



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE LOS RECURSOS NATURALES

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CON MÉTODO DIRECTO E
INDIRECTO EN UNA MICROCUENCA DEL SUR DE MORELIA,
MICHOACÁN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA INTEGRATIVA

PRESENTA

BIÓL. NORMA LETICIA ONCHI RAMUCO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALBERTO GÓMEZ-TAGLE CHÁVEZ

MORELIA, MICHOACÁN. AGOSTO DE 2018



DEDICATORIA

A mis papás Audelia Ramuco y Carlos Onchi.

A mis hermanos Alejandro y Margarita, mi cuñado Aron y mis queridos sobrinos Alan y Sofía.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), al Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA) y a la Maestría en Ciencias en Ecología Integrativa (MCEI).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca nacional otorgada durante los dos años de maestría. De igual forma por la beca para realizar la estancia en el extranjero.

Agradezco al laboratorio de Ciencias de la Tierra del INIRENA por brindarme las instalaciones para llevar a cabo el trabajo.

Al laboratorio de Suelos de la Facultad de Biología de la UMSNH por permitirme realizar análisis químicos de suelo.

Al Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” (IHLLA) por la oportunidad de realizar mi estancia de investigación.

A mi asesor de tesis, el Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez le agradezco el tiempo dedicado para la revisión del trabajo, el conocimiento transmitido y las aportaciones tan valiosas al proyecto de tesis. Muchas gracias por todo Dr. Gómez-Tagle Chávez.

A los miembros del comité tutorial, Dr. Alberto Francisco Gómez-Tagle Rojas, Dr. Rafael Hernández Guzmán, Dr. Manuel Mendoza Cantú, Dra. María Alcalá de Jesús y Dr. Philippe Lobit, les agradezco el tiempo para revisar el manuscrito de tesis y las recomendaciones para mejorar el trabajo.

Al Dr. Rafael Guzmán le agradezco la disposición para ayudarme en diferentes momentos. Gracias Rafa.

Al Dr. Pablo Ariel Weinzettel le agradezco la atención brindada durante mi estancia en el IHLLA, las aportaciones para enriquecer el trabajo de tesis y el hospedaje en Azul. De igual forma a los integrantes del IHLLA a quienes no olvido. Gracias por todo y que viva Argentina.

A José Trinidad Soto le agradezco la disposición para trabajar conmigo en campo. Muchas gracias Dr. Trini. A Carolina, Karina, Edgar, Josué, Aron y Juan por su valioso apoyo en campo. A Maricela le agradezco la ayuda en el trabajo de laboratorio. Gracias muchachos por formar parte de este trabajo.

A Sergio, Edgar, Dulce, Joaquín, Dulce Rosas, Alma, Ada y Juan Luis por resolver mis dudas de geoelectrica, análisis geomorfológico, SIG, electrónica y análisis químicos del suelo. A José Pérez Villareal por las observaciones en el trabajo de laboratorio.

A mis papás, mis hermanos y mi cuñado por la motivación para terminar mis estudios de maestría.

A mis amigos; Carolina, Josué, Emanuel, Fany, Eugenia, Iris y Valeria.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| 1.1 Definiciones del suelo..... | 1 |
| 1.2 Métodos directos e indirectos para caracterizar los suelos | 2 |
| 1.3 Métodos indirectos: Prospección geoelectrica..... | 4 |
| 1.4 Importancia de los suelos..... | 6 |
| 1.5 Organización del trabajo..... | 7 |
| Capítulo 2: PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO..... | 9 |
| 2.1 Preguntas de investigación:..... | 10 |
| 2.2 Hipótesis: | 10 |
| 2.3 Objetivos..... | 11 |
| 2.4 Descripción del área de estudio | 12 |
| Capítulo 3: ANTECEDENTES | 14 |
| 3.1 Sondeo eléctrico Vertical (SEV)..... | 14 |
| 3.2 Fundamento teórico y matemático de la resistividad aparente | 15 |
| 3.3 Casos de estudio con SEV | 23 |
| Capítulo 4: RESULTADOS | 25 |
| 4.1 Clasificación y variación espacial del suelo en una microcuenca forestal del sur de Morelia, Michoacán | 25 |
| 4.1.1 Introducción | 25 |
| 4.1.2 Materiales y métodos | 26 |
| 4.1.3 Resultados | 32 |
| 4.1.4 Discusión..... | 43 |
| 4.1.5 Conclusiones | 47 |
| 4.2 Caracterización de suelos de origen volcánico empleando sondeos eléctricos verticales en una microcuenca del centro de México | 49 |
| 4.2.1 Introducción | 49 |
| 4.2.2 Materiales y métodos | 51 |
| 4.2.3 Resultados | 54 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.4 Discusión..... | 62 |
| 4.2.5 Conclusiones | 64 |
| Capítulo 5: DISCUSIÓN GENERAL | 65 |
| Capítulo 6: CONCLUSIONES GENERALES | 70 |
| REFERENCIAS | 73 |
| ANEXO 1 | 86 |
| ANEXO 2 | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Métodos geoelectricos..... | 5 |
| Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca. Coordenadas geográficas, Datum WGS 84. | 13 |
| Figura 3. Líneas de corriente y potencial generadas en el SEV. | 15 |
| Figura 4. Curvas de resistividad aparente de dos capas. | 16 |
| Figura 5. Curvas de resistividad aparente de tres capas. | 17 |
| Figura 6. Electrodo puntual (A) de emisión de corriente eléctrica..... | 18 |
| Figura 7. Corriente eléctrica inducida en dos electrodos de corriente (A y B). | 19 |
| Figura 8. Diferencia de potencial entre dos puntos M y N..... | 20 |
| Figura 9. Puntos de muestreo de suelo. | 30 |
| Figura 10. a) Hipsometría reclasificada. b) Pendiente en grados reclasificada. c) Geometría de laderas. | 32 |
| Figura 11. Unidades geomorfológicas de la microcuenca..... | 33 |
| Figura 12. Perfiles topográficos y curva hipsométrica de la microcuenca. | 34 |
| Figura 13. Color de los suelos en seco. | 37 |
| Figura 14. Propiedades físicas y químicas de los suelos en puntos de muestreo con barrenaciones..... | 39 |
| Figura 15. Variación espacial del suelo de la microcuenca..... | 43 |
| Figura 16. Transectos de resistividad eléctrica. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4. | 53 |
| Figura 17. Transectos de la variación vertical de resistividad aparente. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4..... | 56 |
| Figura 18. Transectos de la secuencia de capas del suelo identificadas en la microcuenca con el SEV. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Análisis de componentes principales. A) Gráfico del componente principal 1 (CP1) y componente principal 2 (CP2). B) Eigenvalues de cada componente principal..... | 59 |
| Figura 20. Grupos de suelo de la microcuenca, método de Ward's. | 59 |
| Figura 21. Modelo conceptual edafológico de la microcuenca mediante SEV..... | 61 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los arreglos electródicos.... | 22 |
| Cuadro 2. Reclasificación de la altitud (m). | 27 |
| Cuadro 3. Clases de pendientes en grados..... | 28 |
| Cuadro 4. Propiedades físicas de los perfiles edáficos. | 38 |
| Cuadro 5. Propiedades químicas de los perfiles edáficos..... | 41 |
| Cuadro 6. Intervalos de resistividad eléctrica verdadera de las capas de suelo diferenciadas mediante SEV. | 58 |
| Cuadro 7. Variables con mayor valor absoluto de los tres primeros componentes..... | 58 |
| Cuadro 8. Comparación entre estudios para la identificación de capas de suelos con sondeo eléctrico vertical (SEV) en diferentes tipos de suelos y otras aplicaciones de métodos geoelectrónicos..... | 68 |

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue identificar y cuantificar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos con la finalidad de contar con un modelo conceptual edafológico en una microcuenca del sur de Morelia, Michoacán, cuya importancia radica en ser parte de la zona de recarga de agua para la ciudad de Morelia y sus recursos forestales, además de que forma parte de un proyecto más extenso en el contexto de la ecohidrología a nivel de cuenca. La metodología incluyó un análisis geomorfológico determinado con criterios de hipsometría, pendiente y geometría de laderas; se tomaron muestras de suelo con barrena de sacabocado en intervalos de 20 cm hasta 2.0 m de profundidad, se excavaron y describieron seis perfiles, posteriormente se determinaron propiedades físicas y químicas de suelo con las cuales se realizó la clasificación empleando la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). Adicionalmente, se utilizó el sondeo eléctrico vertical (SEV) en cada punto de muestreo con un equipo de diseño propio. El 97% del área de la microcuenca corresponde a un Cambisol háplico y sólo el 3% a un Regosol háplico. Con el método geoelectrico se identificaron cuatro capas. En los suelos de mayor desarrollo pedogenético las capas fueron: 1) horizonte orgánico, 2) ceniza volcánica 3) suelo arcilloso (Bt +BC) y 4) saprolita (Cw). Por otro lado, en los suelos con menor desarrollo pedogenético las capas identificadas fueron: 1) horizonte orgánico, 2) ceniza volcánica, 3) capa transicional (AC) y 4) saprolita (Cw). En este trabajo se concluyó que las formas de relieve en la microcuenca son importantes en la variación de los suelos. Se demostró la fiabilidad del sondeo eléctrico vertical para la caracterización de capas del suelo y se obtuvo el modelo conceptual edafológico que es importante en el manejo de la microcuenca.

Palabras clave: Descripción y clasificación de suelos; horizontes de suelos; microcuenca; recursos forestales; sondeo eléctrico vertical.

ABSTRACT

The objective of this work was to identify and quantify the spatial disposition of the layers or horizons of the soils in order to have an edaphological conceptual model in a catchment in the south of Morelia, Michoacán, whose importance lies in being part of the zone of water recharge for the city of Morelia and its forest resources, as well as being part of a larger project in the context of ecohydrology at the basin level. The methodology included a determined geomorphological analysis with criteria of hypsometry, slope and hillside geometry; soil samples were taken with punching auger in intervals of 20 cm to 2.0 m depth, six profiles were excavated and described, later physical and chemical soil properties were determined with which the classification was made using the World Reference Base of the Resource Soil (WRB). Additionally, vertical electrical sounding (SEV) was used at each sampling point with its own design team. 97% of the catchment area corresponds to a Haplic Cambisol and only 3% to a Haplic Regosol. With the geoelectric method, four layers were identified. In the soils of greater pedogenetic development the layers were: 1) organic horizon, 2) volcanic ash 3) clay soil (Bt + BC) and 4) saprolite (Cw). On the other hand, in the soils with less pedogenetic development, the identified layers were: 1) organic horizon, 2) volcanic ash, 3) transitional layer (AC) and 4) saprolite (Cw). In this work it was concluded that the relief forms in the catchment are important in the variation of soils. The reliability of the vertical electrical sounding for the characterization of soil layers was demonstrated and the edaphological conceptual model that is important in the management of the catchment was obtained.

