



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA
AGRICULTURA**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AGROPECUARIO**

**TEMA: RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO
Y EL ECO DEL RADAR DE PENETRACIÓN**

AUTOR: TACO LLIVE, MICHELLE SILVANA

DIRECTOR: PhD. PÉREZ GUERRERO, PATRICIO

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO Y EL ECO DEL RADAR DE PENETRACIÓN.”*** realizado por la señorita ***MICHELLE SILVANA TACO LLIVE***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita ***MICHELLE SILVANA TACO LLIVE*** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de septiembre del 2017

Ph. D PATRICIO ALEJANDRO PÉREZ GUERRERO

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **MICHELLE SILVANA TACO LLIVE**, con cédula de identidad N° 1724461791, declaro que este trabajo de titulación **"RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO Y EL ECO DEL RADAR DE PENETRACIÓN."** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 21 de septiembre del 2017

MICHELLE SILVANA TACO LLIVE

C.C.1724461791



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN

Yo, **MICHELLE SILVANA TACO LLIVE**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas -ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO Y EL ECO DEL RADAR DE PENETRACIÓN.**", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de septiembre de 2017

MICHELLE SILVANA TACO LLIVE

C.C.1724461791

DEDICATORIA

A mis padres Mónica y Olmedo porque me enseñaron a ser perseverante para alcanzar mis anhelos.

A mi hija Isabel Samara porque los sueños se hacen realidad con esfuerzo y amor.

A mi hermana María Jose por su cariño

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitir que este momento llegue a mi vida, por proveerme de sabiduría y amor para eludir los obstáculos.

A mis padres Mónica y Olmedo por el apoyo incondicional en todo momento, por mostrarme lo indispensable que es ser perseverante. Por su amor e invaluable apoyo en el proyecto a mi hermana Ivonne Dayanara.

A mi esposo y su familia por su comprensión e interés en el proyecto.

A mis estimados profesores y profesoras por compartir su conocimiento.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE por brindar los recursos necesarios para llevar a cabo el presente estudio.

A los profesionales del Instituto Espacial Ecuatoriano por la oportunidad de ejecutar el proyecto de tesis con su absoluto apoyo.

Michelle Silvana Taco Llive

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1 El problema	1
1.1.2 Las causas	1
1.1.3 Los efectos.....	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general	3

1.4.2	Objetivos específicos	3
1.5	Hipótesis	3
CAPÍTULO II		4
REVISIÓN DE LITERATURA		
2.1	Radar de penetración en tierra (GPR).....	4
2.1.1	Fundamentos del radar de penetración.....	4
2.1.2	Principios de los radargramas.....	5
2.1.3	Profundidad de la señal del GPR en el suelo.....	5
2.1.4	Software Rad Explorer	5
2.2	Movimiento del agua en el suelo.....	6
2.2.1	Infiltración.....	6
2.2.2	Velocidad de infiltración	7
2.2.3	Conductividad hidráulica (K)	7
2.2.4	Métodos de medición de la permeabilidad	8
2.2.5	Infiltrómetro de doble anillo	9
2.2.6	Prueba de fenolftaleína	9
CAPÍTULO III		10
MATERIALES Y MÉTODOS		
3.1	Ubicación del lugar de investigación	10
3.1.1	Ubicación Política.....	11
3.1.2	Ubicación Geográfica	11

3.1.3	Caracterización Climática y Ecológica	11
3.2	Materiales.....	11
3.2.1	De campo.....	11
3.2.2	De laboratorio.....	12
3.3	Métodos	12
3.3.1	Preparación del terreno.....	12
3.3.2	Caracterización de suelos	12
3.3.3	Determinación de la velocidad de infiltración	13
3.3.4	Uso del equipo (GPR) o radar de penetración	16
3.3.5	Determinación de la densidad aparente.....	17
3.3.6	Determinación de la humedad	18
3.3.7	Análisis químico y físico	19
3.3.8	Potencial de hidrógeno.....	19
3.3.9	Conductividad eléctrica	19
3.3.10	Textura del suelo.....	19
3.3.11	Materia orgánica	20
CAPÍTULO IV		22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1	Resultados	22
4.1.1	Descripción de horizontes en campo	22
4.1.2	Perfil 1	22

4.1.3	Perfil 2	24
4.1.4	Perfil 3	25
4.1.5	Perfil 4	26
4.1.6	Perfil 5	27
4.1.7	Perfil 6	28
4.1.8	Análisis físico y químico	29
4.1.9	Velocidad de infiltración	33
4.1.10	Permeabilidad del suelo	37
4.1.11	Radargramas	37
CAPÍTULO V		50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1	Conclusiones.....	50
5.2	Recomendaciones.....	51
5.3	Bibliografía	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades químicas y materia orgánica	30
Tabla 2 Propiedades físicas y prueba NaF	31
Tabla 3 Propiedades químicas y materia orgánica	32
Tabla 4 Propiedades físicas y prueba NaF	33
Tabla 5 Permeabilidad del suelo.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación del terreno	10
Figura 2	Transectos para el GPR	12
Figura 3	Ubicación de las calicatas en el terreno.....	13
Figura 4	Mapa de curvas de nivel del terreno	14
Figura 5	Prueba de velocidad de infiltración	15
Figura 6	Recorridos del GPR en el terreno.....	17
Figura 7	Método del cilindro.....	18
Figura 8	Toma de peso.....	18
Figura 9	Textura por el método de Bouyoucus	20
Figura 10	Método de ignición para materia orgánica	21
Figura 11	Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 1	34
Figura 12	Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 2	34
Figura 13	Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 3	35
Figura 14	Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 4	36
Figura 15	Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 6	36
Figura 16	Radargrama del transecto A.....	37
Figura 17	Radargrama editado del transecto A	38
Figura 18	Perfil 4.....	38
Figura 19	Recorrido inicial del transecto A	39
Figura 20	Perfil 1.....	39

Figura 21 Recorrido final del transecto A.....	40
Figura 22 Radargrama del transecto B.....	40
Figura 23 Radargrama editado del transecto B.....	40
Figura 24 Perfil 6.....	41
Figura 25 Recorrido inicial del transecto B.....	42
Figura 26 Perfil 3.....	42
Figura 27 Recorrido final del transecto B.....	43
Figura 28 Radargrama del transecto C.....	43
Figura 29 Radargrama editado del transecto C.....	44
Figura 30 Recorrido inicial del transecto C.....	44
Figura 31 Perfil 2.....	45
Figura 32 Recorrido en la parte media del transecto C.....	45
Figura 33 Final del recorrido del transecto C.....	46
Figura 34 Radargrama del transecto D.....	46
Figura 35 Radargrama editado del transecto D.....	47
Figura 36 Recorrido inicial del transecto D.....	47
Figura 37 Perfil 5.....	48
Figura 38 Recorrido medio del transecto D.....	48
Figura 39 Recorrido final del transecto D.....	49

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue relacionar los radargramas que genera el equipo GPR con las características físicas del suelo. El estudio se llevó a cabo en una hectárea de terreno de la Hacienda El Prado. En la primera fase se caracterizó los perfiles del suelo mediante seis calicatas, en la parte alta se identificó un perfil edáfico del tipo Ap/Bt. Los horizontes (Ap) presentaron las siguientes características: densidad aparente $<1\text{g/cm}^3$, textura franco arenosa, ligeramente ácidos y contenido medio de M.O. Los horizontes (C) la densidad aparente y pH aumentaron, menor contenido de materia orgánica y de textura franca. En la parte baja se identificó un perfil edáfico del tipo Ap/Bt/C. En los horizonte (Ap) la densidad aparente $>1\text{g/cm}^3$, textura franco arenoso, ligeramente ácidos y contenido medio de materia orgánica. Y en los horizontes (Bt) y (C) la densidad aparente aumentó al igual que el pH, textura franca y contenido de materia orgánica bajo. En la segunda fase se realizaron pruebas de infiltración, mediante el infiltrómetro de doble anillo. En la tercera fase se transitó con el GPR por los transectos del terreno. En la parte alta los radargramas presentaron capas continuas en, seguido de curvas cóncavas que indican la presencia de rocas. La velocidad de infiltración fue menor que en la parte baja, presentando una permeabilidad moderada. En la parte baja el radargrama mostró líneas paralelas continuas a diferentes profundidades, lo que indica ausencia de piedra en el perfil. La permeabilidad en esta parte fue relativamente rápida.

Palabras clave:

- SUELO
- GEORADAR
- INFILTRACIÓN
- PERMEABILIDAD

ABSTRACT

The objective of this study was to relate the radargrams generated by GPR equipment with the physical characteristics of the soil. The study was carried out on a hectare of land of Hacienda El Prado. In the first phase, the soil profiles were characterized by six soil pits, in the upper part an edaphic profile of the Ap / Bt type was identified. The horizons (Ap) presented the following characteristics: apparent density $<1\text{g} / \text{cm}^3$, sandy loam texture, slightly acidic and medium content of M.O. The horizons (C) apparent density and pH increased lower content of organic matter and free texture. In the lower part an edaphic profile of the Ap / Bt / C type was identified. In the horizon (Ap) the apparent density $> 1\text{g} / \text{cm}^3$, sandy loam texture, slightly acidic and average organic matter content. And in the horizons (Bt) and (C) the bulk density increased as did the pH, free texture and low organic matter content. In the second phase infiltration tests were performed using the double-ring infiltrater. In the third phase the GPR was transited by the transects of the terrain. In the upper part the radargrams presented continuous layers in, followed by concave curves indicating the presence of rocks. The rate of infiltration was lower than in the lower part, presenting moderate permeability. In the lower part the radargram showed continuous parallel lines at different depths, indicating absence of stone in the profile. The permeability in this part was relatively rapid.

Key Words:

- **SOILS**
- **GEORADAR**
- **INFILTRATION**
- **PERMEABILITY**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 El problema

El uso de equipos como el radar de penetración necesitan de un conocimiento previo acerca de la forma en la que actúa la acción de la señal electromagnética a través del suelo, lo cual implica la comprensión de factores como las características físicas-químicas y el análisis del perfil del suelo, que son determinantes al generar el eco por el equipo.

1.1.2 Las causas

La falta de estudios sobre el funcionamiento del radar de penetración en suelos agrícolas limita su utilización. En la actualidad los análisis de suelo se realizan en laboratorio, lo que lleva a un mayor tiempo de espera hasta obtener los resultados.

1.1.3 Los efectos

Debido a la falta de información sobre el manejo del radar de penetración, se produce una limitación del uso del equipo en estudios no destructivos del perfil del suelo agrícola, lo cual facilitaría la comprensión de las características del suelo determinantes para el desarrollo de un cultivo.

1.2 Antecedentes

El fundamento de la agricultura de precisión se basa en poder manejar la variabilidad, que puede ser natural como la topografía, génesis del suelo o inducida como el manejo de la fertilidad, riego, etc (Echeverría, 2015). La agricultura de precisión maneja de forma específica un área de cultivo, para ello se utilizan herramientas tecnológicas de las comunicaciones como: los sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), monitores de rendimiento, monitores de siembra,

banderilleros satelitales, sensores remotos, teledetección aérea, teledetección satelital y telemetría (Narvaez, 2008).

El ground penetration radar (GPR) es un equipo que permite realizar una prospección geofísica sub superficial y emplear técnicas de teledetección que se fundamenta en la emisión de un pulso electromagnético de corta duración a través del suelo. El GPR genera una imagen bidimensional del suelo denominada radargrama o eco del radar de penetración (Lorenzo, Pérez, Novo, & Arnesto, 2010).

Las características del suelo agrícola son determinadas en un laboratorio mediante pruebas que implican un tiempo de espera hasta la entrega de los resultados. Es por ello que el presente estudio encontró una relación indirecta entre la permeabilidad del suelo y el eco generado por un radar de penetración. Lo que permite el uso del GPR como una herramienta para analizar visualmente el perfil del suelo de una forma no destructiva.

El presente proyecto de tesis formo parte del proyecto de investigación titulado: Evaluación de la nutrición y crecimiento de *Pennisetum clandestinum* por medio de espectrorradiometría. El estudio fue financiado por la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE y contó con el apoyo de los científicos del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).

1.3 Justificación

El GPR es un equipo que utiliza ondas electromagnéticas a través de un medio conductivo para generar un radargrama. El radargrama grafica trazas de acuerdo a la intensidad de la señal, que es determinada por el material que atraviese, para ser receptada por una antena (Zapata, 2016). Dado que el suelo es un medio conductivo y su importancia en la agricultura se identificó las características morfológicas, físicas, químicas de este donde fue asociado a una imagen bidimensional. Además se obtuvo información básica del uso del equipo en suelos agrícolas. Dicha información se aprovechó para conocer si el equipo GPR arroja resultados de acuerdo a las características físicas analizadas en campo y en el laboratorio. El presente

estudio contó con el apoyo científico del Instituto Espacial Ecuatoriano que facilitó los equipos. Los resultados obtenidos de la investigación permitieron apoyar al uso de tecnología en la agricultura, para generar desarrollo sostenible y sustentable en cultivos de importancia económica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la relación entre la permeabilidad del suelo y el eco generado por un radar de penetración.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el perfil suelo a través de seis calicatas y determinar la velocidad de infiltración en estos puntos.
- Determinar en laboratorio las principales características físicas y químicas de los horizontes del suelo: materia orgánica, textura, densidad aparente, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica.
- Obtener los radargramas del perfil del suelo mediante recorridos con el radar de penetración (GPR) modelo MALA ProEx.

