es probable que un flujo rápido dentro de estos suelos no sea solamente proporcionado por los poros sino por los volúmenes de agua que se filtran a través de las grietas existentes. Este valor será por tanto estacionario hasta que la humectación del suelo provoque el hinchamiento de las partículas de arcilla y selle las grietas.

Los valores obtenidos por el método de doble cilindro, definen una conductividad hidráulica de; moderadamente baja a alta, según (Soil Survey Manual, 1993)

VI. Conclusiones

La conductividad hidráulica es un factor con una variabilidad espacial elevada, que responde a las condiciones climáticas y edáficas.

En el infiltrómetro de mini discos, Ankeny *et al* (1991) a medida que se incrementa la succión el valor de K decrece esto se debe a la diferencia del rango de tamaños de los poros que actúan en el proceso de infiltración, Zhang (1997) a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica el valor de K incrementa.

Los valores obtenidos por el método de doble cilindro, definen una conductividad hidráulica de; moderadamente baja a alta, según (Soil Survey Manual, 1993).

El método mas eficiente es el minidisco por la facilidad de uso y consumo de agua, uso aplicable en condiciones de ladera y reducido costo de aplicación.

VII. LITERATURA CITADA

Barco, Olga. Infiltración. citado el 12 de Mayo de 2009. Disponible en :

www.hidraulica.unalmed.edu.co/~ojmesa/hidrologia/documentos/infiltracion.pdf

Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico, 2008. Citado el 12 de Mayo de 2009.

Disponible en:

<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp4.pdf>

McKenzie N, Coughlan K and Cresswell H. (2002) Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation. (CSIRO Publishing: Melbourne).

Alarcón Bracena, Yngrid. Ensayos de permeabilidad en materiales de baja de permeabilidad

Citado 29 de mayo de 2009. Disponible en:

www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo15_a.pdf

Alarcón Bracena, Yngrid et al. Ensayos de permeabilidad usando el permeámetro de pared flexible (ASTM D5084-90). Citado el 28 de mayo de 2009. Disponible en

www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo14_a.pdf -

Anónimo. Métodos para determinar el coeficiente de conductividad hidráulica. Presentación

Power Point. Citado el 28 de mayo del 2009. Disponible en:

www.fing.edu.uy/iet/areas/geotecnica/cursos/mec_suelos/teorico_2009/propiedades_hidraulicas_4.ppt -

Anexos

Anexo 1. Descripción del perfil 7 grama 2010

Clasificación Taxonómica: Typic Tropudults



A 0-13 cm. El color en seco es 10YR 3/3, posee una textura arcillo limosa(AL) a franco arcillo limosa (FAL) con estructura granular de media a gruesa moderada. La consistencia en húmedo es friable a firme y en mojado es poco adherente y poco plástico. Presenta un límite entre horizonte abrupto y ondulado, la mayoría de los poros son finos y medios. Hay abundancia de raíces finas.

Bti 13-43 cm. El color en húmedo es 10YR3/4, de textura arcillosa (A) con estructura de bloques sub angulares gruesos medios y finos. La consistencia en húmedo es friable y plástica adherente en mojado. El límite entre horizontes es y uniforme, los poros finos son abundantes con presencia de cutanes. Hay presencia moderada de raíces finas y lombrices.

18

Bt2 43 -73 cm. El color en húmedo es 10 YR 4/4 con una textura arcillosa(A), la textura es de bloques sub angulares gruesos, medios y finos. La consistencia en húmedo es firme y en mojado es adherente y plástica. El límite entre horizonte se presenta claro y uniforme los poros muy finos y finos son abundantes. Hay pocas raíces finas.

Btc1 73-113 cm. El color en húmedo es 10YR5/6 con una textura franco areno gravoso (Fag). La estructura es masiva. De consistencia friable en húmedo y aglomerante y adherente en mojado. El límite entre horizontes es abrupto y ondulado con poros abundantes finos y medias las raíces son pocas y finas. Toba dacítica meteorizada muy parecida al talpetate con abundantes lombrices.