Keywords: Description and classification of soils; soil horizons; catchment; forest resources; vertical electrical sounding.

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Definiciones del suelo

Desde los inicios de la edafología en Rusia con los aportes de Dokuchaev a finales del siglo XIX se definió el suelo como un ente natural (Porta *et al.*, 1999); desde entonces diferentes disciplinas han sugerido definiciones que van más acorde con el enfoque de estudio. La agronomía, por ejemplo, refiere al suelo como la capa superficial de la corteza terrestre que es productiva y para su estudio reconoce de mayor relevancia los primeros 30 cm de suelo; sin embargo, esto generalmente se considera como una visión limitada del mismo (Cardoza-Vázquez *et al.*, 2007). Otros autores lo determinan como un “bloque de memoria” de cambios pasados en la naturaleza con los cuales se pueden predecir cambios futuros (Hernández-Jiménez *et al.*, 2004); que consiste en diferentes capas constituidas por la proporción de minerales, matriz sólida y espacio poroso, además de los múltiples organismos vivos que afectan directa o indirectamente la estructura del suelo y el crecimiento de las plantas (Kramer, 1974).

Los especialistas de suelo, concentran su atención no sólo en la capa superficial sino también en las subyacentes, donde la naturaleza del suelo determina la profundidad necesaria a excavar y poder observar las paredes, dicha profundidad generalmente varía entre uno y dos metros (Jaramillo, 2002). Al corte vertical del terreno desde la superficie hasta el material originario se le denomina *perfil de suelo* (Porta *et al.*, 1999), el cual se organiza en capas estratificadas diferenciadas principalmente por color, textura y otras propiedades producto de la pedogénesis que reciben el nombre de *horizontes* (FitzPatrick, 1996).

Dokuchaev demostró a finales del siglo XIX que los suelos no se distribuyen al azar, sino que desarrollan un patrón en el terreno (FitzPatrick, 1996). La perspectiva pedológica más común del suelo es que es un cuerpo natural e independiente que ha evolucionado mediante la interacción de cinco factores formadores: material original, clima, organismos,

topografía y tiempo (Bockheim *et al.*, 2005; Amundson, 2014). Estos factores están determinados en el modelo de Jenny (1941) estableciendo un concepto más amplio del suelo.

Por otro lado, los diferentes sistemas de clasificación también han adoptado una definición particular. De acuerdo con la Soil Taxonomy, el suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), gases y líquido, ocupa un espacio y se caracteriza por horizontes o capas que se distinguen de los materiales de origen (Soil Survey Staff, 1999). La Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB por sus siglas en inglés), ha optado por un significado más amplio que permite abordar los problemas ambientales de forma sistemática e integral, por ello, el objeto que se clasifica es “ cualquier material dentro de los dos metros de la superficie de la Tierra que esté en contacto con la atmósfera con exclusión de los organismos vivos, las zonas con hielo continuo no cubiertas por material y las masas de agua más profundas de dos metros” por lo tanto, de acuerdo con lo anterior, la WRB considera para la clasificación capas más profundas de dos metros (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2015).

En 2015 en la conferencia “Suelos ¿por qué los perdemos y cómo conservarlos?”, impartida por la Dra. Helena Cotler Ávalos, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), menciona que una forma más adecuada de referirse a este recurso es en plural, debido a la diferencia que hay entre los diferentes grupos de suelo. De acuerdo con lo anterior, se puede expresar que los suelos son complejos y variables dentro de los cuales se llevan a cabo numerosos procesos químicos, físicos y biológicos, donde la continuidad se observa con transiciones graduales o abruptas, que difícilmente puede tener una sola definición.

1.2 Métodos directos e indirectos para caracterizar los suelos

Los métodos comúnmente reportados en edafología se basan en: a) métodos geográficos comparativos que se enfocan en la diferenciación de propiedades de suelos en diferentes ambientes y su interpretación, b) métodos evolutivos comparativos, aplicados en estudio paleoedafológicos y paleogeográficos, se incorpora la edad del paisaje y de los suelos

en la interpretación de la distribución de suelos, c) métodos experimentales de campo y laboratorio y d) métodos de modelación matemática que se aplican para modelar el desarrollo de topofomas y edafogénesis, así como en la interpolación de los datos espaciales y planear la estrategia de muestreo en el proceso de la cartografía edáfica, entre otros (Krasilnikov, 2011).

La descripción morfológica de perfiles en campo es la base de la edafología, incluye la toma de muestras alteradas y su posterior análisis en laboratorio. Se realiza mediante observaciones de la excavación de pozos o calicatas que tienen en superficie dos metros por uno y generalmente tienen una profundidad mayor a un metro (FitzPatrick, 1996); existen diferentes manuales para la descripción y un país puede tener uno o más. Los más completos son el Soil Survey Manual (SSM) del Natural Resources Conservation Service (NRCS) del United States Department of Agriculture (USDA) y el manual de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Krasilnikov, 2011). En México, los manuales comúnmente utilizados se publicaron por el Colegio de Postgraduados (Cuanalo, 1975) y por la Universidad Nacional Autónoma de México (Siebe *et al.*, 1996).

En México, el sistema de clasificación de suelos más utilizado es el de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, que tuvo su inicio con la modificación en 1988 de la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). La Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1999), es otra clasificación importante a nivel internacional y también utilizada en México. La determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos generalmente se basa en normas específicas como los manuales de la Soil Science Society of America (SSSA, 2002) y a nivel nacional en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2000). De acuerdo con los manuales anteriores, para obtener la parte fina del suelo las muestras de campo se secan al aire, son trituradas y se pasan por un tamiz con abertura de 2 mm, que corresponde a la fracción de tierra fina y materia orgánica, entre otros).

Especialistas de suelos en diferentes partes de mundo han generado cartografía a partir de la metodología antes descrita (Legros, 2005). En México la cartografía de suelos se

realiza de acuerdo con las guías para la interpretación de cartografía (INEGI, 2008), destacando también la información sobre edafología generada y recopilada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (INIFAP-CONABIO, 2008). Hasta ahora en edafología, como en otras áreas, el método directo es el más utilizado y el que mejor puede funcionar para la obtención de datos porque permite la inspección directa de los suelos y obtención de información más confiable y completa (De la Rosa, 2008). Sin embargo, de manera local, la información disponible no siempre es la adecuada, lo que implica que sea necesario, dependiendo del objetivo de estudio, generar información con mayor detalle. Aunado a los perfiles de suelo, se puede obtener información de las propiedades físicas y químicas mediante las barrenas (sacabocado, media caña) que representan muestras de suelo alteradas y que se consideran en muchos casos, no aptas para observar la estructura natural del suelo (Hodgson, 1987).

1.3 Métodos indirectos: Prospección geoelectrica

Se denomina prospección geoelectrica al conjunto de técnicas físicas y matemáticas que son aplicadas en la búsqueda de yacimientos de sustancias útiles en el subsuelo (petróleo, minerales y agua subterránea, entre otros), así como en la ingeniería civil, orientación de excavaciones arqueológicas y detección de galerías subterráneas por medio de las propiedades físicas y el medio circundante mediante observaciones realizadas en la superficie de la Tierra (Orellana y Silva, 1982).

Dependiendo del tipo de corriente que circule en los suelos hay dos tipos de métodos geoelectricos: los de corriente natural y los de corriente artificial. La corriente natural continua tiene su origen en el fenómeno químico de oxidación-reducción y la alterna en la oscilación del campo magnético de la tierra (el potencial espontáneo y corrientes telúricas son ejemplos de estos métodos). Por otro lado, las corrientes artificiales son generadas a partir de baterías o pequeños motores a combustión que convierten la rotación en una corriente continua o alterna, ejemplos de este método son las equipotenciales, sondeos eléctricos verticales, calicatas y el georadar (Estrada, 2013) que resultan útiles para cartografiar capas de suelo, perfiles profundos y posición del basamento (Arias, 2011). Hay una amplia variedad

de métodos geoelectrónicos y arreglos electrónicos que pueden ser adecuados de acuerdo con el objetivo de investigación, tipo de terreno, características eléctricas de rocas y suelos, proporcionando imágenes del subsuelo (modelos) en términos de resistividades. Los que se usan para medir cambios de resistividad en sentido vertical se llaman sondeos, y los de medición en sentido horizontal se conocen como calicatas (CNA, 2007). En la Figura 1 se presentan agrupados los métodos geoelectrónicos.

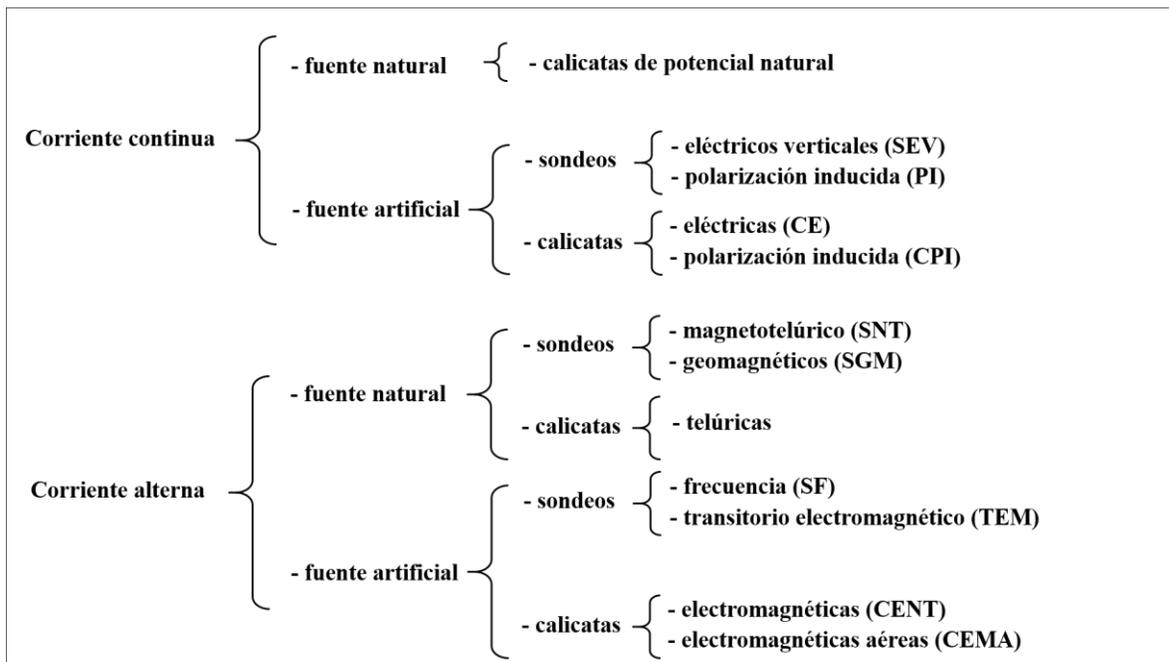


Figura 1. Métodos geoelectrónicos.
Fuente: CNA (2007).