1.5 Hipótesis

H₀: Existe una relación entre la permeabilidad del suelo y las características del perfil con el eco medido por el radar de penetración.

H₁: No existe una relación entre la permeabilidad del suelo y las características del perfil con el eco medido por el radar de penetración.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Radar de penetración en tierra (GPR)

El radar de penetración en tierra (GPR) o georadar, es un sistema electromagnético para el estudio no destructivo del subsuelo (Gómez, 2008).

El radar de penetración tiene los siguientes componentes:

a) Unidad central: es aquella que controla los tiempos de envío de señales electromagnéticas, por una antena emisora la cual recibe dichas señales y genera un radargrama.

b) Antena: el equipo está provisto de una antena blindada de 250 MHz de frecuencia. La antena es emisora y se encarga de transformar los impulsos eléctricos, que recibe la unidad central en ondas electromagnéticas de corta duración, las cuales penetran en el medio de estudio. Mientras que la función de la antena receptora es captar la energía reflejada para transformar a pulsos eléctricos que envía la unidad central.

d) Ordenador: tiene incorporado un software denominado RadExplorer que registra la señal electromagnética, la procesa y permite una representación gráfica conocida como radargrama en tiempo real.

2.1.1 Fundamentos del radar de penetración

Es un método de prospección geofísica que se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de escasa duración (1 a 20 ns) al suelo, mediante una antena emisora de frecuencia variable de acuerdo a la profundidad de investigación deseada (Basalto, 2009).

La emisión y recepción de los pulsos toma un determinado tiempo, en función de la composición de los materiales del suelo. El suelo es un medio electromagnético y se lo puede caracterizar mediante la conductividad (σ), que representa la capacidad del material para conducir corriente eléctrica, la permitividad dieléctrica (ϵ), proporciona una medida de la propensión del

material a polarizarse en presencia de un campo eléctrico, y la permeabilidad magnética (μ), representa la susceptibilidad del suelo a magnetizarse en presencia de un campo magnético (Nassim, 2008).

2.1.2 Principios de los radargramas

El GPR emite ondas electromagnéticas al suelo en forma de pulsos, causando reflexiones, las cuales serán receptadas por la antena y digitalizadas por el sistema conformando una señal que se denomina traza. Las diferentes trazas se representan secuencial y verticalmente en el plano, de forma que en el eje horizontal de la representación se muestra el punto espacial. Mientras que el eje vertical se representa la profundidad de exploración (Gómez, 2008).

2.1.3 Profundidad de la señal del GPR en el suelo

La profundidad de penetración depende de las condiciones del suelo y la antena empleada. Mientras más conductivo sea el suelo más se reduce la profundidad de penetración. En suelos arcillosos saturados puede que la señal no penetre más de dos metros, en cambio en suelos arenosos poco húmedos la señal puede penetrar hasta los cinco metros (Basalto, 2009). La profundidad que puede alcanzar la señal, está en función del tipo de antena.

Las condiciones del subsuelo pueden varían según el contenido de agua o de las condiciones atmosféricas. Los suelos arenosos secos y con poca sal presentan una buena profundidad de penetración. Mientras que en suelos fangosos que contienen agua salada son muy difíciles de penetrar con el georadar.

2.1.4 Software Rad Explorer

De acuerdo a Ramírez (2016), las partes principales del software son: menú, barra de herramientas, ventana de visualización, procesos, visualización de parámetros, flujo y modelo.

El menú permite tener acceso a las principales funciones para trabajar con carpetas, ediciones, vista, pick e imprimir. Es decir, aquí se podrá abrir, editar, guardar, cerrar y definir una geometría. Una de las más notables es la opción picks con la que se podrá crear puntos o líneas y darles formato

La barra de herramientas cuenta con opciones que permiten editar y visualizar las trazas del radargrama, además de guardar el archivo de acuerdo al formato establecido. La ventana de visualización permite aplicar filtros y procesos con el fin de mejorar la observación y la posterior interpretación de datos. Mientras que los procesos, flujo y modelo sirven para mejorar la resolución de las ondas electromagnéticas que el georadar muestra. En procesos se pueden encontrar flitros con sus determinadas aplicaciones como eliminar componentes, establecer el punto cero de partida de las ondas electromagnéticas, aplicar correcciones a la amplitud de las ondas y aumentar la resolución. Mientras que en la herramienta visualización permite mejorar la resolución del radargrama.

2.2 Movimiento del agua en el suelo

La infiltración designa el proceso de entrada de agua, generalmente vertical, en el suelo desde la superficie, lo que constituye la primera etapa en el movimiento del agua. Cuando se inicia la lluvia sobre un suelo seco, la entrada de agua en el mismo tiene lugar en condiciones no saturadas. En los casos en que la lluvia se prolongue, llega un momento en que el suelo no es capaz de infiltrar toda el agua que recibe, se produce por tanto escorrentía y el flujo de agua que tiene lugar en el suelo se produce en condiciones saturadas. Por lo que el estudio de la infiltración permite valorar la conductividad hidráulica del suelo (Blanco, 2000).

2.2.1 Infiltración

Infiltración se refiere al proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo y queda retenida por él, o alcanza un nivel acuífero, incrementando el volumen de este. La capacidad de infiltración de un suelo es la tasa máxima a la cual el suelo en una condición dada puede absorber

la lluvia caída. Mientras que la capacidad inicial de infiltración se da al inicio de una precipitación. La capacidad mínima de infiltración es la tasa de infiltración alcanzada cuando el perfil del suelo se satura; es aproximadamente igual a la conductividad hidráulica a saturación, y en muchos casos también se conoce con el nombre de permeabilidad (Gisbert, Ibáñez, & Moreno, 2011).

2.2.2 Velocidad de infiltración

De acuerdo a Duque (2009), la velocidad de penetración del agua en el suelo es mayor cuando está seco y disminuye si está saturado. Si el aporte de agua es permanente y prolongado, llega un momento en que la velocidad se hace constante, a ésta se la denomina velocidad de infiltración. En un ensayo en campo también se la conoce como velocidad final (v_f) y se mide en cm/h. La velocidad de infiltración de los suelos puede encontrarse entre dos límites: muy permeable ($v > 7.5 \text{ cm/h}$) a muy impermeable ($v > 0.5 \text{ cm/h}$).

2.2.3 Conductividad hidráulica (K)

De acuerdo a Blanco (2000), la conductividad hidráulica expresa la aptitud de un medio poroso como es el suelo para transmitir agua y se distinguen dos tipos, saturado y no saturado. Se han realizado estudios experimentales del flujo de agua en un medio poroso, dando lugar a una serie de leyes que describen el flujo del agua en condiciones de saturación. La ley de Darcy relaciona el caudal que atraviesa una muestra de material poroso con la sección de la muestra y el gradiente hidráulico existente entre el punto de inicio del recorrido y el punto final según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{dh}{dl} k * A$$

Dónde:

k= constante de proporcionalidad

A= sección de la muestra

$d_h / d_l =$ gradiente hidráulico o piezómetro

$d_h =$ diferencia de la altura del agua entre el inicio y el final del recorrido

$d_l =$ distancia recorrida

Darcy indicó que k es una constante que es característica del material y la denominó permeabilidad. También conocida como conductividad hidráulica puesto que depende del fluido y sus características según la siguiente expresión:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu}$$

Dónde:

$K =$ constante de Darcy

$k =$ permeabilidad intrínseca

$\gamma =$ peso específico del fluido

$\mu =$ viscosidad dinámica del fluido

La permeabilidad (k) del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo de agua a través de éste durante un período determinado. Generalmente se expresa como una tasa de permeabilidad en centímetros por hora. Y se encuentra entre dos límites: muy lenta (< 0.15 cm/h) a muy rápida (> 25 cm/h) (González, 2009).

2.2.4 Métodos de medición de la permeabilidad

Los métodos que miden el coeficiente de permeabilidad se consideran como directos, mientras que los métodos que proporcionan el valor del coeficiente de permeabilidad en forma secundaria son indirectos. Los métodos directos son: permeámetro de carga constante, permeámetro de carga variable, prueba directa *in situ* en los suelos. De acuerdo a American Society for Testing and Materials (ASTM) el infiltrómetro de doble anillo es

un método directo *in situ* que mide la tasa de infiltración de agua en el suelo (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

2.2.5 Infiltrómetro de doble anillo

Es un instrumento utilizado para determinar la infiltración del agua en el suelo, el método se fundamenta en el uso de dos anillos, el anillo exterior al contener agua va a impedir que el agua del anillo interior fluya en sentido horizontal, lo cual causaría errores en la determinación de la infiltración por lo que se supone un flujo de agua en sentido vertical (Ibañez, Moreno, & Blanquer, 2010).

2.2.6 Prueba de fenolftaleína

De acuerdo a la FAO (2009), las características ándicas se pueden identificar en campo usando la prueba con fenolftaleína y fluoruro de sodio (NaF), ya que indica presencia de abundante productos alofánicos ó complejos alumínicos. El método depende que los iones fluorados que absorben al aluminio, con una subsiguiente liberación de de iones OH^- . Según el tiempo de reacción en cambiar a color rosado se estima como: muy fuerte cambia a color rosado en 15 segundos, fuerte cambia a color rosado en 30 segundos, ligera cambia a color rosado en 45 segundos y sin coloración en más de 45 segundos.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del lugar de investigación

El presente estudio se llevó a cabo en el campus “Hacienda El Prado”, perteneciente a la Carrera de Ingeniería Agropecuaria-IASA I (ver figura 1). En este campus se realizaron pruebas de campo en un terreno de una hectárea y pruebas en el laboratorio de suelos de la carrera. Los datos fueron procesados en el Instituto Espacial Ecuatoriano.



Figura 1 Ubicación del terreno

3.1.1 Ubicación Política

Provincia: Pichincha.
Cantón: Rumiñahui.
Parroquia: San Fernando

3.1.2 Ubicación Geográfica

Longitud: 78° 24' 44"
Latitud: 0° 23' 20"
Altitud: 2750 msnm

3.1.3 Caracterización Climática y Ecológica

La zona de investigación se caracteriza climática y ecológicamente de acuerdo a los siguientes parámetros registrados en la estación, Meteorológica del IASA I:

Precipitación media anual: 1285 mm.
Temperatura media anual: 14 °C.
Humedad relativa: 69%.
Piso altitudinal: Montano bajo.
Región latitudinal: Templada.
Zona de vida: Bosque húmedo.
Clasificación bioclimática: Húmedo-templado.
Provincia de humedad: Húmedo.

3.2 Materiales

3.2.1 De campo

Georadar modelo MALA ProEX con el software Rad Explorer, infiltrómetro de doble anillo, baldes con agua, plástico, cinta métrica, escalímetro, nivel de burbuja, combo, fundas plásticas, espátula, GPS, cronómetro, libreta de campo.

3.2.2 De laboratorio

Mandil, guantes, agitador, balanza analítica, frascos de plástico, bureta, espátula, papel filtro, pipeta, matraz kitazato, piceta con agua destilada, bomba de vacío, probeta, potenciómetro, varillas de vidrio o de plástico, vaso de precipitación, densímetro de Bouyoucos, batidora eléctrica, estufa, crisoles o cápsulas de porcelana, mufla y tamizador.

3.3 Métodos

3.3.1 Preparación del terreno

Se seleccionó un área de terreno, que inicialmente fue un pastizal de quikuyo (*Pennisetum clandestinum*). En el mes de febrero (2017) se labró con arado de disco y se dejó descomponer el material vegetal por 15 días, posteriormente se incorporó los restos vegetales mediante el uso de tractor con rastra. Con una estación total se trazaron cinco transectos de un metro de ancho (ver figura 2).

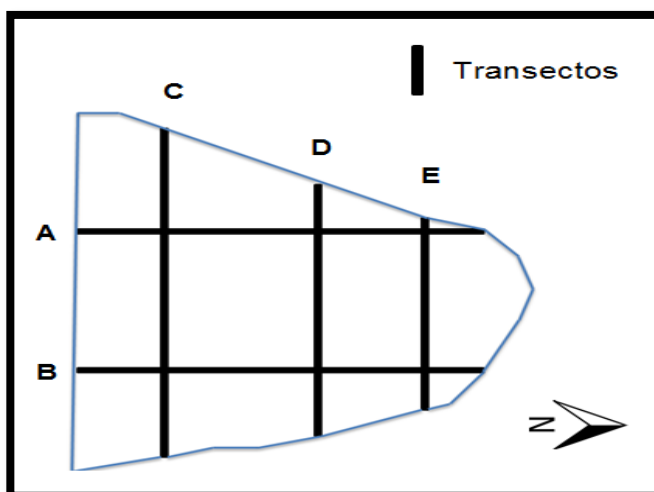


Figura 2 Transectos para el GPR

3.3.2 Caracterización de suelos

Para la descripción morfológica y física de los perfiles del suelo se realizaron seis calicatas con las siguientes medidas: dos metros de largo, uno de ancho y de profundidad variable en cada calicata, debido a la

presencia de cangahua y roca. En la parte alta, media y baja del terreno se realizó dos calicatas (ver figura 3). Los perfiles fueron descritos empleando la metodología de descripción de rutina, de acuerdo a la FAO (2009). Las características físicas determinadas en cada horizonte fueron: color, textura, estructura, profundidad del horizonte, consistencia, porosidad, distribución de raíces y límite.