C2 113-138 cm. El color es 10YR 5/6 o 10YR 6/1 de textura franco areno gravosa con estructura masiva, el límite entre horizontes es abrupto y ondulado los poros en su mayoría son finos y medios

ANEXO 2. Cuadro de datos de laboratorio del perfil 7 parte alta

| Horizonte | Espesor | %Arenosa Total | %Limoso | %Arcilloso | Textura | %M.O | %S.B | pH | CI C | P ₂ O ₅ | P(ppm) |
|-----------|---------|----------------|---------|------------|--------------------------|------|-------|-----|------|-------------------------------|--------|
| A | 0-13 | 12,87 | 41,35 | 45,77 | Arcilloso o Limoso | 4,75 | 26,5 | 5,4 | 29,4 | 4,076 2 | 1,78 |
| Bt1 | 13-43 | 20,99 | 51 | 27,98 | Franco limoso | 3,8 | 22,65 | 5,3 | 15,8 | 0,870 2 | 0,38 |
| Bt2 | 43-73 | 19,26 | 37,9 | 42,82 | Arcilloso | 1,12 | 11,7 | 5 | 13,5 | 0,137 4 | 0,06 |
| Bt3/C1 | 73-113 | 31,7 | 45,63 | 22,65 | Franco | 0,5 | 6,51 | 5,1 | 12,9 | 2,404 5 | 1,05 |
| C2 | 113-138 | | | | | | | | | 0 | |

Anexo 3. T4 Descripción del perfil 8 parte media grama 2010



Clasificación Taxonómica: Typic Tropudults

A 0-10 cm. El color en húmedo es 10YR 3/3. La textura es franco arcillo limosa (FAL) la estructura es granular de fina a media; la consistencia en húmedo es friable y en mojado es poco plástica y poco adherente el límite entre horizontes es claro y uniforme los poros en su mayoría finos con algunos de tamaño medio. Las raíces finas son muy abundantes.

Bt1 10-35 cm. El color en húmedo es 10YR3/4 con textura franco arcillo limoso la estructura esta conformada por bloques sub angulares gruesos, medio y finos. La consistencia en húmedo es friable y en mojado es poco adherente y plástico. El límite entre horizontes es claro y uniforme

los poros son muy finos y finos en mayoría. Las raíces son finas y moderadamente finas. Presencia de cutanes, cascajos de basalto en un 10%.

Bt2 35-57 cm. 10YR4/6 es el color en húmedo de textura franco arcillosa (FA) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medio y finos. La consistencia en húmedo es friable y en mojado es plástica y adherente, el límite entre horizontes es claro y uniforme, la mayoría de los poros son finos, aunque hay presencia de poros medios y muy finos. Hay pocas raíces finas. Presencia de piedras cascajos de basalto

Bt3 57-82 cm. 10YR 3/6 es su color en húmedo de textura franco arcillo arenosa(FAa) con estructura de bloques angulares y sub angulares de grueso, medio y pequeño tamaño, la consistencia es friable en húmedo y plástica y adherente en mojado. El limite entre horizonte es claro y uniforme los poros en mayoría son finos con presencia de poros medios y muy finos. Hay pocas raíces finas. Presencia de grava en 15%, piedra de cascajo

Bt4 82-95 cm. Color en húmedo 10YR 4/4 de textura franco limo arcilloso (FLA) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos. La consistencia en húmedo es friable, en mojado es poco adherente y plástico. El límite entre horizontes es claro y uniforme. Hay presencia de poros finos y medios, poco contenido de raíces finas. Presencia de cutanes.

Bt5 95-113 cm. Color en húmedo 5YR4/4, textura franco limo arcilloso (FLA) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos. La consistencia en húmedo es friable, en mojado es poco adherente y poco plástico. El límite entre horizontes es claro y uniforme. Abundantes poros finos y medios, no hay presencia de raíces finas. Presencia de cutanes.

C 113 cm. a más. Color en húmedo 7.5YR4/6. Textura franco arcillo arenosa (FAa) con estructura de bloques sub angulares de consistencia friable en húmedo y poco adherente y poco plástico en mojado. Con abundantes poros muy finos, finos y gruesos, hay evidencia de actividad biológica no hay raíces finas dentro del horizonte. Presencia de cascajos.