La interpretación de los métodos geoelectrónicos presenta dos niveles: 1) el modelamiento matemático donde se definen combinaciones de la propiedad que se mide y la geometría de las masas de suelo o de roca que correspondan con las mediciones hechas en campo y 2) la interpretación de los modelos en términos geológicos, hidrogeológicos o geotécnicos. Estos son de utilidad cuando existen contrastes bien definidos entre las propiedades de materiales subsuperficiales contiguos (Arias, 2011).

1.4 Importancia de los suelos

Los problemas ambientales (cambio de cobertura vegetal, abastecimiento de agua, contaminación, entre otros) requieren de soluciones que, en la mayoría de los casos, no pueden resolverse de manera rápida. La falta de datos en diferentes disciplinas científicas contribuye en la escasez de dichas soluciones, aunado a las reducciones de presupuestos económicos que, en repetidas ocasiones, truncan las posibilidades de mejorar las condiciones ambientales. Como se mencionó anteriormente, México es un país que cuenta con una alta diversidad en cuanto a suelos se refiere; sin embargo, se requiere poner mayor atención a este recurso natural a pesar de los esfuerzos de numerosos edafólogos que han contribuido en el conocimiento de los suelos en el país.

El estudio de los suelos es relevante en la sostenibilidad de ecosistemas, entre las aportaciones destacan: a) la captura de carbono, b) hábitat de organismos, c) suministro de alimentos, d) patrimonio geológico e) arqueológico (Burbano, 2016), así como el hidrológico, en el cual los suelos son el reservorio temporal que infiltra agua hacia los acuíferos, al respecto, se ha documentado que los horizontes del suelo influyen en la generación del flujo subsuperficial, y en el contacto entre estos horizontes se origina un flujo rápido denominado flujo de tubo (*pipe flow*) que genera una respuesta rápida del flujo subsuperficial (Tsuboyama *et al.*, 1994); donde interviene también la roca que puede actuar como una capa impermeable (Freer *et al.*, 2002). Además, la dinámica de humedad, infiltración de agua y regulación de caudales difieren en cuanto a los tipos de suelos (Neris *et al.*, 2012), por ello es necesario conocer el arreglo de sus partículas, agregados, poros, capas verticales y su distribución lateral (Lin, 2012). Los suelos, influyen también en la economía, debido a que de ellos dependen vegetales y animales a los que se suministra agua y nutrientes para su desarrollo (Burbano, 2016). Las funciones de los suelos se pueden estudiar en diferentes extensiones y niveles ecosistémicos, la cuenca es uno de estos niveles. Por definición una cuenca es la superficie donde la precipitación es transferida hacia las partes topográficas bajas mediante un sistema de drenaje hasta un mismo punto de salida (Aparicio, 1992).

1.5 Organización del trabajo

El trabajo de tesis se llevó a cabo en una microcuenca que forma parte de la estación ecohidrológica Alto Fresno, uno de los primeros lugares en el estado de Michoacán que cuenta con un monitoreo constante desde el año 2010 de variables, entre ellas: meteorológicas, descripción de vegetación e hidrología dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo. El presente trabajo de investigación forma parte de un proyecto interdisciplinario más extenso, el objetivo fue identificar y cuantificar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos con la finalidad de contar con un modelo conceptual edafológico en una microcuenca de uso forestal del Sur de Morelia, Michoacán.

La tesis está estructurada en los capítulos que se describen a continuación:

Capítulo 2: Presenta el planteamiento del trabajo (preguntas de investigación, hipótesis y objetivos) y la descripción del área de estudio.

Capítulo 3: Corresponde a los Antecedentes. Se presenta una revisión del estado del arte.

Capítulo 4: Corresponde a los resultados. Se presentan en dos apartados con la siguiente estructura: Introducción, materiales y métodos, resultados, discusión y conclusiones. Los dos apartados de este capítulo son los siguientes:

- **4.1 Clasificación y variación espacial del suelo en una microcuenca forestal del sur de Morelia, Michoacán:** Se emplea el método directo mediante trabajo de campo y análisis de laboratorio para describir y clasificar los suelos.
- **4.2 Caracterización de suelos de origen volcánico empleando sondeos eléctricos verticales en una microcuenca del centro de México:** Se aborda la evaluación del método geoelectrico para identificar capas de suelo en la microcuenca. Se trabajó con el sondeo eléctrico vertical empleando el arreglo de Wenner- α .

Capítulo 5: Discusión general. Se presenta una integración de los resultados, las ventajas y desventajas de la metodología empleada.

Capítulo 6: Corresponde a las conclusiones generales del trabajo de tesis, la aplicación del SEV y recomendaciones en futuros trabajos.

Capítulo 2: PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

En general, en los estudios de suelo a nivel internacional se abordan métodos directos, en primer lugar para clasificarlos, que permite sistematizar y ordenar grupos de suelo con propiedades físicas, químicas y biológicas similares; en este contexto el método directo debe resolver un problema doble, por un lado, clasificar el suelo en grupos y por otro, proporcionar la información necesaria que permita mapear no sólo los grupos de suelo sino también predecir el comportamiento y estimar la productividad del mismo de manera interdisciplinaria. La complejidad del suelo radica en que forma un continuo donde los cambios son graduales y dependen no sólo de factores intrínsecos sino también de factores externos, como el clima o la vegetación.

Los suelos en México enfrentan diferentes problemas como: cambio de uso de suelo, erosión, falta de manejo y/o conservación, entre otros. Por esto, la problemática que alentó a llevar a cabo este trabajo de tesis radica en la falta de manejo de este recurso natural como uno de los componentes del ciclo hidrológico orientado a los bosques, donde se ha identificado que se pueden emplear métodos alternativos de forma no destructiva y tomando en cuenta la variación vertical del suelo que es importante en su manejo orientado a la dinámica hidrológica.

Por lo tanto, este trabajo de investigación propone abordar el estudio de suelos empleando además de los métodos directos, el sondeo eléctrico vertical (método geoeléctrico) como alternativa para obtener la profundidad y espesor de los suelos, así como sus propiedades físicas y químicas a través de su relación entre sí con los cambios de resistividad eléctrica del suelo en un sitio de interés. Además, los métodos geoeléctricos pueden contribuir en el manejo de ecosistemas forestales y agrícolas mediante la ubicación de sitios potenciales de humedad, dinámica hidrológica subsuperficial y funcionalidad del suelo.

2.1 Preguntas de investigación:

- ¿Cómo es la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos en una microcuenca de uso forestal?
- ¿Es posible emplear métodos de muestreo indirectos (sondeo eléctrico vertical) para conocer la disposición vertical de las capas u horizontes de los suelos en una microcuenca de uso forestal?

2.2 Hipótesis:

H1: La disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos en la microcuenca estimada con métodos directos, estará influenciada por factores extrínsecos (erosivos) que pueden causar cambios en el relieve y en consecuencia modificar la morfología de los suelos.

H2: El sondeo eléctrico vertical, podrá estimar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos, el espesor y profundidad a través de cambios en la resistividad eléctrica. Las propiedades físicas (la textura y humedad) son las que presentan mayor sensibilidad al método, así como los factores de relieve (altitud y pendiente).

2.3 Objetivos

Objetivo general

Identificar y cuantificar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos con la finalidad de contar con un modelo conceptual edafológico en una microcuenca de uso forestal del Sur de Morelia, Michoacán.

Objetivos particulares

- Describir y cuantificar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos y las propiedades físicas y químicas.
- Realizar un análisis geofísico empleando sondeos eléctricos verticales para la identificación de las capas u horizontes de los suelos.

2.4 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en una microcuenca que forma parte de la estación ecohidrológica Alto Fresno, ubicada a 18 km al Suroeste de Morelia, Michoacán en el centro de México (19° 32' 40.1" N y 101° 14' 15.1" W) en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) (Gómez-Tagle *et al.*, 2015). Está representada por una superficie de 11.77 ha, se encuentra a una altitud promedio de 2169 m y una pendiente media de 13.4° (Gómez-Tagle *et al.*, 2015) (Figura 2). El clima es templado subhúmedo con precipitaciones de verano mayores a 95% en los meses de junio a octubre y precipitaciones invernales menores a 5% en los meses de diciembre a febrero. Las estaciones más cercanas al área de estudio son: Acuitzio del Canje a 2200 m y Jesús del Monte 2180 m de altitud que reportan precipitaciones promedio anuales de 954 a 1116 mm y temperaturas promedio anuales entre 16.9 y 17.5 °C para el periodo de 1951-2010 (Gómez-Tagle *et al.*, 2015).

El basamento se conforma por andesitas y flujos piroclásticos de composición riolítica (ignimbrita) del Mioceno que contiene fragmentos de piedra pómez blanca (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015) que de manera local se encuentra sepultada por materiales ígneos extrusivos de composición basáltica y basalto-andesítica originados en diferentes episodios eruptivos (Rosas, 2015). Asimismo, se presentan materiales piroclásticos de cenizas volcánicas producidas por conos monogenéticos formados en etapas finales de erupciones de estratovolcanes y volcanes en escudo típicos de la zona (Pujolar *et al.*, 2011). Los suelos reportados son de origen volcánico, el epipedón corresponde a un Cambisol y el endopedón a un suelo sepultado con un horizonte diacrítico argílico clasificado como Lixisol húmico (Gómez-Tagle, 2008).

La microcuenca es importante porque en ella existe vegetación forestal que corresponde a un bosque secundario de pino-encino con edad promedio de 20 años y con individuos que alcanzan los 45 años. El estrato arbóreo se representa por tres especies de pino (*P. douglasiana* Martínez, *P. leiophylla* Schiede, *Pinus devoniana* Lindl) y dos especies de encino (*Quercus castanea* Neé y *Q. obtusata* Bonpl) (Gómez-Tagle *et al.*, 2015). El estrato arbóreo es en su mayoría de segundo crecimiento (individuos menores de 50 años), aunque

también existen remanentes importantes de bosque maduro (individuos mayores de 80 años) relativamente bien conservados en áreas de mayor dificultad de acceso (Rosas, 2015). En este estrato también se identifican *Arbutus glandulosa*, *Clethra mexicana*, *Prunus serotina* var. *capuli*, *Fraxinus udehi* y *Carpinus caroliniana* (Rosas, 2015). El estrato arbustivo lo representan *Cornus excelsa*, *Crataegus pubescens*, *C. mexicana* (tejocote) y *Bacharis heterophylla*, (Gómez-Tagle, 2008), *B. conferta*, *B. microphylla* (jara ó escobo) y *R. toxicodendron* (hiedra venenosa ó bembérica) y del género *Rubus* (zarzamora ó tzitún/tzituni). El estrato herbáceo de la microcuenca se compone por especies de leguminosas y malváceas, *Astragalus popatarum*, *Mimosa sp.* y *Sida spp.* Se observan también algunas especies de cactáceas como *Opuntia streptacatha* (nopal) y *Agave popatarum*. Compuestas entre las que se encuentran plantas de los géneros *Bidens*, *Cosmos* y *Melampodium*, gramíneas como *Cynodon dactylon*, las plantas en zonas más húmedas están representadas por *Equisetum sp.*, *Juncus sp.* y *Tilia mexicana* las cuales se encuentran cerca de los cauces (Pujolar *et al.*, 2011).