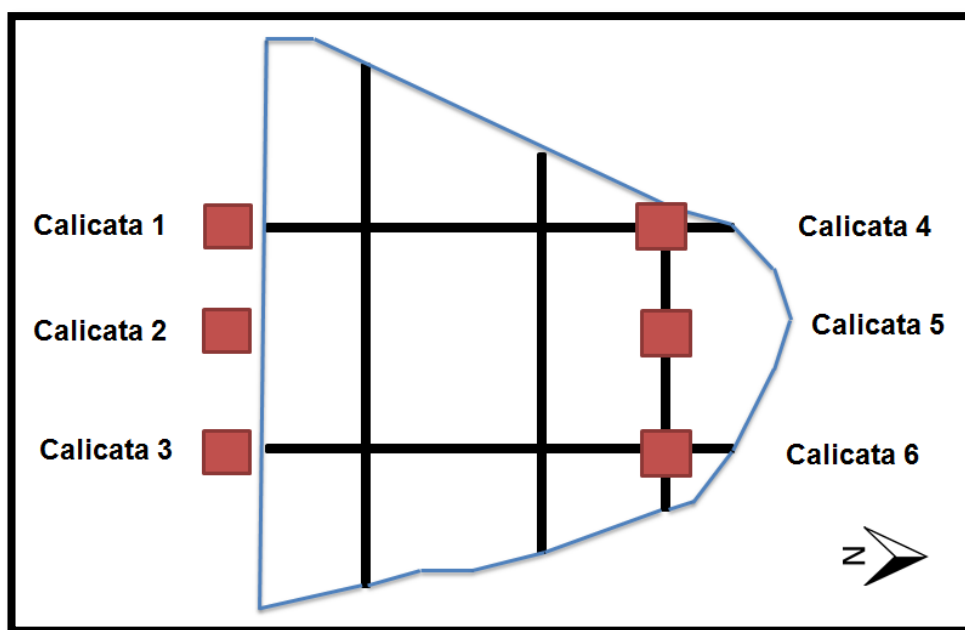


Figura 3 Ubicación de las calicatas en el terreno

3.3.3 Determinación de la velocidad de infiltración

Para determinar los sitios donde se realizó la prueba de velocidad de infiltración, se usó el mapa de curvas de nivel del terreno (ver figura 4).

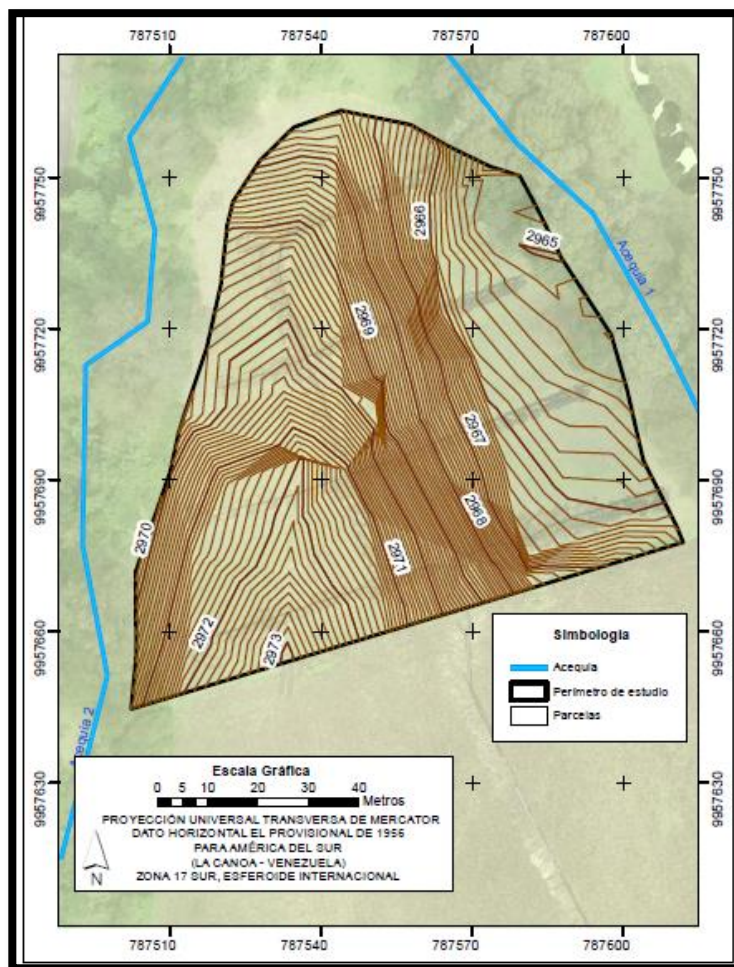


Figura 4 Mapa de curvas de nivel del terreno

Los sitios seleccionados fueron junto a las calicatas, se procedió a limpiar de hierbas y piedras. Para instalar en el terreno los dos cilindros concéntricos de acero, huecos en el centro, con medidas de 40 cm de alto, de 30 y 45 cm de diámetro respectivamente. Posteriormente con una placa de acero colocada sobre los anillos se golpeó hasta una profundidad de 10 cm, verificando que los cilindros queden a nivel. Después de instalados los anillos se llenó con agua el anillo exterior, luego el anillo interior con un plástico lo más adherido posible a las paredes, se vierte agua hasta que se llene el plástico. Luego se retira rápidamente el plástico y se mide la altura del nivel del agua, con la ayuda de una cinta métrica adherida a la pared del anillo interno. La prueba se inicia con la lectura del nivel del agua y con un cronometro se toma el tiempo. Se tomó lecturas a intervalos de 5, 10 y 20

minutos. El agua fue agregada en los anillos conforme se requirió. Después de cuatro horas cuando el nivel de agua varió ligeramente la prueba terminó (ver figura 5) (Cisneros, 2003).



Figura 5 Prueba de velocidad de infiltración

De acuerdo a Cisneros (2013), para determinar la velocidad de infiltración calculada se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{velocidad de infiltración } \left(\frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{diferencia de lecturas} * 60}{\text{intervalo entre lecturas}}$$

Se graficó en el eje de las abscisas el tiempo acumulado en (min) y en las ordenadas la velocidad de infiltración calculada (cm/h). El comportamiento fue de tipo exponencial como indica el modelo de Kostiakov-Lewis:

$$(I = kt^n)$$

Para obtener los coeficientes k y n del modelo, se usó el método de regresión lineal simple. Para lo cual se aplicó logaritmos a ambos términos de esta forma se obtuvo:

$$\log I = \log k + n \log t$$

Que corresponde a una ecuación del tipo de una recta:

$$Y = b_0 + b_1 X$$

Entonces:

$Y = \log I$; $Y = \text{velocidad de infiltración}$

$X = \log t$; $X = \text{tiempo}$

$b_1 = n$

$b_0 = \log k$

Mediante las siguientes ecuaciones se calculó:

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n} \text{ y } \bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}.$$

También se calculó b_1 mediante:

$$b_1 = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}.$$

Y de la ecuación:

$$\bar{Y} = b_0 + b_1 \bar{X} \text{ , se despejo: } b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}$$

Mientras que para calcular k , sabemos que:

$$b_0 = \log k \text{ , entonces se obtuvo } k = \text{antilog } b_0.$$

De esta forma se determinó la velocidad de infiltración ajustada. Al final se obtuvo un modelo de Kostiakov-Lewis, para cada prueba. Se usó el factor de correlación entre los datos de velocidad de infiltración calculada vs la infiltración ajustada.

$$r = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sqrt{(\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n})(\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n})}}$$

Con los resultados de la velocidad de infiltración calculada y ajustada se relacionó la tasa de permeabilidad a partir de los 60 minutos de la prueba.

3.3.4 Uso del equipo (GPR) o radar de penetración

Para los recorridos con el GPR, el equipo fue configurado para que la señal electromagnética alcance tres metros de profundidad, a una velocidad

de la señal electromagnética de 80 m/ μ s (Ramírez, 2016). Se realizaron los siguientes recorridos (ver figura 6).

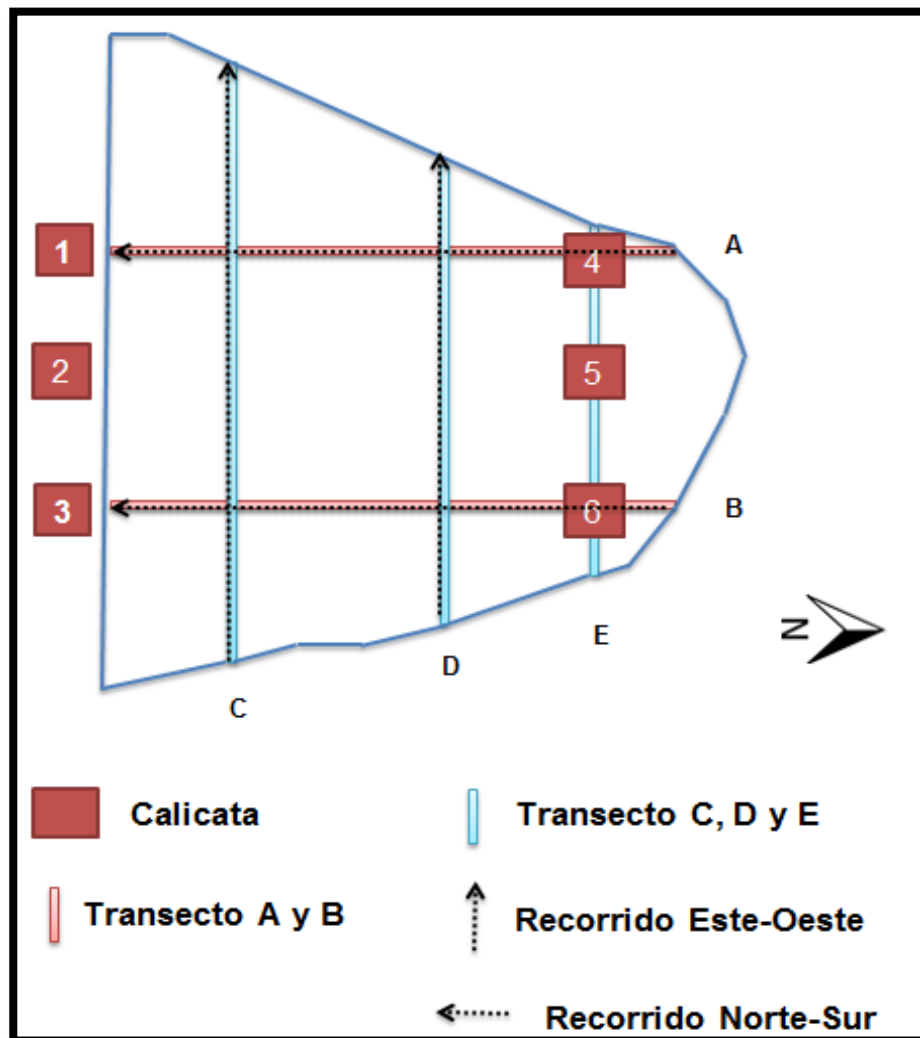


Figura 6 Recorridos del GPR en el terreno

3.3.5 Determinación de la densidad aparente

Para determinar la densidad aparente se usó el método del cilindro, el cual indica que se debe tomar muestras de cada horizonte del perfil con un cilindro de volumen conocido (98 cm³) (figura 7). Luego se dejó secar las muestras a 105 °C por 48 horas para obtener el peso seco. La densidad aparente sirve para conocer el espacio poroso, clasificar los suelos orgánicos y derivados de cenizas volcánicas (Areválo & Gauggel, 2006). Se calculó la densidad aparente con la siguiente fórmula:

$$d_{ap} = \frac{\text{peso suelo eco}}{\text{volumen del cilindro}}$$



Figura 7 Método del cilindro

3.3.6 Determinación de la humedad

Las muestras de suelo fueron tomadas en zig-zag de la capa arable del suelo, en total 20 muestras de 0,5 kilogramos de suelo en toda el área. Luego en el laboratorio se determinó el peso del suelo húmedo y se procedió a secar las muestras en la estufa por un lapso de 48 horas a 105 °C para determinar el peso seco del suelo (figura 8). Entonces se calculó el porcentaje de humedad del suelo mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad del suelo} = \frac{\text{peso de suelo húmedo} - \text{peso de suelo seco}}{\text{peso suelo seco}} \times 100$$



Figura 8 Toma de peso

3.3.7 Análisis químico y físico

Se tomó 1kg de suelo de cada horizonte, se etiquetaron y fueron llevadas a los laboratorios. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente para luego ser molidas y pasadas por un tamiz de dos milímetros. Entonces se procedió con las siguientes pruebas.

3.3.8 Potencial de hidrógeno

Para medir el pH en las muestras del suelo se consideró lo siguiente:

a) Reactivos: Agua destilada y solución buffer de pH 7 y 4.

b) Procedimiento: se inició calibrando el potenciómetro con las soluciones buffer. Luego se usó suelo que fue previamente secado en una relación 2:1 con agua. En el sobrenadante se determinó el valor del pH – H₂O con el equipo.

3.3.9 Conductividad eléctrica

Para medir la conductividad eléctrica CE se consideró lo siguiente:

a) Reactivos: soluciones KCl, 0.1 N y 0.01 N.

b) Procedimiento: el potenciómetro fue calibrado con las siguientes soluciones KCl, 0.1 N y 0.01 N, luego se usaron muestras de suelo secadas previamente a una relación de 2:1 con agua, entonces se procedió a tomar la medida en la solución (Villafañe, 2000).