| Hori | Espes | %Aren | % Limo | %Arcilla | Textura | % MO | % SB | pH | CIC | P ₂ O ₅ | P ppm |
|------|--------|-------|--------|----------|-----------------------|------|-------|-----|------|-------------------------------|----------|
| A | 0-10 | 18,5 | 46,94 | 34,53 | Franco acillo limoso | 5,6 | 23,93 | 5,3 | 28,2 | 1,5343 | 0,67 |
| Bt1 | 10-35 | 24,36 | 50,18 | 25,51 | Franco limoso | 3,35 | 37,4 | 5,5 | 18,9 | 0 | |
| Bt2 | 35-57 | 23,68 | 40,16 | 36,15 | Franco arcillo limoso | 2,18 | 33,58 | 5,5 | 17 | 3,5037 | 1,53 |
| Bt3 | 57-82 | 27,81 | 42,99 | 29,18 | Franco arcilloso | 4,25 | 7,74 | 5,3 | 15,1 | 3,2976 | 1,44 |
| Bt4 | 82-95 | 33,94 | 40,71 | 25,33 | franco | 0,34 | 4,88 | 5,3 | 13,5 | 5,7479 | 2,51 |
| Bt5 | 95-113 | 36,39 | 42,36 | 21,23 | franco | 6,45 | 2,48 | 4,8 | 18,9 | 7,1219 | 3,11 |
| C | 113-+ | 36,48 | 46,26 | 17,24 | franco | 0,5 | 2,27 | 4,8 | 22,9 | 4,7403 | 2,07 |

Anexo 5 Cuadro de datos de laboratorio perfil 8

Anexo6. T4 Descripción del perfil 9 grama parte baja

Clasificación Taxonómica: Typic Tropudults



A 0-10 cm. Color pardo a pardo amarillento oscuro (10YR 3.5/3) en húmedo, de textura arcillo limosa (AL) con grava muy fina, con estructura granular gruesa, media y fina moderada. La consistencia en húmedo es friable y en mojado es poco adherente y plástico. El limite entre horizontes es abrupto y ligeramente ondulado, abundantes poros finos y muy finos y pocos poros medios hay abundantes raíces finas.

Bt1 10-20cm. El color en húmedo 7.5YR 4/4 con textura arcillosa a franco arcillosa (A- FA), de estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos, consistencia en húmedo friable a firme y mojado ligeramente adherente a plástico, limite abrupto y ondulado, abundantes poros finos y muy finos y frecuentes raíces finas. Hay presencia de cutanes.

Bt2 20-64 cm. 7.5YR4/6 en húmedo, textura arcillo a arcillo limosa(A- AL) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos de consistencia firme a friable en húmedo, adherente y plástico mojado, limite claro y uniforme, abundantes poros finos y muy finos, pocas raíces finas.

Bt3 64-90 cm. 7.5 YR 4/6 textura arcillosa (A) con grava muy fina, estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos. La consistencia es firme a friable húmedo y adherente y plástico mojado. El limite es claro y uniforme, hay abundantes poros finos y muy finos. Muy pocas raíces finas.

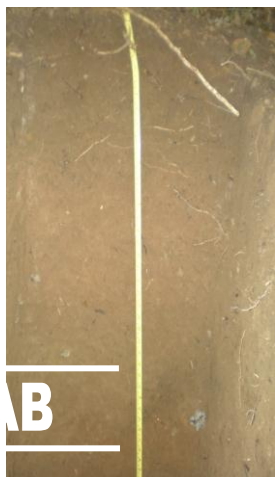
Bt4 90-128 cm. 7.5YR 4/6 en húmedo de textura arcillosa a franco arcillosa (A- FA), estructura de bloques sub angulares, gruesos, medios y finos. De consistencia firme a friable en húmedo, y adherente y plástico en mojado. Hay abundantes poros finos y muy finos, no hay presencia de raíces finas.

Anexo 7. Cuadro de datos de laboratorio perfil

| Horizonte | Espesor | %Arena Total | %Limo | %Arcilla | Textura | %M.O | %S.B | pH | CIC | P ₂ O ₅ | P(ppm) |
|-----------|---------|--------------|-------|----------|------------------|------|-------|-----|------|-------------------------------|--------|
| A | 0-10 | 16,99 | 35,33 | 47,66 | Arcilloso | 6,27 | 29,82 | 5,2 | 22,3 | 1,9694 | 0,86 |
| Bt1 | 10-20 | 19,02 | 39,7 | 41,26 | Arcilloso | 3,08 | 21,08 | 5,4 | 15,6 | 0 | |
| Bt2 | 20-64 | 18,94 | 32,58 | 48,46 | Arcilloso | 0,32 | 24,13 | 5,5 | 10,4 | 3,7327 | 1,63 |
| Bt3 | 64-90 | 26,77 | 35,74 | 37,47 | Franco arcilloso | 0,17 | 7,71 | 5,2 | 9,85 | 1,0992 | 0,48 |
| Bt4 | 90-128 | 33,36 | 39,68 | 26,94 | Franco | 0,09 | 6,51 | 5,3 | 11,2 | 1,2137 | 0,53 |

Anexo 8.T4Description del perfil 10 Parte Alta bosque

Clasificación Taxonómica: Typic Ultic Argiudolls



A1 0-12cm. El color en húmedo es 10 YR 3/3 de textura franco arcillo limosa(FAL), con estructura de bloques sub angulares grandes, medios y finos. La consistencia es friable a firme en húmedo, limite claro y ondulado, abundantes poros finos y pocos poros medios, hay raíces finas, muy finas y medias. Con microorganismos y abundante humus.