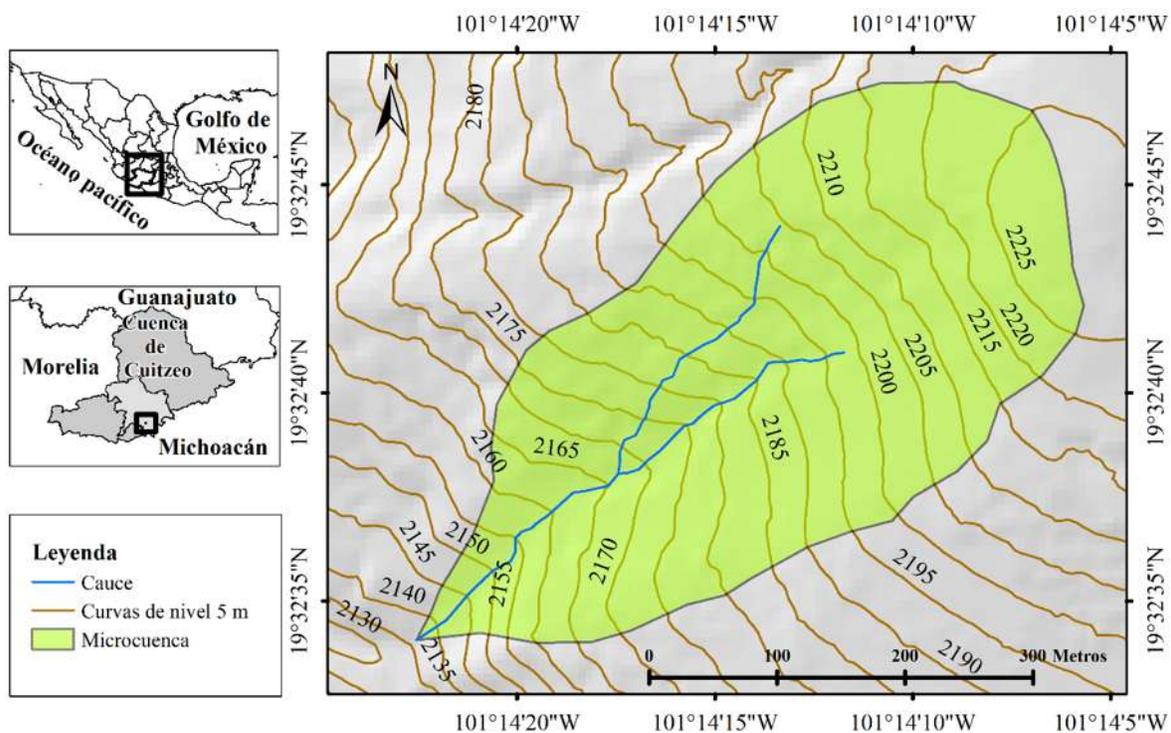


Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca. Coordenadas geográficas, Datum WGS 84.

Capítulo 3: ANTECEDENTES

3.1 Sondeo eléctrico Vertical (SEV)

El SEV se aplica en la determinación de la resistividad eléctrica aparente utilizando dispositivos electródicos lineales con electrodos de emisión y recepción. Su objetivo es obtener la resistividad eléctrica con respecto a la profundidad. De acuerdo a Auge (2008) para llevar a cabo un SEV se requiere:

- **Circuito de emisión:** Integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de corriente, donde los puntos de emisión son A y B que consisten en clavos metálicos y los cables de transmisión.
- **Circuito de recepción:** Compuesto por un voltímetro y dos electrodos para la medición del potencial (M y N).

Al introducir los electrodos y un voltaje, se genera corriente eléctrica. En el terreno se produce un campo eléctrico y una diferencial de potencial. Se generan trayectos por corrientes de igual intensidad (líneas de corriente) y puntos con igual potencial llamadas equipotenciales (Figura 3). A mayor profundidad, las medidas de resistividad aparente del suelo se obtienen con un espaciado mayor entre electrodos de corriente (Nuñez *et al.*, 2013). La profundidad estudiada depende además de la heterogeneidad del subsuelo, la potencia del generador, el voltaje entregado por el transmisor y cables, entre otros, es importante señalar que no existe una proporcionalidad directa entre la penetración y distancia entre electrodos (Daza, 2012).

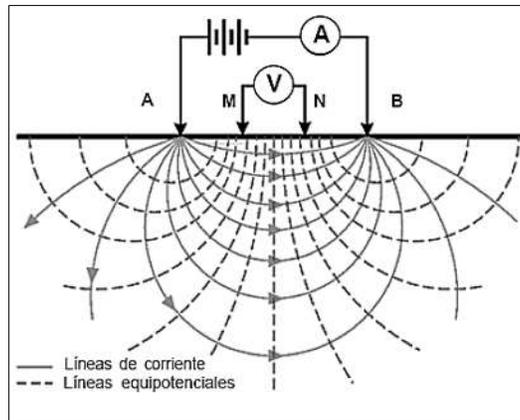


Figura 3. Líneas de corriente y potencial generadas en el SEV.
Fuente: Nuñez *et al* (2013).

3.2 Fundamento teórico y matemático de la resistividad aparente

La resistividad eléctrica (ρ) es la propiedad que presenta un material de oponerse al paso de corriente eléctrica, debido a ello, la determinación de dicha propiedad de los elementos del subsuelo resulta de mayor interés en los métodos de prospección eléctrica y no tanto la resistencia (Ley, 2001). Su finalidad es localizar cuerpos y estructuras geológicas. El flujo de corriente eléctrica a través de las rocas o sedimentos está influenciado por diferentes parámetros geológicos como los minerales, la porosidad y el grado de saturación de agua en la roca; se ha utilizado por varias décadas en hidrogeología, en investigaciones geológicas y en estudios ambientales (Loke, 1999).

En el suelo, las resistividades pueden variar en un amplio rango y la información pedológica proporciona los insumos para entender los datos de resistividad eléctrica (Robain *et al.*, 1996). La variabilidad espacial dentro de los paisajes está controlada por el material parental, el relieve, el clima, los organismos, el tiempo (Sinowski y Auerswald, 1999) y los procesos geomorfológicos, pero a pesar de su importancia hay poca información cuantitativa sobre la variación vertical de los perfiles de suelo (Vanwalleghem *et al.*, 2010).

Los valores de resistividad en el suelo constituyen un reto en el análisis de prospección eléctrica debido a las diferentes propiedades resistivas en función de la corriente

eléctrica que circula por los iones de los fluidos (por lo general agua) que se encuentran en los poros y fracturas. Los factores que determinan la resistividad son: la matriz del sólido, la interconexión de los poros, la saturación de fluidos y la temperatura (Ley, 2001). Esta propiedad se considera como una forma de conocer la variabilidad de las características físicas del suelo (Weinzettel *et al.*, 2009). Las rocas también se distinguen por poseer diferentes valores de resistividad, por ejemplo, las ígneas y metamórficas tienen una alta resistividad eléctrica, las sedimentarias que son más porosas y tienen un alto contenido de agua presentan valores bajos de resistividad (Loke, 1999).

La resistividad se representa en curvas que están en función de la distancia de los electrodos $AB/2$ ó a y en escala logarítmica a partir de las cuales se proponen modelos de la estratificación horizontal en donde es importante contar con datos de campo que puedan avalar los modelos propuestos (Vences, 2013). No existe una regla general que permita una interpretación directa de los datos para obtener un modelo. En la Figura 4 se presentan algunos ejemplos de curvas de resistividad aparente, en la curva 1 se puede decir que se trata de un terreno con estructura homogénea, en la 2 y 3 se propone un modelo de dos estratos (Briceño, 1997) donde hay dos relaciones posibles $\rho_1 > \rho_2$ y $\rho_1 < \rho_2$.

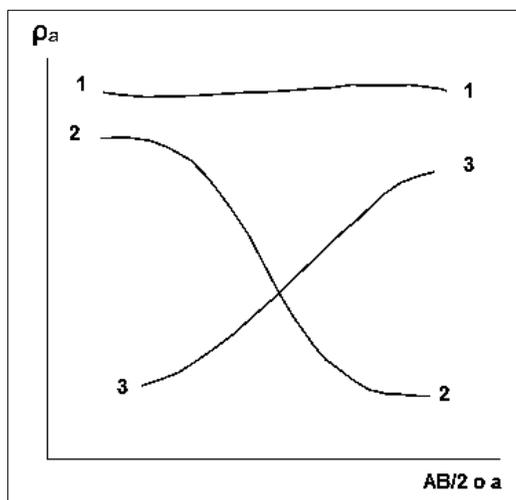


Figura 4. Curvas de resistividad aparente de dos capas.
Fuente: Adaptada de Briceño (1997).

Cuando el subsuelo se compone de tres capas se obtienen cuatro tipos de curvas (Figura 5):

Tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$),

Tipo K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$),

Tipo A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) y

Tipo Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$).

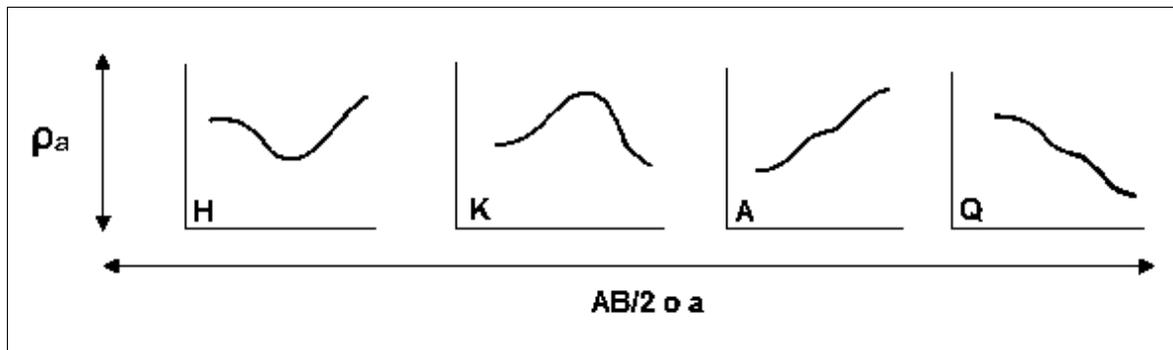


Figura 5. Curvas de resistividad aparente de tres capas.