3.3.10 Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo se usó el método de Bouyoucos y se realizó el siguiente procedimiento:

a) Reactivos: hexametáfosfato de sodio

b) Procedimiento: inicialmente se eliminó la materia orgánica del suelo, mediante el secado por 48 horas a 75 °C, luego en una mufla se secó el suelo a 120 °C por cinco horas. Se procedió a pesar el suelo para ponerlo nuevamente en una mufla a 350 °C por cuatro horas. Entonces el suelo

resultante ya no contiene materia orgánica y se procedió a usar 100 gramos del suelo en una probeta que previamente se llenará con 900 ml de agua destilada y será aforada hasta los 1000ml. La probeta también contenía hexametáfosfato de sodio que permite que las partículas de suelo se separen.



Figura 9 Textura por el método de Bouyoucus

Luego se procedió a tapar la probeta con la palma de la mano para invertir por dos o tres veces para que el suelo se mezcle. Se encajó el densímetro de Bouyoucus en la probeta y se dejó reposar sobre la mesa. La primera lectura se tomó a los 40 segundos, la segunda lectura se tomó a las 2 horas (figura 9). De acuerdo al porcentaje de arcilla, limo y arena que presentó se identificó la textura del suelo (Pantoja, 2014).

3.3.11 Materia orgánica

De acuerdo a Zagal & Sadzawka (2007) para determinar la cantidad de materia orgánica se consideró lo siguiente:

a) Procedimiento: para determinar la MO se usó suelo secado 75 °C por 48 horas. Luego se procede a secarlo en una mufla a 120 °C por cinco horas. Se realizó el primer pesado ya que contiene materia orgánica aún, luego se somete a este suelo en una mufla a un rango de temperatura de 350 °C a 500°C por cuatro a seis horas (figura 10). Nuevamente se pesó el suelo resultante para realizar una resta entre el primer peso y el segundo, lo cual indicará la cantidad de materia orgánica presente en la muestra.



Figura 10 Método de ignición para materia orgánica

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Descripción de horizontes en campo

Para la descripción en campo de los perfiles se identificó que la zona estudiada pertenece al régimen de temperatura del suelo isotérmico caracterizado por presentar una temperatura entre 13 y 22°C y en régimen de humedad údico, que nos indica que el suelo no está seco en todo el perfil más de tres meses consecutivos la mayoría de los años (Buol, Hole, & McCracken, 1991).

4.1.2 Perfil 1



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 18 cm, color principal en húmedo 10YR2/1; textura de campo franco arenoso; estructura de tipo granular de tamaño finos/muy finos y de grado fuerte, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños finos y de abundancia muchos; las raíces son: media-muchas; actividad biológica

común del tipo canales de lombrices de insectos; fragmentos gruesos del tipo de grava media, ligera reacción al NaF, reacción al agua oxigenada fuerte, sin presencia de carbonatos, presencia de vidrio volcánico y el límite de distinción es gradual y topografía ondulado.

Horizonte A: profundidad de 18 a 30 cm, color principal en húmedo 10YR3/2; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño medio, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arenoso; estructura de tipo sub-angular de tamaño medios/grueso y de grado moderado, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia común; las raíces son: finas-común; fragmentos gruesos del tipo de grava media, sin reacción al NaF, reacción moderada al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es claro y topografía ondulado.

Horizonte Cq: profundidad de 30 a 70 cm, color principal en húmedo 10YR4/3; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño medio, contraste prominente y límite agudo; textura de campo arena franca; estructura de tipo masiva; suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado no adherente y no plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia común; las raíces ninguna; fragmentos gruesos del tipo de grava gruesa, sin reacción al NaF, reacción ligera al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos.

4.1.3 Perfil 2



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 20 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia muy pocos, tamaño medio, contraste débil y límite claro; textura de campo franco arenoso; estructura de tipo granular a bloques sub-angulares, de tamaño finos y de grado fuerte, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños finos y de abundancia muchos; las raíces son: media-muchas; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, ligera reacción al NaF, reacción al agua oxigenada fuerte, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es abrupto y topografía suave.

Horizonte Cq: profundidad de 20 a 45 cm, color principal en húmedo 10YR3/4; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño medio, contraste prominente y límite claro; textura de campo franco arenoso; estructura de tipo masiva; suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado no adherente y no plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia común; las raíces ninguna; fragmentos

gruesos del tipo de grava gruesa, sin reacción al NaF, reacción ligera al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos.

4.1.4 Perfil 3



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 30 cm, color principal en húmedo 10YR4/4; textura de campo franco; estructura de tipo granular a bloques sub-angulares, de tamaño muy finos y de grado moderado, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia común; las raíces son: finas-muchas; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, reacción al agua oxigenada fuerte, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es gradual y topografía suave.

Horizonte Bt: profundidad de 30 a 70 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; moteado secundario 5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño muy fino, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arcilloso; estructura de tipo sub-angular de tamaño fino/medio y de grado débil, suelo

húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia pocos; las raíces son: finas-común; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, reacción moderada al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es gradual y topografía suave

Horizonte C: profundidad de 70 a 120 cm, color principal en húmedo 10YR2/1; moteado secundario 5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño fino, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arcilloso; estructura de tipo sub-angular de tamaño grueso y de grado débil, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia muy pocos; ninguna raíz; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, sin reacción al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos.

4.1.5 Perfil 4



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 20 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia pocos, tamaño fino, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arenoso; estructura de tipo granular a sub-angular de tamaño fino y de grado fuerte,

suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños finos y de abundancia muchos; las raíces son: medias-muchas; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, reacción fuerte al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es claro y topografía ondulado.

Horizonte Cq: profundidad de 20 a 50 cm, color principal en húmedo 10YR5/4; moteado secundario 7,5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño medio, contraste distinto y límite claro; textura de campo areno francoso; estructura de tipo masiva; suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado no adherente y no plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia común; las raíces pocas-finas; fragmentos gruesos del tipo de grava media, sin reacción al NaF, sin reacción al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos.

4.1.6 Perfil 5



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 20 cm, color principal en húmedo 10YR3/3; textura de campo franco; estructura de tipo granular a bloques sub-angulares, de tamaño finos y de grado fuerte, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a

adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños finos y de abundancia muchas; las raíces son: medias-muchas; fragmentos gruesos del tipo de grava media, sin reacción al NaF, reacción al agua oxigenada fuerte, sin presencia de carbonatos.

4.1.7 Perfil 6



Horizonte Ap: profundidad de 0 a 30 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; textura de campo franco; estructura de tipo granular a bloques sub-angulares, de tamaño muy finos y de grado moderado, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños finos y de abundancia común; las raíces son: finas-muchas; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, reacción al agua oxigenada fuerte, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es gradual y topografía suave.

Horizonte Bt: profundidad de 30 a 70 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; moteado secundario 5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño muy fino, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arcilloso; estructura de tipo sub-angular de tamaño fino/medio y de grado débil, suelo húmedo; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente adherente y ligeramente plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia pocos; las raíces son: finas-común; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, reacción moderada al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos y el límite de distinción es gradual y topografía suave

Horizonte C: profundidad de 70 a 120 cm, color principal en húmedo 10YR2/2; moteado secundario 5 YR 5/8 de abundancia común, tamaño fino, contraste distinto y límite claro; textura de campo franco arcilloso; estructura de tipo bloques angulares y sub-angulares de tamaño grueso y de grado débil, suelo húmedo; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente adherente y plástico; con porosidad del tipo de canales de tamaños muy finos y de abundancia muy pocos; ninguna raíz; fragmentos gruesos del tipo de grava fina, sin reacción al NaF, sin reacción al agua oxigenada, sin presencia de carbonatos.

4.1.8 Análisis físico y químico

Parte alta: el perfil 1 está conformado por los horizontes (Ap), seguido del horizonte (A) caracterizado por la presencia de materia orgánica que está mezclada con la fracción mineral. Con relación al pH, ambos horizontes están en el rango de 5.10 a 6.50 que es considerado como ligeramente ácido. Con un contenido medio de materia orgánica (3-5%), no es un suelo salino (<2 ds/m). Seguido de un horizonte denominado (Cq) caracterizado por la acumulación de sílice, que a partir de los 70 cm está cementada (tabla 1).

Asimismo los perfiles 2 y 4 presentan un horizonte (Ap) con pH ligeramente ácido, contenido medio de materia orgánica y no es un suelo

salino (<2 ds/m), donde subyace un horizonte Cq que está cementado a partir de 45 y 50 cm correspondientemente. Mientras que el perfil 5 está formado únicamente por un horizonte (Ap), donde subyace un horizonte Cq que presenta cementación continua (tabla 1).

En un estudio de rehabilitación de cangahuas se indica que la cangahua es denominada como un horizonte (C). Mientras que en las características químicas en la superficie presenta un pH en un rango de 5.50 a 6.00 y en profundidad un pH de 6.50 a 7.50 considerado como neutro (Perugachi, 2015).

Tabla 1
Propiedades químicas y materia orgánica

Perfil	Profundidad (cm)	Horizonte	pH	C.E (ds/m)	M.O±S (%)
1	0-18	Ap	5,99	0,19	5,24±0,03
1	18-30	A	6,10	0,22	3,80±0,03
1	30-70x	Cq	6,62	0,32	0,88±0,01
2	0-20	Ap	6,03	0,18	5,36±0,04
2	20-45x	Cq	6,65	0,34	1,55±0,02
4	0-20	Ap	5,98	0,18	5,09±0,03
4	20-50x	Cq	6,61	0,33	0,88±0,01
5	0-20x	Ap	6,05	0,21	5,35±0,02

x: presencia de material endurecido o lítico

Los perfiles 1, 2, 4 y 5 presentan en la superficie un horizonte (Ap) con una densidad aparente < 1 g/cm³, de ligera reacción al NaF que se torna rosado en 45 segundos y textura franco arenosa. Sin embargo la densidad aparente va aumentando conforme aumenta la profundidad, sin presentar reacción a la prueba NaF. Mientras que la clase textural se mantiene en franca a partir de los 18cm en el perfil 1 y 20 cm en el perfil 2 y 4 (tabla 2).

Tabla 2
Propiedades físicas y prueba NaF

Perfil	Horizonte	Da (cm/g)	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textural	Prueba NaF
1	Ap	0,98±0,01	64	30	6	FA	L
1	A	1,17±0,03	48	36	16	F	SR
1	C	1,32±0,03	49	34	17	F	SR
2	Ap	0,98±0,01	63	32	5	FA	L
2	C	1,30±0,02	50	33	17	F	SR
4	Ap	0,98±0,02	60	36	4	FA	L
4	C	1,30±0,02	48	34	18	F	SR
5	Ap	0,99±0,01	64	28	8	FA	L

Prueba NaF: L: reacción ligera; SR: sin reacción

La zona estudiada tiene origen de formación sobre cangahuas y presenta características ándicas ($da < 1 \text{ g/cm}^3$ y reacción a la prueba NaF). Mientras que los horizontes endurecidos denominados (C) presentan texturas que van desde franco arcillosas hasta franco arenosas, donde la cantidad de arcilla no superan el 40 %, excepto en horizontes de profundidad. En cuanto a la densidad aparente, en este tipo de suelos esta entre $1,0$ y $1,6 \text{ g/cm}^3$ (Moreno, y otros, 2013).

Parte baja: los perfiles 3 y 6 presentaron un horizonte (Ap) con una profundidad de 30 cm, debido a los procesos de labranza. El pH es ligeramente ácido dentro del rango de 5.10 a 6.50, contenido medio de materia orgánica (3–5%) y no son suelos salinos ($< 2 \text{ ds/m}$). A partir de los 30 cm de profundidad hasta los 70 cm se pudo observar un horizonte argílico denominado (Bt), debido a la presencia de 3% más de arcilla que en la capa suprayacente que contiene 15% de arcilla por acumulación iluvial (Buol, Hole, & McCracken, 1991).

Mientras que el contenido de materia orgánica es medio (3-5%) con un pH que aumenta con referencia al horizonte (Ap) en el rango de 6.60 a 7.30 considerado como neutro. Subyace el horizonte (C) denominado así por ser un material no consolidado que no presenta estructura sin características de los horizontes A ó B. Tiene un bajo contenido de materia orgánica (<3%) y presentó un pH neutro (tabla 3) (Zagal & Sadzawka, 2007).

Tabla 3
Propiedades químicas y materia orgánica

Perfil	Profundidad (cm)	Horizonte	pH	C.E (ds/m)	M.O± S (%)
3	0-30	Ap	6,01	0,16	5,25±0,24
3	30-70	Bt	6,58	0,23	3,61±0,54
3	70-120	C	6,61	0,35	0,70±0,07
6	0-30	Ap	6,10	0,20	5,14±0,12
6	30-70	Bt	6,49	0,22	3,86±0,06
6	70-120	C	6,61	0,34	0,48±0,05

De acuerdo a Perugachi (2015), reporta que el 30 % de los datos correspondientes al pH de las cangahuas está en un rango 7,10 a 8,20 considerado como alcalino. Mientras que el 64 % de los datos presento pH < 7,0 ligeramente ácido y el 6% presentó pH < 6 considerado como ácido. La conductividad eléctrica mostró valores bajos en sales, que corresponden a la clasificación no salina según la escala de Van Hoorn y Van Alphen 1994.