A2 12-38 cm.: El color 7.5 YR 3/3 en húmedo de textura arcillosa (A) con estructura de bloques sub angulares finos, medios y gruesos. La consistencia en húmedo es firme, muy adherente y plástica. El límite es abrupto y uniforme con poros muy finos y pocos poros gruesos. Raíces finas, pocas raíces gruesas.

Presencia de cutanes y huevos de lombrices

AB 38-52 cm.: El color es 7.5YR 3/3 en húmedo textura arcillosa a arcillo limosa (A- AL), con estructura de bloque sub angulares gruesos, finos y medios. Consistencia firme en húmedo, muy adherente y plástica en mojado. El límite es claro y uniforme, abundantes poros finos y muy finos. Pocas raíces finas. Evidencia de actividad biológica y cután

Bt1 52-68cm. 7.5 YR 3.5/4 en húmedo. De textura arcillosa (A) con estructura de bloques sub angulares medios y grueso . Consistencia firme en húmedo y muy adherente y plástica en mojado, el limite es claro y uniforme con abundantes poros finos y muy finos y pocos poros medios. Pocas raíces finas y medias. Hay actividad biológica presencia de grumos

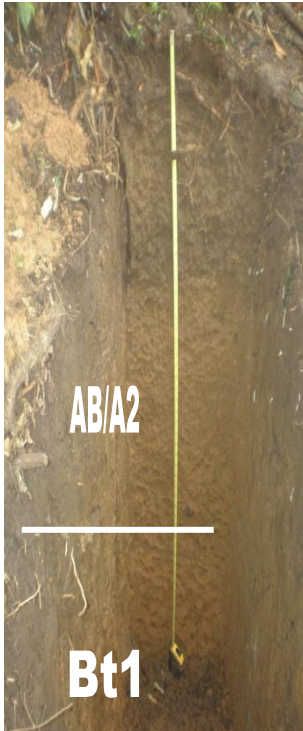
Bt2 68-102 cm. 7.5 YR 4/4 en húmedo con textura arcillosa (A) de bloques sub angulares la consistencia en húmedo fue firme y en mojado muy adherente y plástica. El límite entre horizontes es claro y uniforme, abundantes poros finos y pocas raíces finas. Presencia de cutanes, el suelo esta saturado de agua.

Bt3 102- 143 cm. 5YR 4/6 en húmedo. Textura arcillo limosa (AL) con estructura de bloques sub angulares, consistencia en húmedo firme y débilmente plástica y adherente en mojado. Con abundantes poros finos y muy finos. Pocas raíces medias. Presencia de cutnes.

Anexo 9. Cuadro de datos de laboratorio perfil 10 parte alta

| Horizonte | Espe sor | %Arena Total | %Limo | %Arcilla | Textura | % M. O | %S .B | p H | CI C | P₂O₅ | P(pp m) |
|------------------|-----------------|---------------------|--------------|-----------------|--------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|-----------------------------------|----------------|
| A1 | 0-12 | 14,68 | 55,4 4 | 29,86 | Franco Arcillo Limoso | 10,3 4 | 72, 91 | 6, 2 | 52 ,9 | 3,09 15 | 1,35 |
| A2 | 12- 38 | 15,03 | 48,1 6 | 36,75 | Franco Arcillo Limoso | 1,93 | 59, 11 | 6 | 41 ,6 | 3,54 95 | 1,55 |
| AB | 38- 56 | 14,85 | 46,4 4 | 38,7 | Franco Arcillo Limoso | 2,33 | 69, 31 | 6, 3 | 33 ,8 | 0,29 77 | 0,13 |
| Bt1 | 56- 68 | 18,7 | 46,2 | 35,08 | Franco Arcillo Limoso | 0,66 | 77, 11 | 6, 4 | 29 ,1 | 0 | |
| Bt2 | 68- 102 | 16,96 | 45,3 3 | 37,7 | Franco Arcillo Limoso | 0,2 | 78, 32 | 6, 1 | 26 ,8 | 0,29 77 | 0,13 |
| Bt3 | 102- 143 | 11,5 | 51,5 8 | 36,9 | Franco Arcillo Limoso | 0,1 | 66, 83 | 5, 9 | 29 ,4 | 2,15 26 | 0,94 |