Fuente: Adaptada de Sánchez (2011).

Para los cortes de cuatro o más capas la clasificación se realiza mediante la combinación de las curvas anteriores, se pueden distinguir ocho tipos: HK, KH, QH, AK, HA, HQ, QQ y AA (Ramos-Leal *et al.*, 2007).

Su fundamento teórico se puede explicar mediante la Ley de Ohm, en la cual se enuncia que la corriente eléctrica es igual a la diferencia de potencial entre la resistencia de un conductor:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde (I) es la intensidad o corriente eléctrica en Amperios, (V) es el potencial o voltaje en Voltios y (R) es la resistencia en Ohms (Ω).

De la ecuación anterior se obtiene que la resistencia (R) es la oposición que encuentra la corriente eléctrica a su paso por un circuito eléctrico y, es una función de la naturaleza y geometría del conductor que puede asimilarse a un cilindro de longitud (L) y una sección (S). La constante de proporcionalidad lineal ρ (ρ) es la resistividad, una propiedad característica de cada material que indica qué tanto se opone dicho material al paso de la corriente eléctrica:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde (R) es la resistencia del conductor (Ω), (ρ) es la resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$), (L) es la longitud del conductor (metros) y (S) es la sección transversal del conductor (m^2).

Cuando la corriente eléctrica se introduce en un punto A y mediante la Ecuación 2 se calcula la resistencia (R) que opone al paso de esa corriente en un semiespacio conductor de radio (r) y de espesor (dr) (Figura 6) y aplicando la Ecuación 1 se obtiene:

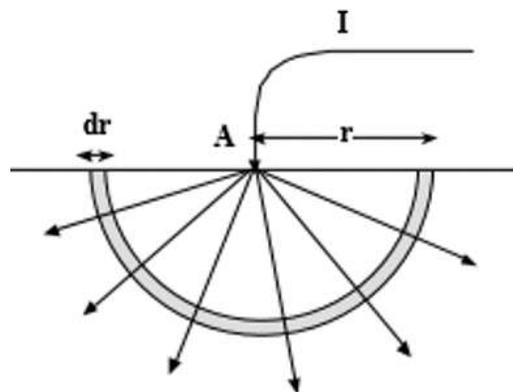


Figura 6. Electrodo puntual (A) de emisión de corriente eléctrica.
Fuente: Sánchez (2011).

$$R = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$-dV = R \times I \quad \text{Ecuación (4)}$$

Sustituyendo el valor de (R) por el obtenido en la Ecuación 3:

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} I \quad \text{Ecuación (5)}$$

Integrando se obtiene como resultado:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Para introducir la corriente A debe existir otro electrodo B, donde el potencial generado en el punto M es igual al que se produce en el punto A menos el B. Se aplica dos veces la Ecuación 6 y restando se obtiene el potencial en el punto M (Figura 7):

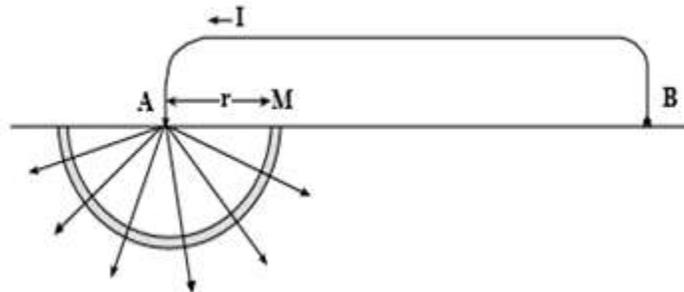


Figura 7. Corriente eléctrica inducida en dos electrodos de corriente (A y B).
Fuente: Sánchez (2011).

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi A M} - \frac{\rho I}{2\pi B M} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Sin embargo, en la práctica no se mide la corriente eléctrica en un punto, se mide la diferencia de potencial entre dos puntos M y N (Figura 8) por lo tanto, aplicando la Ecuación 7 al punto N se obtiene:

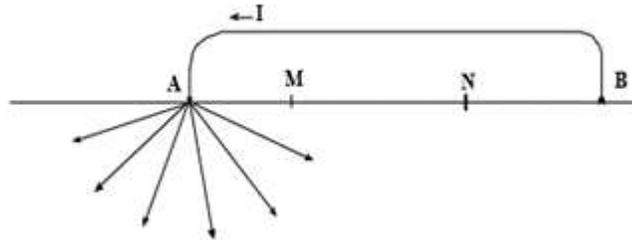


Figura 8. Diferencia de potencial entre dos puntos M y N.
Fuente: Sánchez (2011).

$$V_N = \frac{\rho l}{2\pi \overline{AN}} - \frac{\rho l}{2\pi \overline{BN}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

La diferencia de potencial entre los puntos M y N será:

$$V_M - V_N = \frac{\rho l}{2\pi} - \left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}} \right) \quad \text{Ecuación (9)}$$

Despejando la resistividad ρ :

$$\rho = \frac{\Delta V}{l} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}} \right)} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Simplificando y llamando K a la segunda fracción, se obtiene como resultado la ecuación que se aplica en campo para cada medición:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde ρ es la resistividad eléctrica en $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$, ΔV es la diferencia de potencial en Voltios, I es la intensidad de corriente en Amperios y K es la constante denominada *coeficiente geométrico del dispositivo*, que es dependiente de la distancia de los cuatro electrodos. Este valor de ρ sería la resistividad real del terreno si fuera homogéneo, no obstante, la ρ obtenida será una mezcla de las resistividades de varios materiales, por lo cual se denomina resistividad aparente (ρ_a).

En la constante K se utilizan diferentes arreglos electródicos (conjunto de cuatro electrodos) entre ellos están: el Schlumberger, Wenner, Wenner-Schlumberger, polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo (Díaz, 2010):

- **Schlumberger:** Es un arreglo simétrico donde la distancia que separa AB debe ser mayor o igual que 5MN, la resistividad aparente está en función de AB/ y su constante geométrica es $K = \pi n (n + 1) a$
- **Wenner:** Este arreglo se distingue porque sus electrodos están alineados a la misma distancia, la constante geométrica es $K = 2. \pi. a$
- **Wenner-Schlumberger:** Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB. El valor de la constante geométrica es: $K = \pi n (n + 1) a$

- **Polo-polo:** Los electrodos B y N están a una gran distancia de los otros dos electrodos A y M. $K = 2.\pi.n.a$
- **Polo-dipolo:** Se distingue porque un electrodo (A) se encuentra a una gran distancia de los otros tres (AMN). $K = 2.\pi. n. a (n+1)$.
- **Dipolo-dipolo:** Los electrodos se encuentran en el orden ABMN formando un doble dipolo. Ecuación: $K = \pi n (n + 1) (n + 2) a$.

Cada uno de los arreglos electródicos presenta aptitudes sobresalientes. Por ejemplo, el arreglo de Schlumberger tiene la facultad de ser más apto en sondeos de profundidad respecto al de Wenner (Ekwe *et al.*, 2006). Se ha identificado que los arreglos de Schlumberger y Wenner son los que definen mejor los niveles horizontales respecto al dipolo-dipolo, con el cual se han estimado ligeras sobreestimaciones en la profundidad de los horizontes (Weinzettel *et al.*, 2009). En el Cuadro 1 se presentan las ventajas y desventajas de los arreglos electródicos comúnmente utilizados.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los arreglos electródicos. Fuente: Daza (2012).

| Tipo de arreglo | Ventajas | Desventajas | Estudios realizados |
|-----------------|---|---|--|
| Wenner | <ul style="list-style-type: none"> - Alta caída de voltaje para una corriente dada. - Fórmula de resistividad aparentemente muy simple. | <ul style="list-style-type: none"> - Requiere mover constantemente los cuatro electrodos. - Más susceptible a irregularidades de la resistividad superficial. - Acoplamiento entre cables. | <ul style="list-style-type: none"> - Batlle-Aguilar <i>et al</i> (2009) - Samouëlian <i>et al</i> (2003) |
| Schlumberger | <ul style="list-style-type: none"> - Requiere mover solo dos electrodos. - Menos susceptible a irregularidades de la resistividad superficial. - Mayor alcance de profundidad. | <ul style="list-style-type: none"> - Baja caída de voltaje para una corriente dada. - Acoplamiento entre cables. - Inverso más susceptible a ruido telúrico. | <ul style="list-style-type: none"> - Bersezio <i>et al</i> (2007) - Shevnin <i>et al</i> (2005) |
| Dipolo-Dipolo | <ul style="list-style-type: none"> - Muy sensible a variaciones de resistividad lateral. - Líneas más cortas para llegar a una profundidad dada. | <ul style="list-style-type: none"> - Baja caída de voltaje para una corriente dada. - Muy susceptible a irregularidades de la resistividad superficial. | <ul style="list-style-type: none"> - Weinzettel <i>et al</i> (2009) - Castro <i>et al</i> (2013) |

La interpretación de la resistividad eléctrica se realiza empleando métodos de inversión que están incluidos en programas de cómputo para obtener los modelos que mejor describan la realidad del terreno con el menor error de ajuste en 1D, 2D y 3D. Algunos de los programas de cómputo que se emplean son el RES2DINV (Besson *et al.* 2004), IPI2WIN y Winsev (Pizarro, 2015), RES2DMOD (Loke, 1999), REXIS (Adli *et al.*, 2010) así como el diseño del programa AXIDIS 3.0 desarrollado a partir de la teoría de resistividad eléctrica (Imhof *et al.*, 2001).

3.3 Casos de estudio con SEV

La resistividad eléctrica se relaciona con el tamaño de partículas, longitud, conectividad de los poros, saturación de agua y temperatura (Samouëlian *et al.*, 2005) proporcionando información sobre las heterogeneidades de las capas en el subsuelo (Kearey *et al.*, 2002). Diferentes estudios han reportado que interviene en la caracterización de vías de flujo preferencial y en la identificación de áreas con mayor compactación donde el contenido de agua es uno de los principales impulsores de la resistividad (Paillet *et al.*, 2010; Wendroth *et al.*, 2006; Weller *et al.*, 2007).

La relación entre la resistividad eléctrica aparente con la infiltración ha sido estudiada empleando diferentes arreglos electródicos (Rucker, 2009) con los cuales se ha reportado que la resistividad del suelo decrece cuando incrementa el contenido de agua (Buvat *et al.*, 2014); se han reportado también correlaciones negativas entre la conductividad hidráulica saturada y la conductividad eléctrica a diferentes profundidades de exploración (Rezaei *et al.*, 2016), así como modelos no lineales entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica (Ozcep *et al.*, 2009).