El horizonte (Ap) presente en los perfiles 3 y 6 poseen una clase textural franco arenosa con una densidad aparente de $1,10 \pm 0,04$ y $1,11 \pm 0,01$ g/cm³ correspondientemente. En ambos perfiles subyace un horizonte (Bt) denominado de esta manera por la acumulación iluvial de arcilla, en el cual se presenta más del 3% de arcilla entre el horizonte Ap (15% arcilla) y Bt (18% arcilla) para el perfil 3. Y para el perfil 6 el horizonte Ap (18% arcilla) y horizonte Bt (21% arcilla) (tabla 4) (Buol, Hole, & McCracken, 1991). Los horizontes (Bt) tienen textura franca con una densidad aparente $1,36 \pm 0,01$ g/cm³ para el perfil 3 y $1,30 \pm 0,03$ g/cm³ para el perfil 6. Se denominó horizonte (C) al material no consolidado que no presenta estructura. La

densidad aparente para el perfil 3 es $1,39 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ y para el perfil 6 es $1,39 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ que son superiores a los horizontes Ap y Bt. Mientras que la textura es franca y no se observó reacción a la prueba NaF en los horizontes de ambos perfiles, lo cual indica ausencia de alófanos.

Tabla 4
Propiedades físicas y prueba NaF

Perfil	Horizonte	Da (cm/g)	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textural	Prueba NaF
3	Ap	1,10±0,04	64	21	15	FA	SR
3	Bt	1,36±0,01	47	35	18	F	SR
3	C	1,39±0,02	49	34	17	F	SR
6	Ap	1,11±0,01	69	13	18	FA	SR
6	Bt	1,30±0,03	47	32	21	F	SR
6	C	1,39±0,03	48	34	18	F	SR

Prueba NaF: SR: sin reacción

Dentro del terreno estudiado es característico encontrar un horizonte argílico (Bt) con revestimientos de arcilla en los cutanes, que presentan color pardo muy oscuro, estructura de tipo bloques subangulares, de tamaño medio y grado moderado, además presenta textura franca en la superficie como en la profundidad (Moreno, y otros, 2013).

4.1.9 Velocidad de infiltración

Perfil 1: la velocidad de infiltración ajustada y calculada a partir de los 65 minutos está en el rango de 2.00 a 6.50 cm/h que es considerada en la tasa de permeabilidad como moderada (Cisneros, 2003). El coeficiente de correlación para la velocidad de infiltración calculada vs la velocidad de infiltración ajustada es de $r = -0.82$ (figura 11).

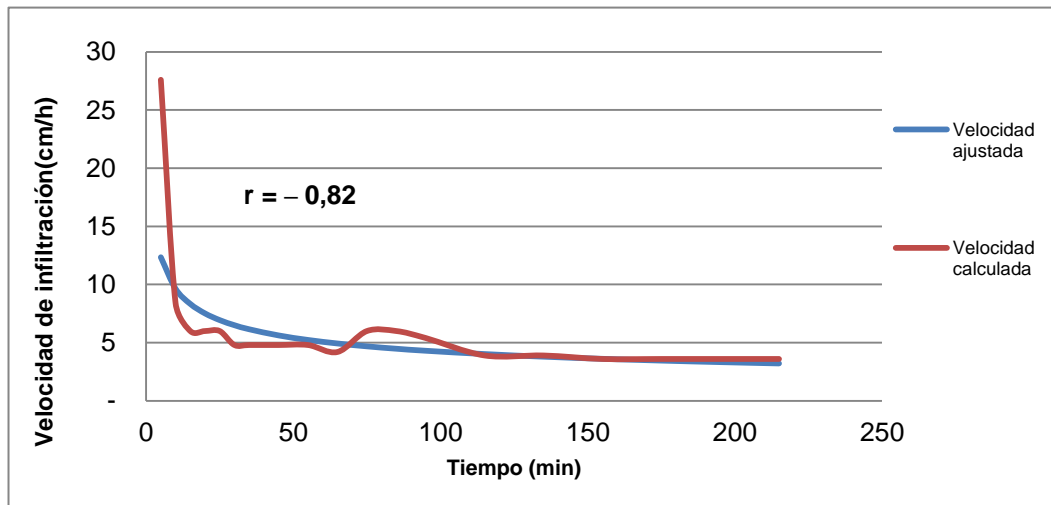


Figura 11 Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 1

Perfil 2: la velocidad de infiltración ajustada a partir de los 65 minutos está en el rango de 1.47 a 2.37 cm/h. Mientras que la velocidad calculada está en un rango de 1.20 a 3.00 cm/h. En la tasa de permeabilidad consideradas como moderada y relativamente lenta (Cisneros, 2003). El coeficiente de correlación para la velocidad de infiltración calculada vs la velocidad de infiltración ajustada es de $r = -0.82$ (figura 12).

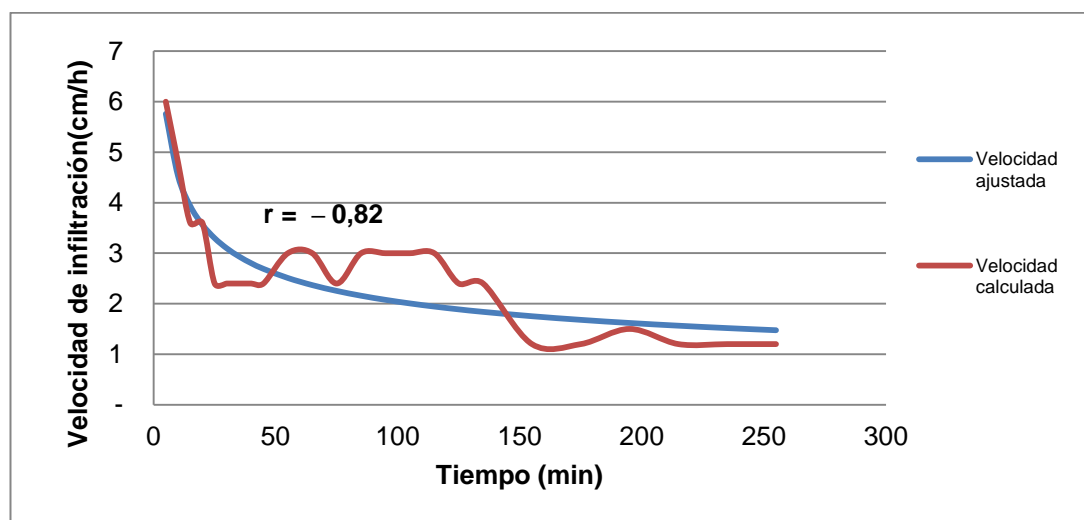


Figura 12 Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 2

Perfil 3: partir de los 60 minutos la velocidad de infiltración ajustada está en un rango de 12.49 a 21.22 cm/h. Mientras que la velocidad de

infiltración calculada se encuentra en un rango de 12 a 24 cm/h, consideradas en la tasa de permeabilidad de relativamente rápida a rápida (Cisneros, 2003). El coeficiente de correlación para la velocidad de infiltración calculada vs la velocidad de infiltración ajustada es de $r = -0.92$ (ver figura 13).

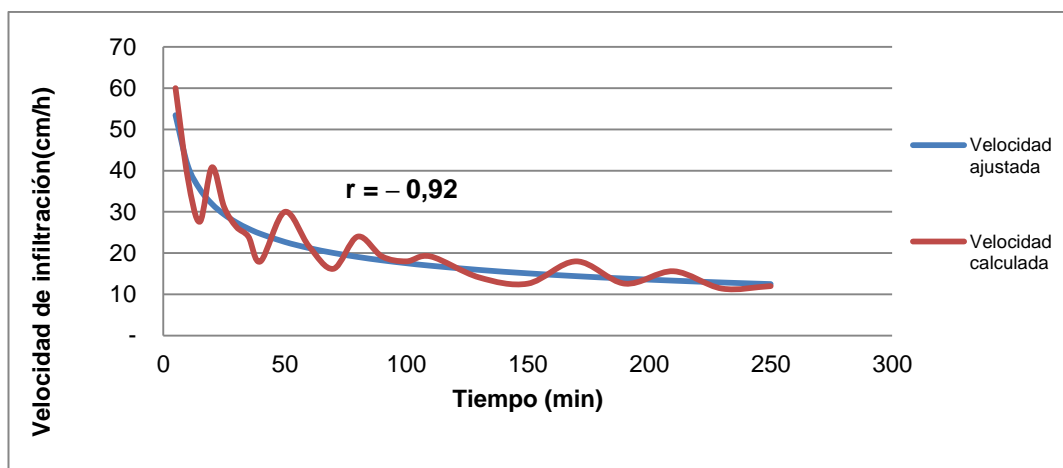


Figura 13 Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 3

Perfil 4: a partir de los 60 minutos, la velocidad de infiltración ajustada está en el rango de 4.56 a 6.84 cm/h y la velocidad de infiltración calculada está en el rango de 6.00 a 6.60 cm/h, consideradas en la tasa de permeabilidad de moderada a relativamente rápida (Cisneros, 2003). Mientras que el coeficiente de correlación para la velocidad de infiltración calculada vs la velocidad de infiltración ajustada es de $r = -0.73$ (ver figura 14).

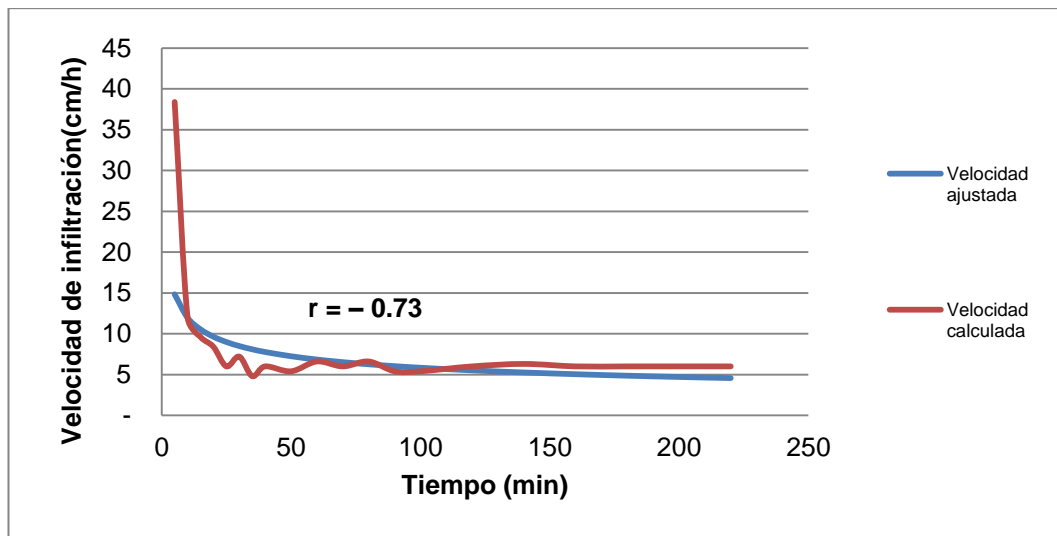


Figura 14 Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 4

Perfil 6: a partir de los 60 minutos la velocidad de infiltración ajustada está en el rango de 6.76 a 11.69 cm/h. Y la velocidad de infiltración calculada está en el rango de 9.30 a 10.80 cm/h, consideradas en la tasa de permeabilidad como relativamente rápidas (Cisneros, 2003). El coeficiente de correlación para la velocidad de infiltración calculada vs la velocidad de infiltración ajustada es de $r = -0.82$ (ver figura 15).

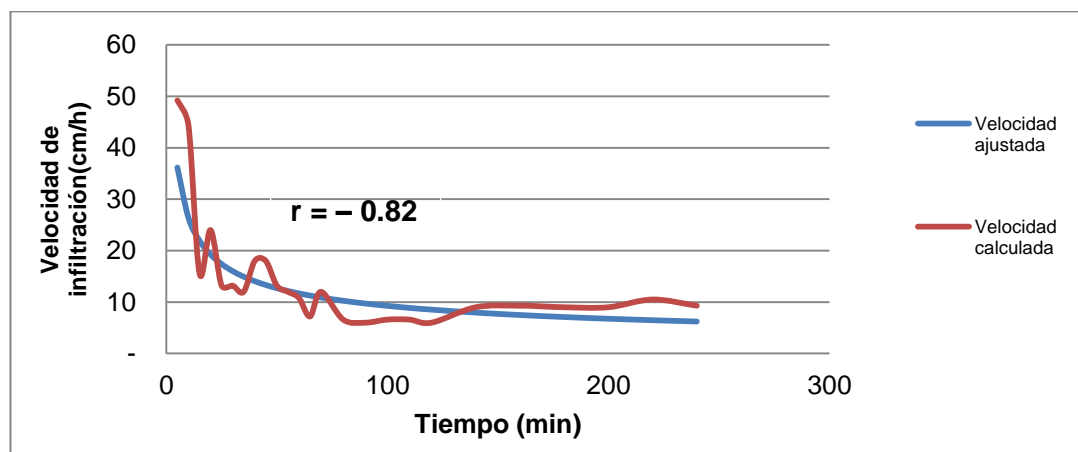


Figura 15 Velocidad ajustada vs velocidad calculada, perfil 6

4.1.10 Permeabilidad del suelo

Los perfiles de la parte alta 1, 2 y 4 presentaron permeabilidad de relativamente lenta a moderada. Y los perfiles 3 y 6 presentaron permeabilidad de relativamente rápida a rápida (ver tabla 5).