Anexo 10.T4 Descripción del perfil 11 parte media bosque



Clasificación Taxonómica: Ultic Argiudolls

A₁ 0-22 cm. 7.5YR 2.5/2 en húmedo. De textura arcillo limosa (AL), con estructura granular fina y media, bloque sub angulares finos, medios y gruesos. La consistencia en húmedo es friable e adherente y plástica en mojado. El limite entre horizontes es abrupto y uniforme. Los poros son abundantemente finos y frecuentes medios. Las raíces son abundantemente finas, muy finas y medias.

AB/ A₂ 22-50 cm. 7.5 YR 2.5/3 textura arcillosa (A) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos. La consistencia en húmedo es friable y en mojado es plástica y adherente. El límite entre horizontes es claro y uniforme , con abundantes poros, finos y muy finos. Pocas raíces finas.

Bt₁/ A₃ 50-80 cm. 7.5 YR 3/3 en húmedo. Textura arcillosa (A) con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos moderados. La consistencia es firme en húmedo y muy adherente y plástica en mojado. Hay abundantes poros finos y muy finos. Presencia de cutanes

| Horizonte | Espesor | %Arena Total | %Limo | %Arcilla | Textura | %M.O | %S.B | pH | CI C | P ₂ O ₅ | P(ppm) |
|-----------|---------|--------------|-------|----------|-----------|-------|------|----|------|-------------------------------|--------|
| A1 | 0-22 | 11,55 | 41,19 | 47,25 | Arcillo | | 63,7 | 5, | 51, | 7,69 | |
| | | | | | Limos | 10,29 | 3 | 8 | 2 | 44 | 3,36 |
| AB/A2 | 22-50 | 14,08 | 45,62 | 40,28 | Arcillo | | 74,9 | 6, | 24, | | |
| | | | | | Limos | 1,01 | 5 | 1 | 4 | 0 | |
| Bt1/A3 | 50-80 | 14,18 | 37,42 | 48,33 | Arcilloso | | 75,7 | | 26, | 4,96 | |
| | | | | | | 0,51 | 3 | 6 | 5 | 93 | 2,17 |
| Bt2 | 80-127 | 14,32 | 34,79 | 50,87 | Arcilloso | | 69,4 | | 32, | | |
| | | | | | | 0,41 | 8 | 6 | 8 | 0 | |

Anexo 11 Cuadro de datos de laboratorio perfil 11 parte media

Anexo 12. T4 Descripción del perfil 12 parte baja bosque



Clasificación Taxonómica: Typic Tropudults

A 0-28 cm. 7.5 YR 3/3 en húmedo. De textura arcillosa (A) con estructura granular muy fina y blocosa. La consistencia en húmedo es firme y en mojado es muy plástica y adherente. El límite es abrupto, uniforme y claro. Poros muy finos y finos a medios.

Bt 28-102cm. El color en seco es 7.5YR 4/4 de de textura arcillo arenosa(Aa) fino, con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos moderados. La consistencia en húmedo es friable y en mojado es plástica y adherente. El límite es claro y uniforme, con poros finos medios a finos, poca presencia de poros grandes. Posee raíces finas y medias en poca proporción.

ABt2 102-119 cm. El color en húmedo es 7.5 YR 3/3 de textura arcillosa (Ag) con grava muy fina, de con estructura de bloques sub angulares gruesos, medios y finos moderados, la consistencia en húmedo es friable, en mojado es plástica y adherente,, el límite se presenta claro y uniforme, los poros son abundantes, frecuentemente medios y poca presencia de poros grandes, hay muy pocas raíces finas.