Los SEV han sido empleados en suelos agrícolas para estudiar la variabilidad espacial de la resistividad eléctrica y las propiedades físicas del suelo (Banton *et al.*, 1997). Empleando el dispositivo de Wenner en un Luvisol háplico se determinó que la resistividad disminuyó con el aumento de la densidad aparente (Besson *et al.*, 2004). El SEV ha sido útil también en el mapeo de suelo mediante la identificación del horizonte arcilloso que presenta

resistividades bajas (Tabbagh *et al.*, 2000). En un sitio de suelo forestal se obtuvieron relaciones significativas entre la resistividad y la capacidad de intercambio catiónico, la humedad y la textura (Paillet *et al.*, 2010). Utilizando el arreglo de Wenner y el dipolo-dipolo se identificaron canales de flujo preferencial que estuvieron asociados a la alta resistividad eléctrica (Leslie y Heinse, 2012). Sinha y colaboradores (2013) realizaron un trabajo donde aplicaron SEV para conocer la geometría subsuperficial de un río, correlacionando la resistividad con la litología para interpretar la estratigrafía subsuperficial. Aunado a este estudio a nivel de cuenca se han empleado en conjunto con los patrones pedológicos para identificar la capa superficial del suelo, una capa con materiales ferruginosos, saprolita no saturada y saprolita saturada, así como la capa correspondiente a la roca (Robain *et al.*, 1996).

Los SEVs en México se han empleado en la estimación de la sensibilidad de la resistividad en función de la saturación de agua para las zonas vadosas (Simón, 1999), han sido útiles en generar herramientas para estimar la concentración de cloruros en el agua subterránea (Peinado-Guevara *et al.*, 2012); así como para conocer la distribución de los estratos de roca en el subsuelo y poder ubicar el sitio para la construcción de un pozo de extracción de recarga artificial de agua (Vences, 2013).

Otros estudios han enfocado los SEVs principalmente en la investigación de la zona vadosa de acuíferos (Steinich *et al.*, 1997), en la obtención de la estratigrafía de una secuencia volcano-sedimentaria a escala de cuenca (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014) y con el propósito de mapear posibles cavidades, delimitar áreas con diferente geología en Coeneo Michoacán, localizar zonas con potencial geotérmico en Ixtlán de los Hervores y para detectar posibles zonas de explotación hídrica (Díaz, 2010). Finalmente, cabe mencionar que se ha empleado prospección geoelectrica para identificar suelos contaminados por hidrocarburos aplicando tomografía eléctrica resistiva (TER) (Shevnin *et al.*, 2005; Arrubarrena-Moreno y Arango-Galván, 2013), la caracterización del patrón estructural de fracturas (Arango-Galván *et al.*, 2011) y la evaluación de índices de susceptibilidad geológica aplicando la técnica de los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (TDEM) (Dena-Ornelas *et al.*, 2011).

Capítulo 4: RESULTADOS

4.1 Clasificación y variación espacial del suelo en una microcuenca forestal del sur de Morelia, Michoacán

4.1.1 Introducción

El 70% del territorio nacional se conforma por bosque de coníferas, encinos y selva caducifolia que cubren gran parte de la Sierra Madre Occidental, Oriental y el Cinturón Volcánico Transmexicano (INEGI, 2016); por lo tanto, gran parte de los suelos del país está bajo vegetación forestal, donde los suelos funcionan como mantenimiento de la biodiversidad y regulación hidrológica, además son la mayor fuente de carbono orgánico (FAO, 2002; Cotler *et al.*, 2016). Uno de los primeros pasos en el estudio de los suelos es describir su morfología y reconstruir procesos edafológicos, características del medio y en muchos casos interpretar la funcionalidad (agricultura, asentamientos humanos, uso forestal) o predecir la respuesta de los suelos ante cambios de uso (Velázquez *et al.*, 2004). En México, los primeros inventarios de suelos se realizaron a partir de 1968 por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), generando información espacial a escala 1:50 000 mediante los criterios de clasificación de suelos de la Leyenda FAO/UNESCO. Posteriormente, entre 1979 y 1983 se realizó el levantamiento nacional a escala 1:1 000 000 y en 1980 se comenzó con un levantamiento edafológico nacional a escala 1:250 000 concluyendo en el año 2000 (INEGI, 2010).

La ubicación geográfica, topografía y climas del país originan suelos complejos (INEGI, 2010), dando origen a la diversidad edafológica que está representada por 28 de los 32 grupos de suelos clasificados con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; Ortiz *et al.*, 2011). Diversos autores han realizado estudios con fines de clasificación en el Centro de México (Alcalá *et al.*, 2001), incorporando procesos evolutivos (Sedov *et al.*, 2003) y la relación de propiedades físicas con respecto a la topografía (Castellanos *et al.*, 2017). Los criterios que se han empleado para el levantamiento

de suelos se basan, primeramente, en la relación geopedológica en donde la dinámica de los ambientes geomorfológicos puede explicar la formación y parte de la variación espacial (Zinck, 2012).

Por otro lado, la descripción de las unidades de suelos también se ha empleado en el modelamiento ecológico (Tan *et al.*, 2005) y como información básica en los procesos de erosión (Bolaños *et al.*, 2016) entre otros. Por lo que es esencial contar con información detallada sobre los suelos con la finalidad de generar modelos con potencial productivo o simulación hidrológica (Colín *et al.*, 2017). En este contexto, los trabajos locales de suelos representan un esfuerzo para hacer predicciones y determinar el uso potencial de los suelos en sitios particulares. Por lo tanto, se espera que la descripción a nivel de microcuenca pueda contribuir en dichos aspectos en futuros trabajos.

La pregunta de investigación que se planteó fue ¿Cómo es la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos en una microcuenca de uso forestal? con la hipótesis de que la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos en la microcuenca estimada con métodos directos, estará influenciada por factores extrínsecos (erosivos) que pueden causar cambios en el relieve y en consecuencia modificar la morfología de los suelos. Por lo tanto, el objetivo fue describir y cuantificar la disposición espacial de las capas u horizontes de los suelos y las propiedades físicas y químicas para establecer un modelo conceptual edafológico de la microcuenca.

4.1.2 Materiales y métodos

Formas de relieve

Las formas de relieve se identificaron mediante la selección de atributos o criterios de homogeneidad (Mendoza y Bocco, 2010), que incluye criterios morfométricos de hipsometría, curvatura de perfil y pendiente que son atributos que pueden aplicarse en cualquier nivel categórico del sistema de clasificación con peso variable (Zinck, 2012).

Para ello, se empleó el modelo digital de elevación (MDE) Lidar tipo terreno resolución 5 metros por pixel, cuadrícula E14A23D4 descargado de la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (www.inegi.org.mx), que proporciona información para modelar alturas y obtener pendientes, generación de curvas de nivel, delimitación de cuencas, entre otros, del cual se derivaron la hipsometría, la curvatura de perfil (geometría de laderas) y las pendientes. Para la generación de los mapas se trabajó con proyección Universal Transversa de Mercator, Datum WGS84 zona 14N utilizando las herramientas de ArcToolbox (Raster Reclass y Raster Surface) en ArcGIS 10.3.

Para obtener la hipsometría (representación de la amplitud del relieve) que permitió observar zonas altas, medias y bajas de la microcuenca, se establecieron rangos de amplitud con base en las condiciones locales del área de estudio (Zinck, 2012), la reclasificación de datos se realizó mediante criterios utilizados en estudios geomorfológicos de la cuenca de Cuitzeo (Mendoza y Bocco, 2010), utilizando diez clases. Se eligieron intervalos de 10 m que expresaron la diferenciación de altitud en la microcuenca (Cuadro 2). La reclasificación de altitud (m) fue la siguiente:

Cuadro 2. Reclasificación de la altitud (m).

| Número de clase | Intervalo de altitud (m) |
|-----------------|--------------------------|
| 1 | 2230 – 2220 |
| 2 | 2220 – 2110 |
| 3 | 2110 – 2200 |
| 4 | 2200 – 2190 |
| 5 | 2190 – 2180 |
| 6 | 2180 – 2170 |
| 7 | 2170 – 2160 |
| 8 | 2160 – 2150 |
| 9 | 2150 – 2140 |
| 10 | 2140 – 2130 |

Conjuntamente se realizó un análisis hipsométrico (Strahler, 1952) que se obtuvo siguiendo los criterios propuestos por Quezada y colaboradores (2010). Se empleó el mismo

MDE Lidar tipo terreno citado anteriormente. Con el recorte correspondiente a la delimitación de la microcuenca se determinó el área entre curvas de nivel y se calcularon la elevación máxima, mínima y las áreas. Posteriormente en el ambiente de programación estadística R 3.4.2 (R Core Team, 2017), se realizaron los cálculos del promedio acumulado en porcentaje. Finalmente, se obtuvo el gráfico de la curva hipsométrica con el porcentaje acumulado y el promedio de las elevaciones en m. Mediante la comparación de la curva obtenida con las curvas teóricas (Quezada *et al.*, 2010) se hizo la interpretación tomando en cuenta: la etapa de desequilibrio erosivo que representa una cuenca geológicamente joven, etapa de equilibrio erosivo que representa una cuenca geológicamente madura y cuenca erosionada en estado de senectud (Campos, 1999).

La pendiente cuyos valores están relacionados con las formas de relieve (García y Lugo, 2003), fue reclasificada empleando cinco clases, para clasificar las unidades inferiores de montañas y lomeríos (superficies cumbrales, laderas) (Priego *et al.*, 2010) las cuales representaron las formas de relieve de la microcuenca (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clases de pendientes en grados.

| Número de clase | Intervalo de pendientes (grados) | Interpretación |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0-2 | Superficies cumbrales |
| 2 | 2-5 | Laderas muy suaves |
| 3 | 5-10 | Laderas suaves |
| 4 | 10-20 | Laderas moderadamente inclinadas |
| 5 | 20-30 | Laderas inclinadas |

Para determinar si la forma de la superficie era cóncava, convexa o recta se utilizó la función de la curvatura. Se obtuvo con la segunda derivada de la superficie de entrada, donde la ecuación corresponde a un polinomio de nueve términos ($Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$), que se ajusta a la submatriz rectangular de elevaciones uniformemente espaciadas, los parámetros de la ecuación se pueden determinar a partir de las nueve elevaciones de la submatriz de 3 x 3. Por lo tanto, las relaciones entre los parámetros de la ecuación se representan de Z_1 a Z_9 , donde Z es el punto central ($x = y = 0$)

y el subíndice representa las nueve elevaciones de la submatriz numeradas sistemáticamente, cada parámetro involucra una distancia (L) entre los puntos de la matriz en las direcciones de fila y columna que debe estar en las mismas unidades que Z (Zevenbergen y Thorne, 1987). Se utilizó la curvatura de perfil (paralela a la pendiente) que indicó la dirección de la pendiente máxima. La interpretación se llevó a cabo de la siguiente manera: valores negativos indicaron superficies convexas, valores positivos representaron superficies cóncavas y un valor de cero indicó superficies rectas.