Tabla 5
Permeabilidad del suelo

Perfil	Velocidad ajustada (cm/h)	Permeabilidad
1	3,21-4,93	Moderada
2	1,47-2,37	Relativamente lenta
4	4,56-6,84	Moderada
3	12,49-21,22	Rápida
6	6,76-11,69	Relativamente rápida

4.1.11 Radargramas

Transecto A: el GPR se usó en dirección Norte-Sur en una longitud de 90 m, profundidad 3.30 m (ver figura 16). En el radargrama editado del transecto A (ver figura 17), se resalta las trazas de curvas cóncavas en la profundidad y la presencia de capas en la superficie.

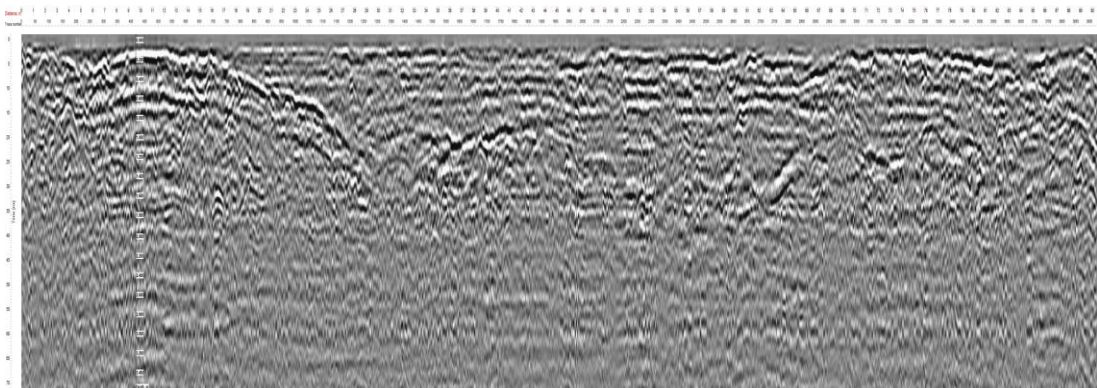


Figura 16 Radargrama del transecto A

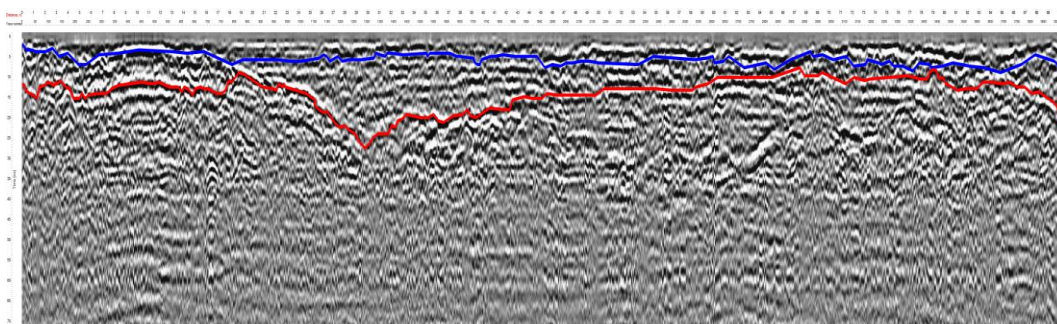


Figura 17 Radargrama editado del transecto A

En los primeros 10 m del radargrama se observa capas a los 20 y 60 cm de profundidad (ver figura 19). En este punto la referencia fue el perfil 4 (ver figura 18), que presentó una profundidad de 50 cm y una permeabilidad moderada. Mientras que al final del recorrido, en el radargrama se mantiene la presencia de capas a los 20 y 60cm (ver figura 21). El perfil 1 fue referencia de este punto (ver figura 20), que indica 70 cm de profundidad y una permeabilidad moderada.

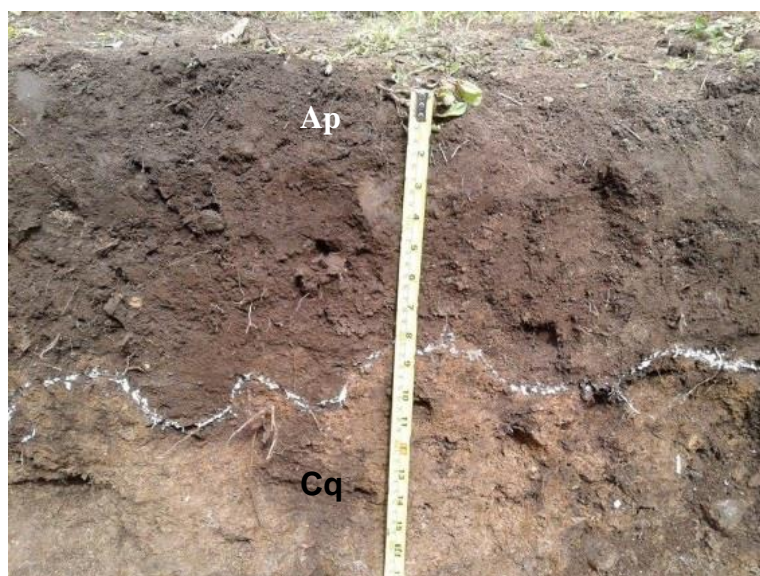


Figura 18 Perfil 4

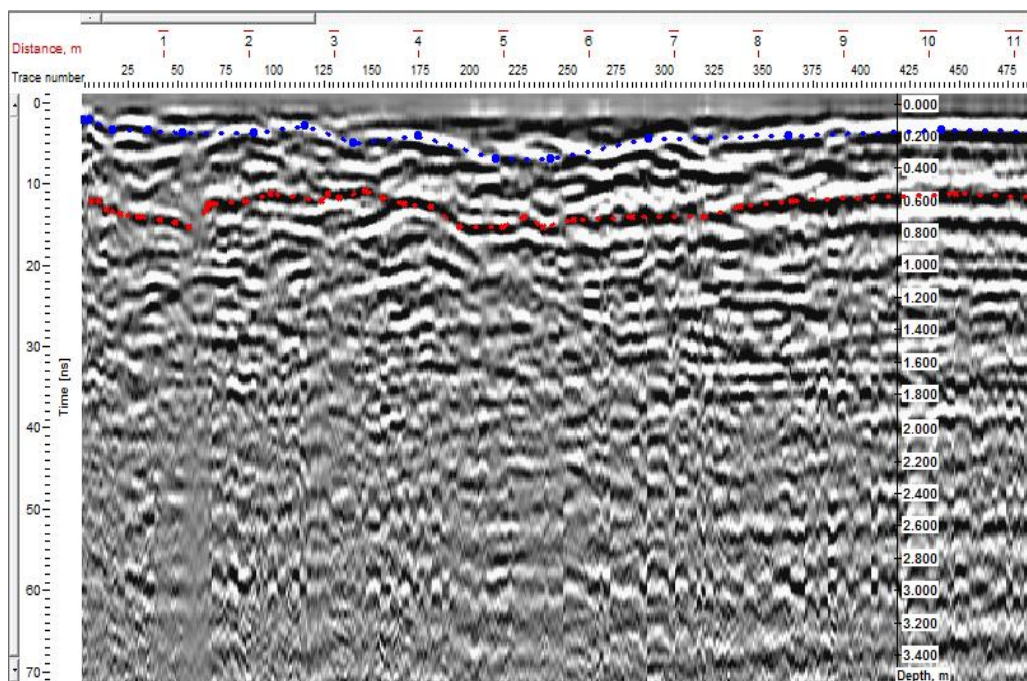


Figura 19 Recorrido inicial del transecto A



Figura 20 Perfil 1

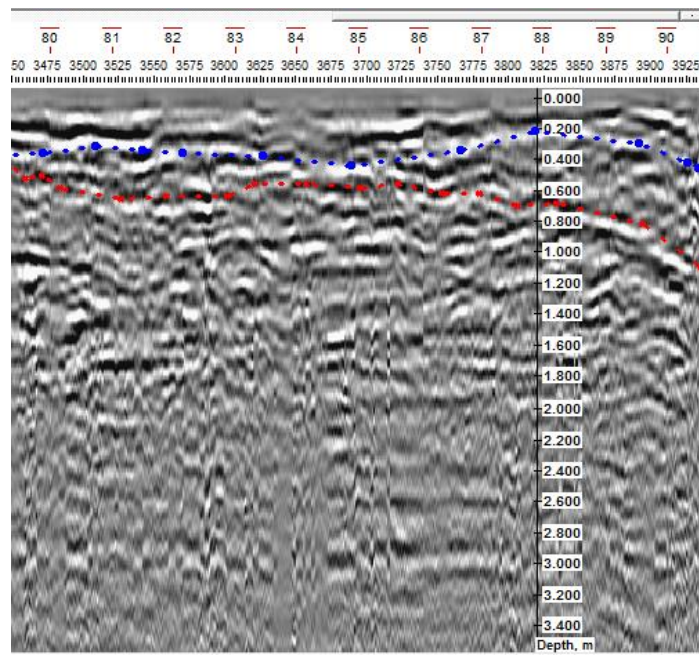


Figura 21 Recorrido final del transecto A

Transecto B: el GPR se usó en dirección Norte-Sur en una longitud de 90 m, profundidad 3.30 m (ver figura 22). En el radargrama editado del transecto B (ver figura 23) se identifica líneas paralelas a diferentes profundidades

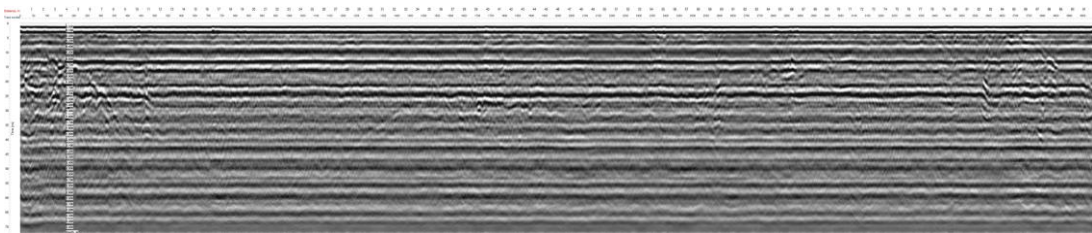


Figura 22 Radargrama del transecto B

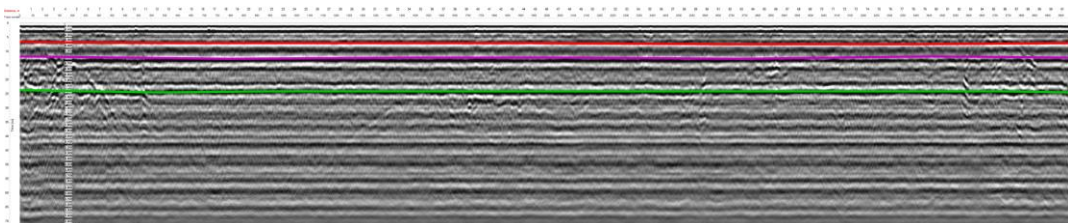


Figura 23 Radargrama editado del transecto B

El radargrama de la parte inicial del recorrido muestra líneas paralelas a los 20, 60 y 120 cm de profundidad. Y en el subsuelo no se observa curvas cóncavas (ver figura 25). En este punto del recorrido se usó como referencia el perfil 6 (figura 24), que tiene una profundidad de 120 cm y una permeabilidad relativamente rápida. El radargrama del final del recorrido también muestra capas a los 20, 60 y 120 cm (ver figura 27). Para este punto la referencia fue el perfil 3 (ver figura 26), donde se observó una profundidad de 120 cm y permeabilidad rápida.