ANEXO 14 Conductividad hidráulica no saturada por el método de minidiscos

| Prof. | 0-13 | | 13-43 | | 43-73 | | 73-113 | |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 41.24 | 112.36 | 17.37 | 61.08 | 16.71 | 38.12 | 9.26 | 227.10 |
| -1 | 20.13 | 61.36 | 13.92 | 36.20 | 11.60 | 23.26 | 8.74 | 132.75 |
| -2 | 12.11 | 34.00 | 6.36 | 12.04 | 7.58 | 11.68 | 4.80 | 58.49 |
| -3 | 6.07 | 19.6 | 3.41 | 5.05 | 5.17 | 6.25 | 2.58 | 23.97 |
| -4 | 4.72 | 10.08 | 3.71 | 5.22 | 25.48 | 3.17 | 1.80 | 12.46 |
| -5 | 1.83 | 8.18 | 3.59 | 4.83 | 6.07 | 1.59 | 9.20 | 8.50 |
| -6 | 0.75 | 6.36 | 2.58 | 2.02 | 5.91 | 0.84 | 5.43 | 5.48 |

Perfil 7, Toposecuencia 3

| Prof. | 0-10 | | 10-35 | | 35-57 | |
|---------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 391.49 | 256.26 | 18.50 | 38.32 | 15.75 | 30.36 |
| -1 | 106.03 | 160.71 | 30.32 | 33.04 | 9.84 | 27.14 |
| -2 | 29.86 | 77.65 | 10.36 | 23.02 | 4.64 | 22.94 |
| -3 | 13.68 | 38.01 | 7.38 | 17.86 | 5.72 | 19.39 |
| -4 | 4.08 | 18.86 | 6 | 12.14 | 6.50 | 16.36 |
| -5 | 2.13 | 9.49 | 4.4 | 6.98 | 4.82 | 13.86 |
| -6 | 1.27 | 5.0 | 2.70 | 5.54 | 5.93 | 12.12 |

Perfil 8, toposecuencia 3.

| prof | 0-10 | | 10-20 | | 20-64 | | 64-90 | |
|---------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tensión | Zhang | Anken | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 158.05 | 89.26 | 144.00 | 125.35 | 412.68 | 240.18 | 342.44 | 122.40 |
| -1 | 94.57 | 47.53 | 156.38 | 79.33 | 129.43 | 144.63 | 81.43 | 100.68 |
| -2 | 21.82 | 17.84 | 158.36 | 43.83 | 140.73 | 79.50 | 219.55 | 54.99 |
| -3 | 33.91 | 9.11 | 22.52 | 23.93 | 302.48 | 47.22 | 118.43 | 30.00 |
| -4 | 5.75 | 7.74 | 28.92 | 9.02 | 12.75 | 31.17 | 42.75 | 21.81 |
| -5 | 40.94 | 8.03 | 41.18 | 6.83 | 66.00 | 14.40 | 74.35 | 20.91 |
| -6 | 126.11 | 2.18 | 117.43 | 3.83 | 21.74 | 12.75 | 233.66 | 18.81 |

Perfil 9, toposecuencia 3

| Prof. | 0-12 | | 12-38 | | 38-56 | |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 8.52 | 63.50 | 10.99 | 87.43 | 7.48 | 61.93 |
| -1 | 5.80 | 55.36 | 8.43 | 74.45 | 5.32 | 35.82 |
| -2 | 2.99 | 26.45 | 1.82 | 20.17 | 6.06 | 45.26 |
| -3 | 1.33 | 13.76 | 1.21 | 10.16 | 3.97 | 36.28 |
| -4 | 0.63 | 11.26 | 0.94 | 13.31 | 4.08 | 28.31 |
| -5 | 0.50 | 6.22 | 0.71 | 4.49 | 3.48 | 39.88 |
| -6 | 0.34 | 9.85 | 0.35 | 6.80 | 2.85 | 28.93 |

Perfil 10, toposecuencia 4

| Prof. | 0-22 | | 22-50 | | 50-80 | | 80-127 | |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 15.72 | 92.28 | 24.87 | 152.49 | 24.06 | 114.88 | 25.84 | 115.82 |
| -1 | 9.16 | 55.05 | 20.42 | 130.13 | 24.57 | 96.42 | 22.60 | 99.08 |
| -2 | 5.54 | 33.47 | 10.06 | 65.22 | 7.77 | 32.99 | 7.31 | 41.29 |
| -3 | 2.45 | 30.26 | 4.75 | 26.74 | 6.50 | 32.61 | 5.43 | 17.83 |
| -4 | 1.39 | 21.43 | 3.74 | 22.54 | 1.25 | 10.67 | 2.70 | 14.54 |
| -5 | 2.42 | 161.64 | 1.05 | 9.27 | 1.48 | 10.60 | 1.01 | 6.49 |
| -6 | 0.64 | 11.26 | 0.87 | 11.64 | 1.95 | 9.68 | 1.70 | 4.93 |