Se realizó un perfil topográfico longitudinal (A-A´) y cuatro perfiles transversales (B-B´, C-C´, D-D´ y E-E´) con la finalidad de describir las irregularidades del relieve en sentido longitudinal y en sentido transversal cada 20 m, empleando la herramienta Profile Graph en ArcGIS 10.3. Finalmente, para la representación de la cárcava revegetada se utilizó el polígono generado por Rodríguez (2014).

Puntos de muestreo y descripción de suelo

Los puntos de muestreo se seleccionaron con base en el análisis geomorfológico de la microcuenca. En seis puntos se excavaron y describieron perfiles que en lo consecuente se indicarán como P1, P2, P3, P4, P5 y P6. La descripción morfológica de los perfiles se realizó con el manual de descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 1996). En 15 puntos se realizaron barrenaciones tomando muestras de suelo con barrena de sacabocado en intervalos de 20 cm hasta 2.0 m de profundidad, de los cuales cuatro puntos están indicados como P2.B, P4.B, P5.B y P6.B (Figura 9). Esto se realizó con la finalidad de obtener la diferenciación vertical del suelo en diferentes puntos y elegir los sitios para la excavación de los perfiles. El muestreo fue establecido durante los meses de abril y mayo de 2016 correspondientes a la época seca.

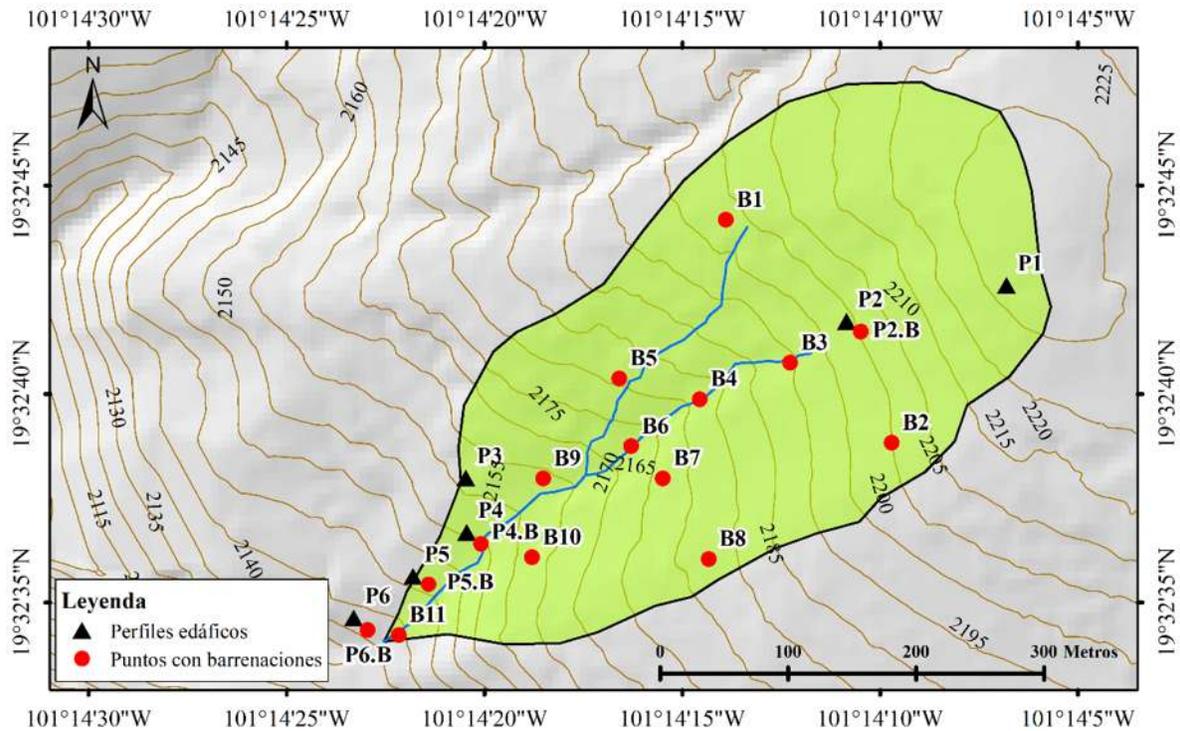


Figura 9. Puntos de muestreo de suelo.

Análisis físicos y químicos de suelo

Las muestras de los perfiles de suelo se secaron a la sombra a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron para obtener la fracción de tierra fina (partículas de 2 mm de diámetro o menos) para realizar los siguientes análisis: la proporción granulométrica fue realizada con el método de Bouyoucos, después se empleó el paquete soil texture (Moeys *et al.*, 2016) en el ambiente de programación estadística R v 3.4.2 para determinar la clase textural en el sistema de la USDA (R Core Team, 2017). La densidad aparente (DA) de cada horizonte se realizó con el método del cilindro (Reynolds *et al.*, 2002), el porcentaje de humedad gravimétrica (Wc) se obtuvo secando suelo a 105 °C hasta obtener un peso constante (DOF, 2000) y el color en seco y húmedo mediante la tabla de colores de suelo Münsell (FAO, 2009).

El pH y la conductividad eléctrica (CE) en una relación suelo-agua (2:1) se midieron con potenciómetro (HACH, SensION 156). El porcentaje de carbono orgánico (CO) y de

materia orgánica del suelo (MO) mediante el método de combustión líquida de Walkley-Black. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) con el método de extracción de acetato de amonio; las bases intercambiables calcio y magnesio (Ca y Mg) se obtuvieron con el método de titulación, mientras que la cantidad de potasio y sodio (K y Na) empleando absorción atómica (DOF, 2000). A las muestras extraídas con barrena se determinó la proporción granulométrica y clase textural, el color, humedad gravimétrica, pH y conductividad eléctrica (CE) de acuerdo con los métodos empleados para las muestras de los perfiles de suelo. Para elaborar los gráficos de color, de humedad gravimétrica, de pH y de CE se empleó el paquete *Algorithms for Quantitative Pedology (AQP)* para R (Beaudette *et al.*, 2012).

Clasificación y variación espacial de los suelos

Se realizó la clasificación de los suelos de acuerdo con los lineamientos propuestos por la (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). La propuesta de la variación espacial del suelo se presenta mediante un mapa, la determinación de los límites entre suelos se realizó con base en los perfiles y en los puntos donde se realizaron barrenaciones, el análisis geomorfológico, así como las observaciones de campo.

4.1.3 Resultados

Formas de relieve de la microcuenca

La hipsometría indicó que la microcuenca es una unidad hidrológica donde el 43% de la altitud se encuentra entre 2230 y 2200 m, seguida por un 41% que corresponde a elevaciones entre 2200 y 2170 m mientras que sólo el 16% presenta altitudes entre 2170 y 2130 m. El 50.1% de las pendientes tienen inclinación entre 5-10°, 44.8% entre 10-20°, 4.9% entre 2-5° y sólo 0.3% entre 0-2°. De acuerdo con la geometría de laderas 87% de las pendientes fueron rectas y sólo 13% del área correspondió a laderas cóncavas y convexas (Figura 10). Se identificaron cuatro unidades geomorfológicas indicando que 47% de la microcuenca presenta laderas rectas suaves, seguida por 42% que se conforma por laderas rectas muy suaves, mientras que 8% del área se representó por las superficies cumbreales y sólo 3.0% representó laderas cóncavas con inclinación moderada (Figura 11).

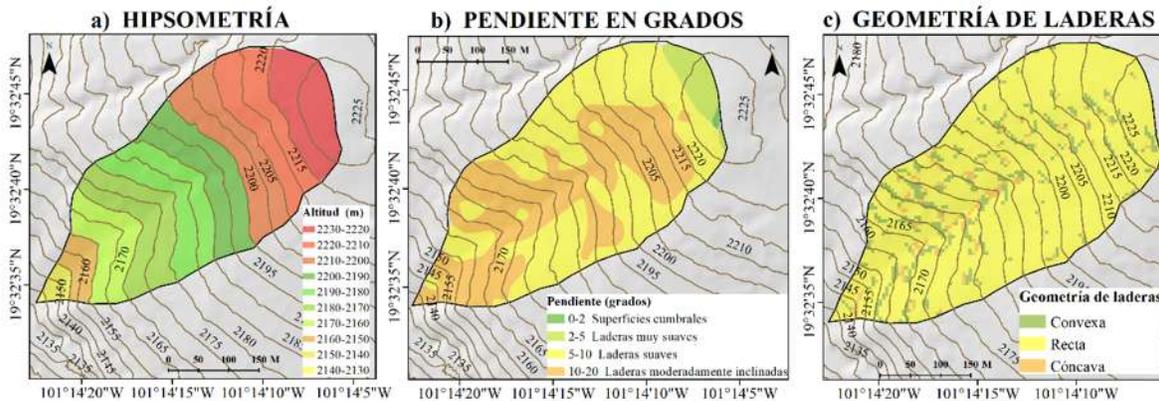


Figura 10. a) Hipsometría reclasificada. b) Pendiente en grados reclasificada. c) Geometría de laderas.