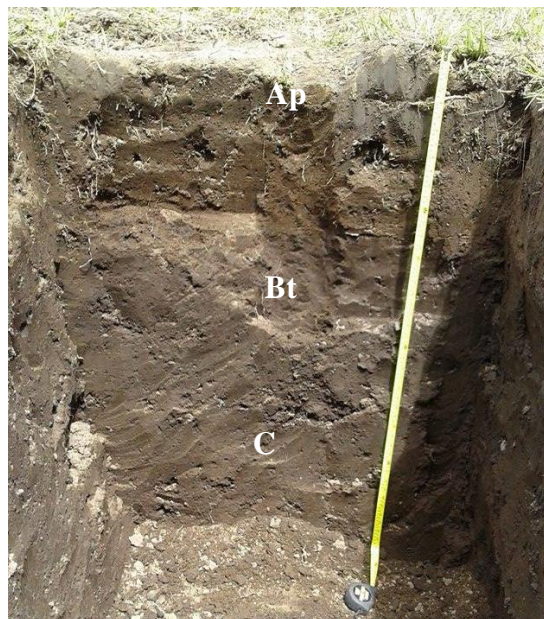


Figura 24 Perfil 6

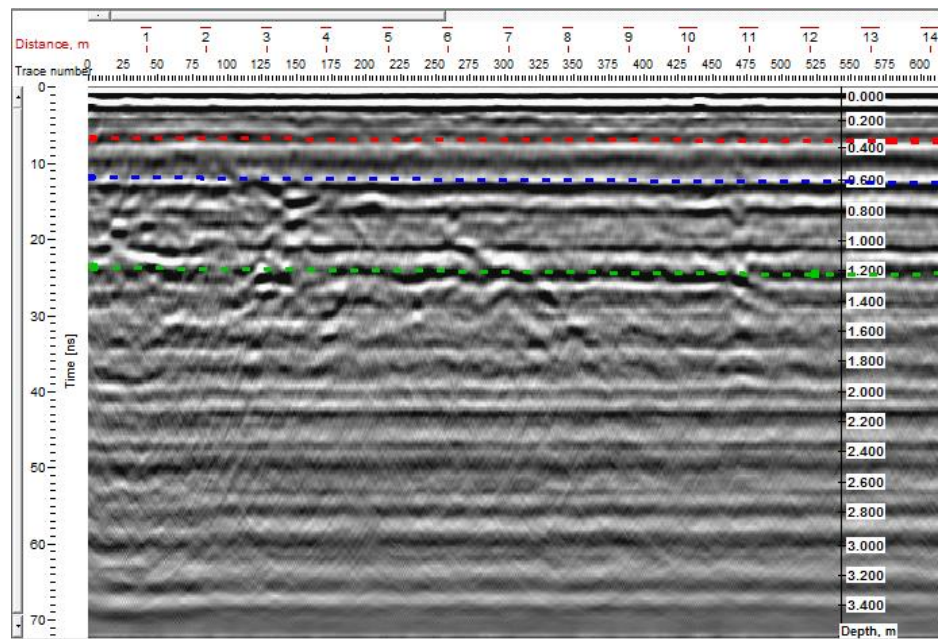


Figura 25 Recorrido inicial del transecto B

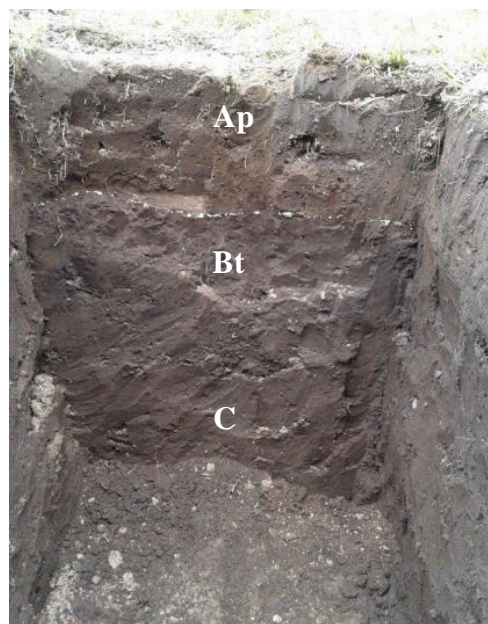


Figura 26 Perfil 3

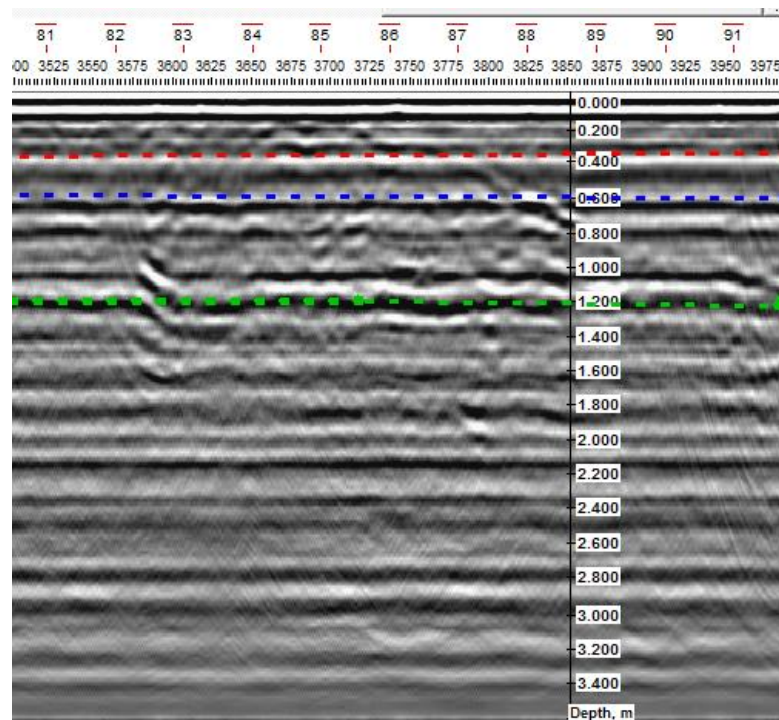


Figura 27 Recorrido final del transecto B

Transecto C: el GPR se usó en dirección Este- Oeste- en una longitud de 78 m, profundidad 3.30 m (ver figura 28). En la figura 29 se observan una capa horizontal en la superficie, mientras que en la profundidad hay una capa irregular que presenta curvas cóncavas continuas.

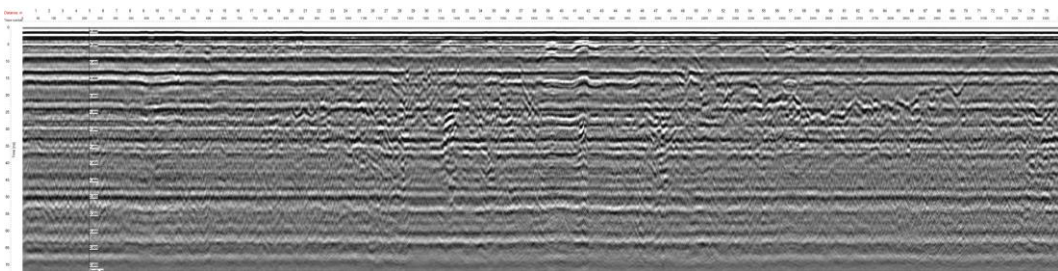


Figura 28 Radargrama del transecto C

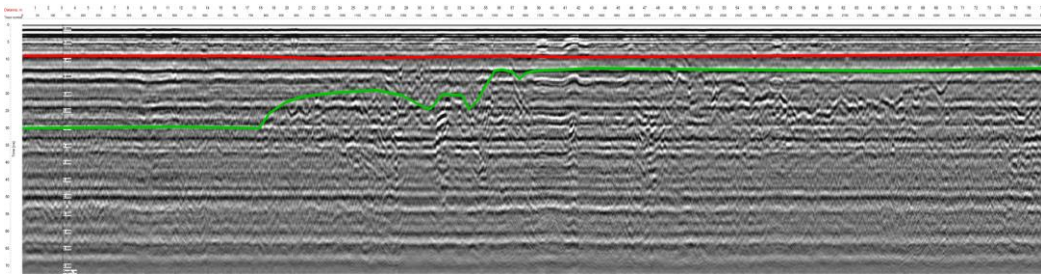


Figura 29 Radargrama editado del transecto C

La figura 30 muestra que al inicio del recorrido existen capas continuas a los 40 y 120 cm de profundidad. En este punto el perfil 3 fue referencia del radargrama y tiene una permeabilidad rápida. En la parte media del transecto, en el radargrama se observa la presencia de una capa irregular con curvas cóncavas, que se acercan a la superficie (ver figura 32) y la referencia fue el perfil 2 (ver figura 31), en este punto la permeabilidad del suelo fue relativamente lenta. Al final del recorrido, el perfil 1 fue referencia del radargrama, donde se observa la presencia de capas continuas cerca de los 40 y 60 cm (ver figura 33). En este punto el suelo tiene una permeabilidad moderada.

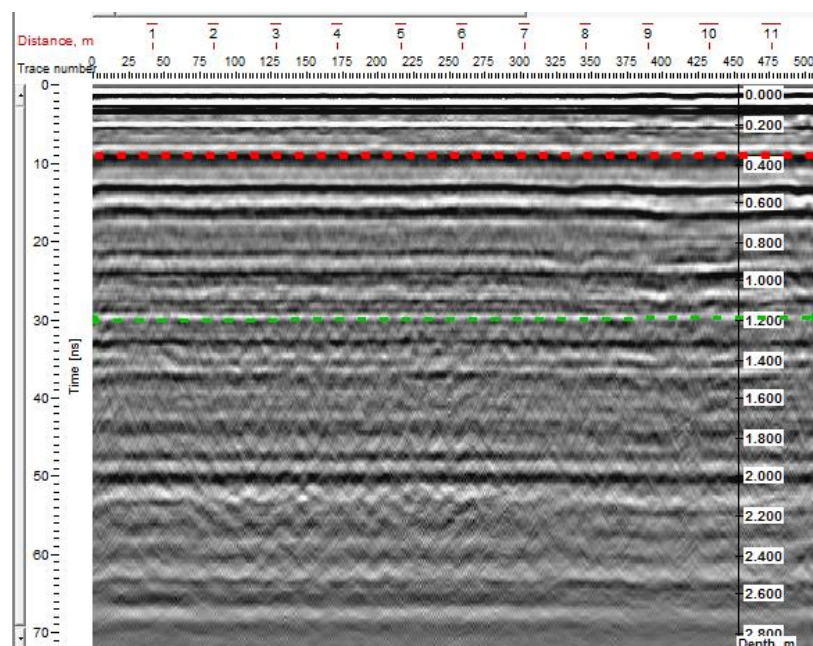


Figura 30 Recorrido inicial del transecto C

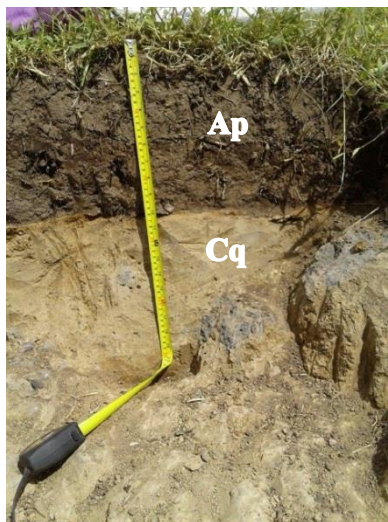


Figura 31 Perfil 2

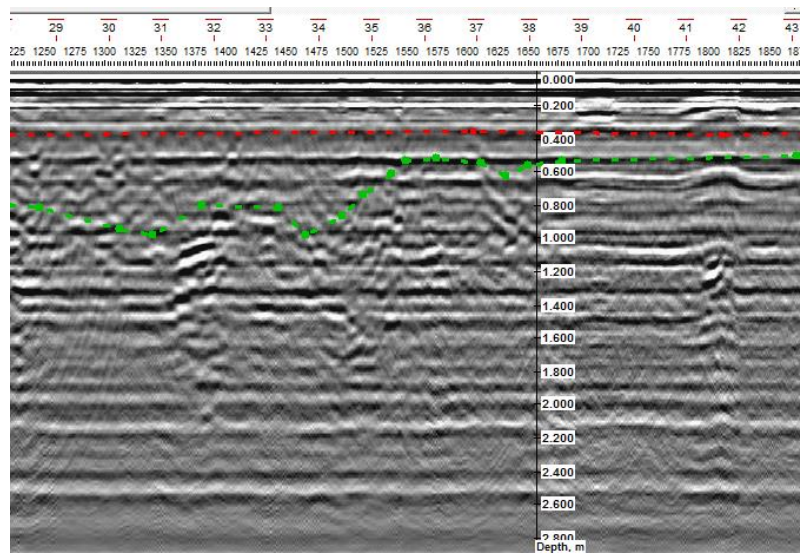


Figura 32 Recorrido en la parte media del transecto C

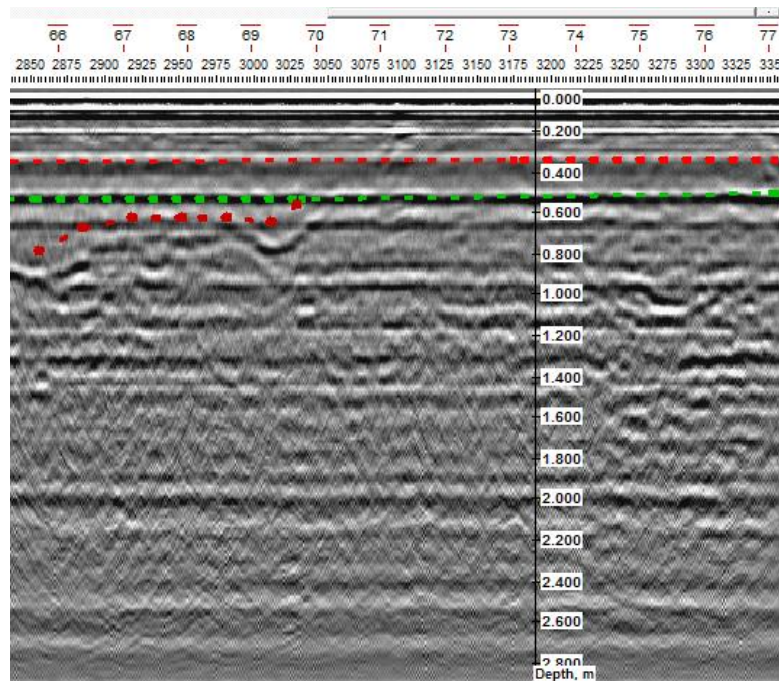


Figura 33 Final del recorrido del transecto C

Transecto D: el GPR se usó en dirección Oeste-Este, en una longitud de 75 m, profundidad 3.30 m (ver figura 34). En la figura 35 se observa una capa continua en la superficie, mientras que en la profundidad se observa una capa irregular continua.