Perfil 11, toposecuencia 4

| prof | 0-28 | |
|---------|-------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 28.53 | 189.09 |
| -1 | 8.58 | 58.03 |
| -2 | 2.16 | 55.5 |
| -3 | 1.99 | 16.42 |
| -4 | 0.28 | 5.63 |
| -5 | 0.20 | 8.3 |
| -6 | 0.20 | 11.73 |

Perfil 12, Toposecuencia 4

| Prof. | 0-20/ | | 20-40 | | 40-60 | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 84.69 | 1.93 | 53.98 | 4.54 | 30.82 | 0.75 |
| -1 | 52.47 | 1.70 | 28.42 | 2.56 | 40.80 | 0.58 |
| -2 | 180.78 | 0.46 | 106.42 | 1.13 | 192.55 | 0.38 |
| -3 | 9.51 | 0.26 | 18.10 | 0.46 | 18.31 | 0.24 |
| -4 | 88.80 | 0.20 | 80.38 | 0.21 | 11.30 | 0.14 |
| -5 | 1.71 | 1.13 | 21.46 | 0.15 | 10.75 | 0.07 |
| -6 | 0.84 | 0.08 | 15.45 | 0.11 | 13.15 | 0.05 |

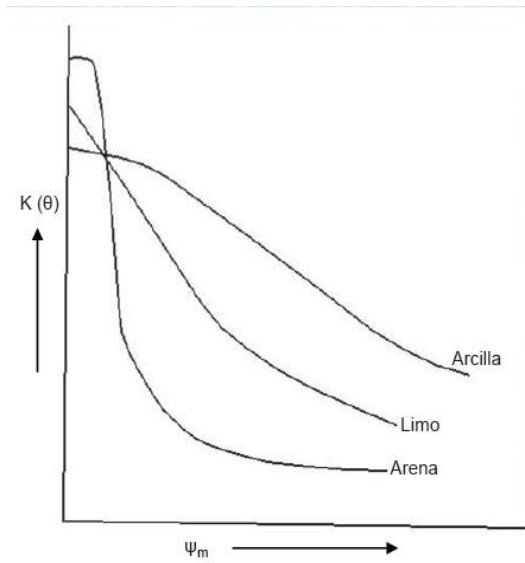
Perfil 22, Toposecuencia 8.

| Prof. | 0-25 | | 25-40 | |
|---------|-------|--------|-------|--------|
| tensión | Zhang | Ankeny | Zhang | Ankeny |
| -0.5 | 19.24 | 0.73 | 19.38 | 0.75 |
| -1 | 92.23 | 0.45 | 21.66 | 0.48 |
| -2 | 14.49 | 0.19 | 14.24 | 0.27 |
| -3 | 11.16 | 0.24 | 12.16 | 0.25 |
| -4 | 23.88 | 0.22 | 59.95 | 0.20 |
| -5 | 4.39 | 0.09 | 21.69 | 0.19 |
| -6 | 2.66 | 0.0 | 5.07 | 0.17 |

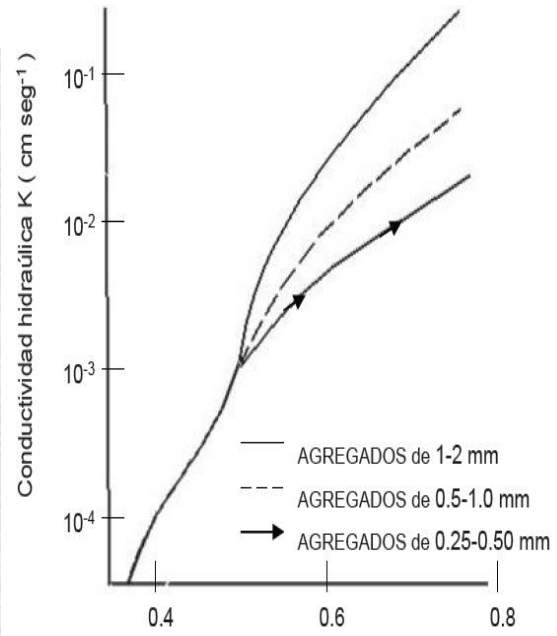
Anexo 19. Perfil 23, Toposecuencia 8.

Anexo 15. Conductividad hidráulica en suelos no saturados

Efecto de la **textura**



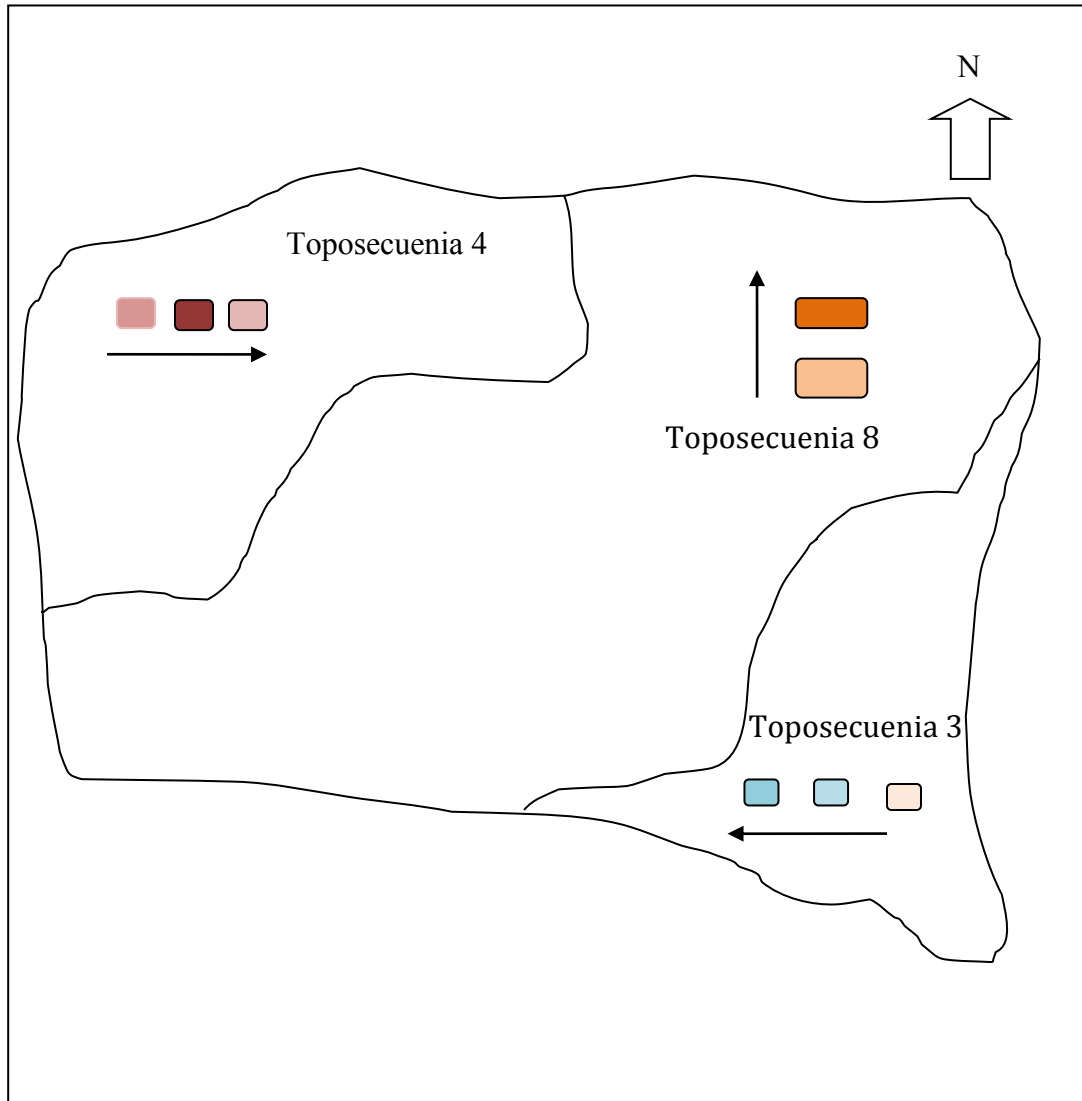
Efecto de la **estructura**



. Ghildyaly Tripathi(1987)

Anexo 16. Clases de conductividad saturada. Soil Survey Manual (1993)

| CLASE | K_{sat} mm/h |
|--------------|----------------------------------|
| Muy alta | > 360 |
| Alta | 36-360 |
| Mod. Alta | 3.6-36 |
| Mod. Baja | 0.36-3.6 |
| Baja | 0.036-0.36 |
| Muy baja | <0.036 |



Anexo 19. Mapa a mano alzada de la zona de estudio

Topo secuencia 4

- Parte alta
- Parte media
- Parte baja

topo secuencia 8

- Parte alta
- Parte baja

36

Toposecuencia 3

- parte baja
- Parte media
- Parte baja