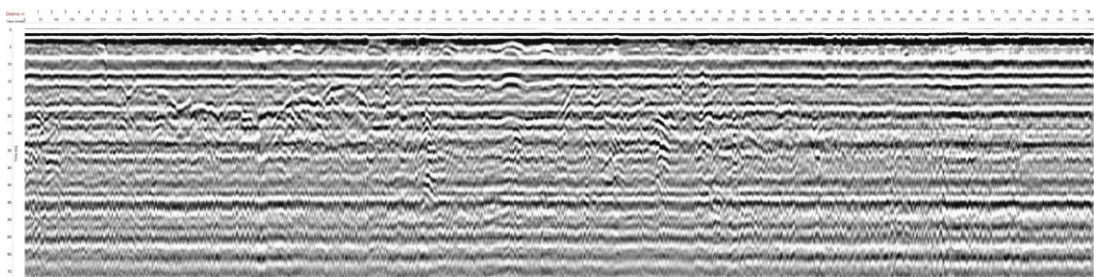


Figura 34 Radargrama del transecto D

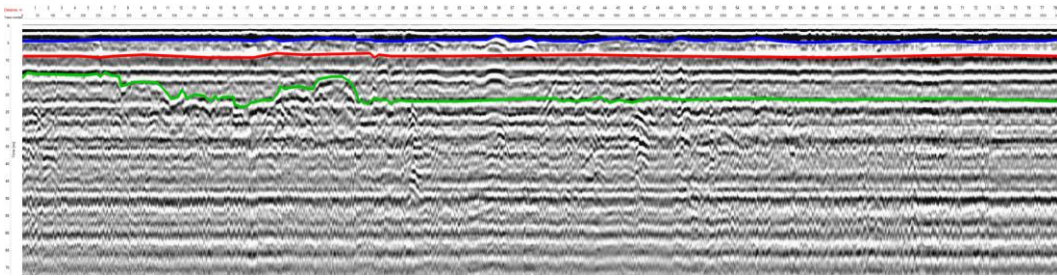


Figura 35 Radargrama editado del transecto D

En la figura 36 se identifica capas a los 20 y 60 cm de profundidad, para esta parte se usó como referencia el perfil 4 que presentó una permeabilidad moderada. En la parte media del recorrido se usó como referencia al perfil 5 (ver figura 37), esta no tiene dato de velocidad de infiltración debido a que la profundidad es de 20 cm. Sin embargo en la figura 38 se observan capas a los 20, 40 y 80 cm donde emergen curvas cóncavas a la superficie. Al final del recorrido en el radargrama sólo se observa capas horizontales continuas cerca de los 20, 40 y 120 cm de profundidad (ver figura 39). En esta parte el perfil 6 se usó como referencia y mostró una permeabilidad relativamente rápida.

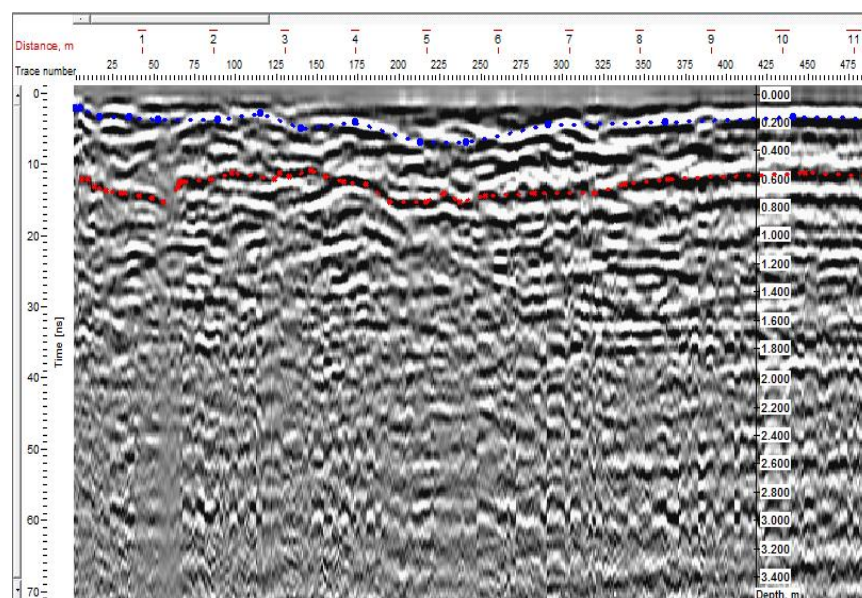


Figura 36 Recorrido inicial del transecto D



Figura 37 Perfil 5

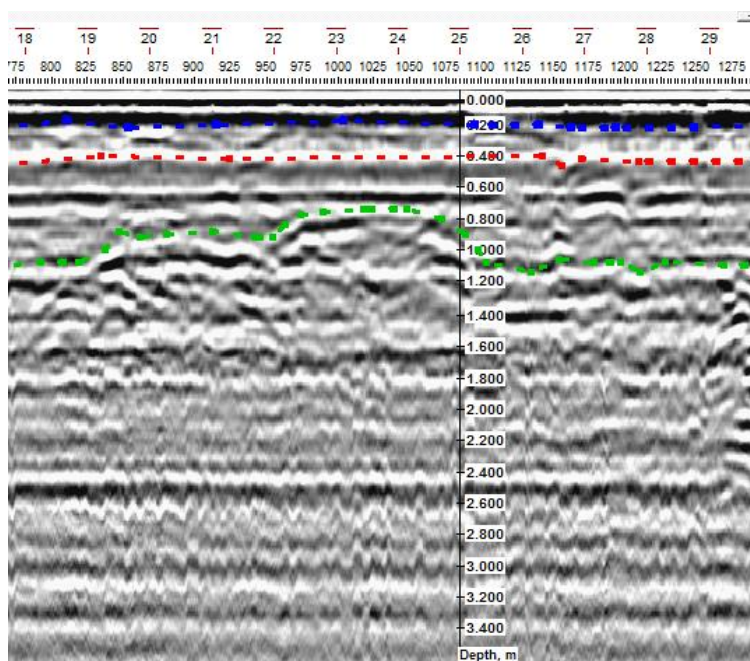


Figura 38 Recorrido medio del transecto D

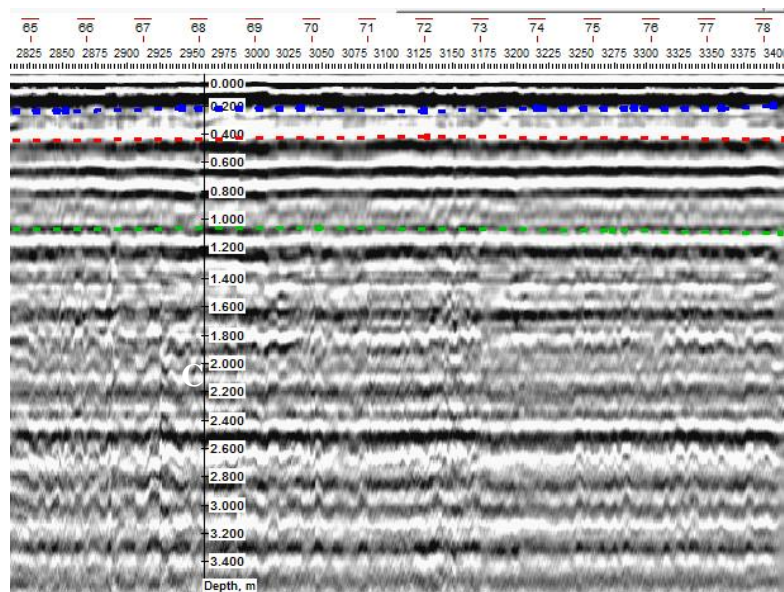


Figura 39 Recorrido final del transecto D

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En la caracterización de los perfiles de suelo se determinaron dos morfologías diferentes. La primera destaca en la parte alta donde se identificó un perfil de suelo de tipo Ap/Cq, poco profundo (20 a 70 cm). Y en la parte baja se determinó un perfil de tipo Ap/Bt/Cq, suelo profundo (120cm). Para la parte alta se identificó que la velocidad de infiltración ajustada está dentro del rango de 2 a 6 cm/h, considerado como un suelo moderadamente permeable. Mientras que para la parte baja la velocidad de infiltración ajustada está dentro del rango de 6,5 a 15,0 cm/h, considerado como un suelo relativamente rápido.
- De acuerdo con los parámetros físicos y químicos se determina que la parte alta presenta características ándicas (densidad aparente $<1\text{g/cm}^3$ y ligera reacción a la prueba NaF). En la parte baja no se evidenció características ándicas (densidad aparente $>1\text{g/cm}^3$ y no hay reacción a la prueba NaF) y se determinó un horizonte argílico bajo un epipedón de contenido medio de materia orgánica.
- No existe una relación entre el radargrama y la permeabilidad del suelo, debido a que el radargrama es una imagen bidimensional que muestra capas o curvas cóncavas de acuerdo al perfil del suelo, mientras que la velocidad de infiltración es un parámetro numérico. Los radargramas de la parte alta presentaron mayores trazas de curvas cóncavas y líneas paralelas, mientras que en campo se observó, mayor presencia de grava en todo el perfil, incluso capas cimentadas de cangahua y su permeabilidad fue entre relativamente lenta a moderada. Mientras que en la parte baja los radargramas presentaron líneas horizontales paralelas a diferentes profundidades y en campo se identificó suelos más profundos con una permeabilidad relativamente rápida.

- El GPR tiene la ventaja de crear una imagen del subsuelo en tiempo real en grandes extensiones agrícolas, optimizando tiempo y dinero. En la agricultura el equipo permite conocer la profundidad del suelo, variaciones morfológicas del suelo y la presencia de materiales consolidados como las rocas o capas de cangahua. Es posible analizar el subsuelo mediante un método no destructivo.

5.2 Recomendaciones

- Complementar el presente estudio con una clasificación de suelos a nivel de subgrupo, de acuerdo a los parámetros morfológicos, físicos y químicos que se obtuvieron en la presente investigación.
- No usar el GPR cuando haya presencia de lluvias, ya que el suelo tiene alto contenido de agua y no permite el paso de la señal electromagnética, por lo que se obtiene radargramas distorsionados.
- Ajustar la configuración del GPR para que la señal electromagnética alcance mayor profundidad en el subsuelo, para identificar otras características del subsuelo importantes para la agricultura.

5.3 Bibliografía

- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos*. Santa FE: Universidad Nacional de Rosario.
- Areválo, G., & Gauggel, C. (2006). *Manual de laboratorio de ciencia de suelos y aguas*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana - Zamorano.
- Basalto, J. (2009). *Métodos de Investigación Geofísica- Geordar*. España: Universidad Católica de Murcia.
- Blanco, R. (2000). *El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Buol, S., Hole, F., & McCracken, R. (1991). *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas.
- Cisneros, R. (2003). *Apuntes de Riego y Drenaje*. México: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS. (2012). *Clasificación textural para suelos*. USA.
- Duque, L. (2009). *Métodos de medición de la capacidad de infiltración*. Loja: Universidad Técnica de Loja.
- Echeverría, N. (2015). *Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica que permita la gestión integral de los cultivos de palma aceitera a través de la aplicación de sistemas de agricultura de precisión*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Gisbert, J., Ibáñez, S., & Moreno, H. (2011). *Movimiento del agua en el suelo*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

- Gómez, R. (2008). *Aplicación del radar de penetración en tierra (georadar) a la exploración no destructiva de yacimientos arqueológicos*. España: Universidad de Granada.
- González, V. (2009). *Permeabilidad en el suelo*. Trujillo: Universidad de Trujillo.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Blanquer, J. (2010). *Características del infiltrómetro de doble anillo (Anillos de Munz)*. Universidad Politecnica de Valencia.
- Lorenzo, H., Pérez, G., Novo, A., & Arnesto, J. (2010). Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Systems*, 5-17.
- Moreno, J., Lasso, L., Cruz, G., Herrera, M., Diaz, G., & Zambrano, J. (2013). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25000 - Cantón Rumiñahui*. Ecuador: Instituto Espacial Ecuatoriano.
- Narvaez, G. (2008). *Automatización de un sistema de riego dedicado a la producción florícola basado en las tecnologías de agricultura de precisión y en telemetría utilizando la plataforma de comunicaciones de telefonía móvil GPRS*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Nassim, B. (2008). *Principios y aplicación del georadar (GPR) en Ecología, Geotécnica y Arqueología*. España: Universidad de Alicante.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma.
- Pantoja, J. (2014). *Análisis de propiedades físicas y químicas del suelo*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Perugachi, J. (2015). *Evaluación del carbono en cangahuas con diferente tiempo de habilitación, tipo de cultivo y tipo de nutrición del suelo*. Ecuador : Universiidad Central del Ecuador .

- Ramírez, M. (2016). *Manual técnico del radar de penetración (GPR) modeo Mala ProEx*. Quito: Instituto Espacial Ecuatoriano .
- Villafañe, R. (2000). Calificación de los suelos por sales y dispersión por sodio y su aplicación en la evauación de tierras. *Agronomía Tropical* , 645-658.
- Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Obtenido de http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Protocolos_suelos%20y_lodos_Sadzawka.pdf
- Zapata, J. (2016). *El GPR como hermmienta no destructuva en el subsuelo*. Ecuador: Instituto Espacial Ecuatoriano.