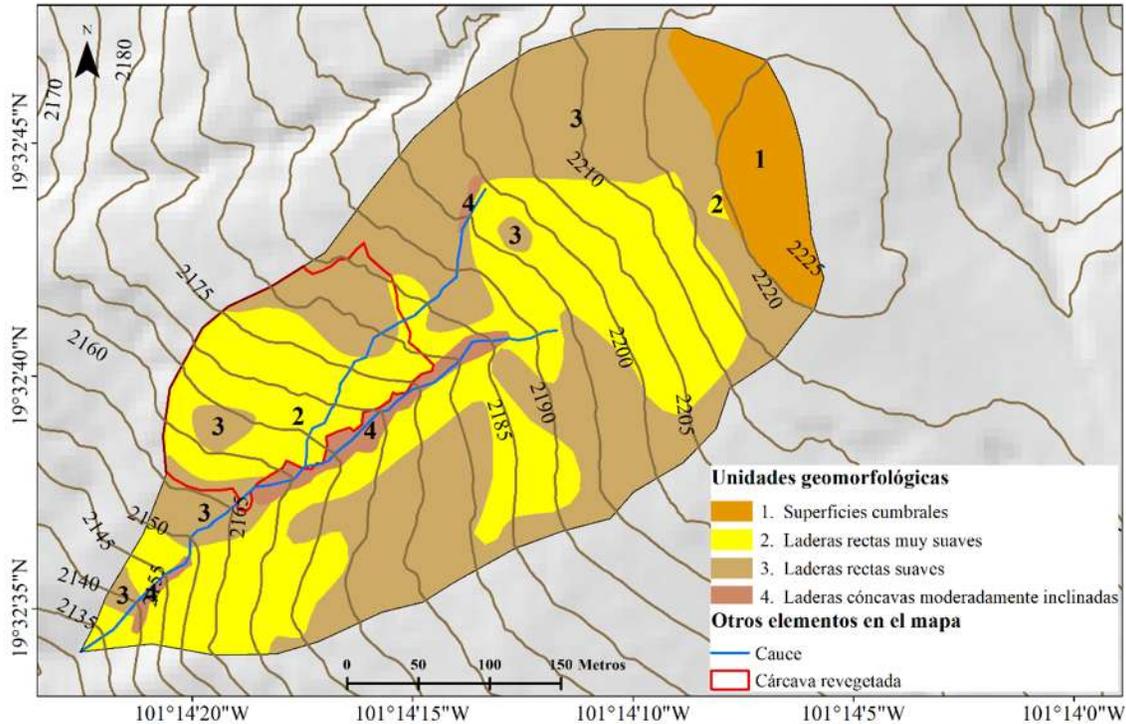
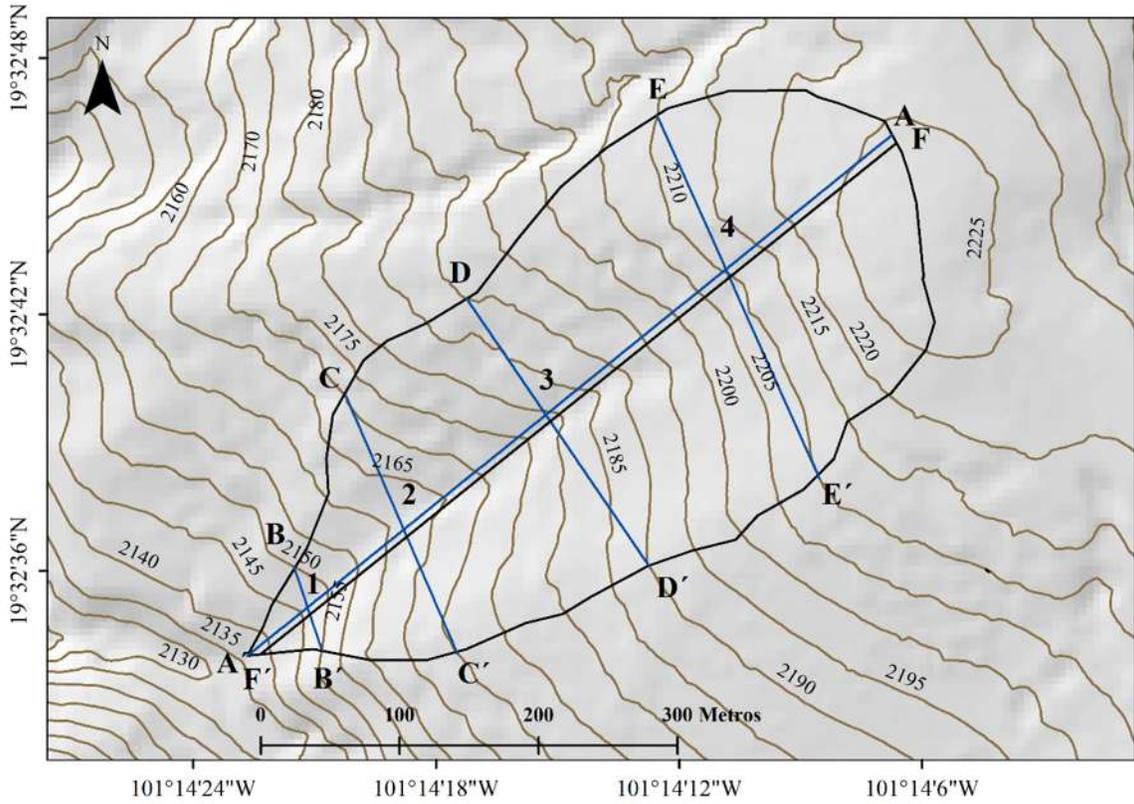


Figura 11. Unidades geomorfológicas de la microcuenca.

La curva hipsométrica y el perfil topográfico longitudinal indicaron que la microcuenca es una unidad geológicamente joven; el tipo de curva refleja un potencial erosivo alto semejando una cuenca de meseta, evidencia de la erosión fue la cárcava revegetada que abarcó 15% del total del área de la microcuenca y la forma de los perfiles topográficos transversales (uno, dos y tres) que indicaron erosión en distinto grado por la forma ligeramente cóncava en comparación con la parte alta, donde se observó parte del relieve en condiciones más cercanas a las originales con forma convexa. Por otra parte, los perfiles topográficos transversales indicaron un relieve en forma de cuña, además se determinó que, de acuerdo con la configuración, los valles y los parteaguas son asimétricos (Figura 12).



Pefil topográfico longitudinal

Perfiles topográficos transversales

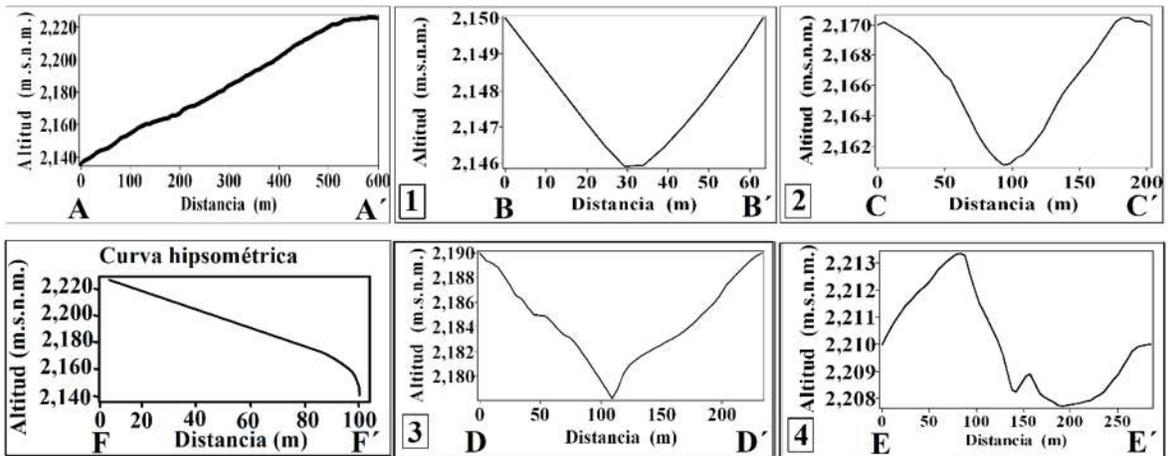


Figura 12. Perfiles topográficos y curva hipsométrica de la microcuenca.

Descripción morfológica de los suelos

Los suelos presentaron un horizonte O superficial que fue continuo con un espesor de seis cm en las partes alta y media de la microcuenca; producto de la acumulación de hojas sueltas y ligeramente descompuestas, así como residuos orgánicos muy descompuestos; donde el estrato arbóreo es más denso y tres cm de espesor en la parte baja con estrato arbustivo. La morfología de los Perfiles P1 y P2 presentó la misma secuencia de horizontes (Ah-Ah2-Ah3-Bt-BC-Cw), en el P3 se describieron tres horizontes con secuencia: B-Cw1-Cw2, en la parte baja suelos someros de espesor variable con secuencias diferentes de horizontes, en el P4 y P6 la secuencia de los horizontes fue; AC-Cw y en el P5 A-AC-Cw (Anexo 1).

En la superficie de los suelos dominó la estructura en bloques subangulares biogénicos fuertemente desarrollada y muy estable; con actividad biológica intensa (raíces finas muy abundantes, canales de bioturbación y larvas de insectos). El pH fue ligeramente ácido (homogéneo en todo el perfil) y con textura franco arcillo arenosa. A mayor profundidad se observó suelo originado por material piroclástico con un horizonte árgico (mayor a 50 cm) que presentó estructura en bloques subangulares moderadamente desarrollada, revestimientos de arcilla y porcentajes de arcilla entre 48% y 83% en la parte más profunda (Anexo 1).

Los suelos originados sobre el afloramiento de ignimbrita fueron someros (menores de 25 cm de profundidad). La estructura del horizonte superficial de estos suelos se presentó en bloques angulares fuertemente desarrollada (P4, P5) y moderadamente desarrollada en el P6 con poros biogénicos. Presentaron densidad extremadamente alta de raíces finas en los horizontes superficiales que disminuyó con la profundidad; además de los numerosos poros finos y muy finos dentro y entre agregados en los horizontes superficiales que también disminuyeron con la profundidad (Anexo 1).

Propiedades físicas y químicas de los suelos

La granulometría indicó que los suelos de la microcuenca están representados por cinco clases texturales. La textura franca, arcillo limosa, franco arcillosa y franco arcillo limosa se presentaron en los horizontes superficiales y la textura arcillosa en los subsuperficiales, cabe mencionar que sólo el P3 tuvo textura arcillosa en todo el espesor del suelo, ya que forma parte de los suelos erosionados cercanos a la cárcava. La densidad aparente (DA) varió en un intervalo de 0.85 a 1.49 gr cm⁻³, los valores bajos fueron del horizonte superficial, lo cual indica que es un suelo poroso, bien aireado, con buen drenaje y con facilidad para la penetración de raíces. La DA con los valores mayores a 1.0 gr cm⁻³ identificaron suelos más compactos, con drenaje y aireación deficiente, así como una lenta permeabilidad. El porcentaje de humedad gravimétrica (Wc) aumentó con la profundidad en los Perfiles P1, P3, P4 y P6, en el resto de los perfiles los valores fueron más homogéneos (Cuadro 4).

Se identificó color marrón, marrón rojizo oscuro y marrón oscuro (7.5 YR 4/3, 5 YR 3/2, 10 YR 3/3) en la superficie del suelo en los Perfiles P1, P2, P3 y P4. A mayor profundidad, en el horizonte Bt de los Perfiles P1 y P2 se observó un color rojizo (2.5 YR 4/6), donde predominaron las condiciones aerobias favoreciendo la oxidación de los minerales del hierro. En la parte baja de la microcuenca (P5 y P6) se observó un color gris rojizo y marrón ligeramente verdoso (5 YR 5/2 y 2.5 Y 5/6) indicando que el suelo está favorecido por procesos de reducción de los minerales donde, además destacó el estado anaerobio del suelo (Figura 13).

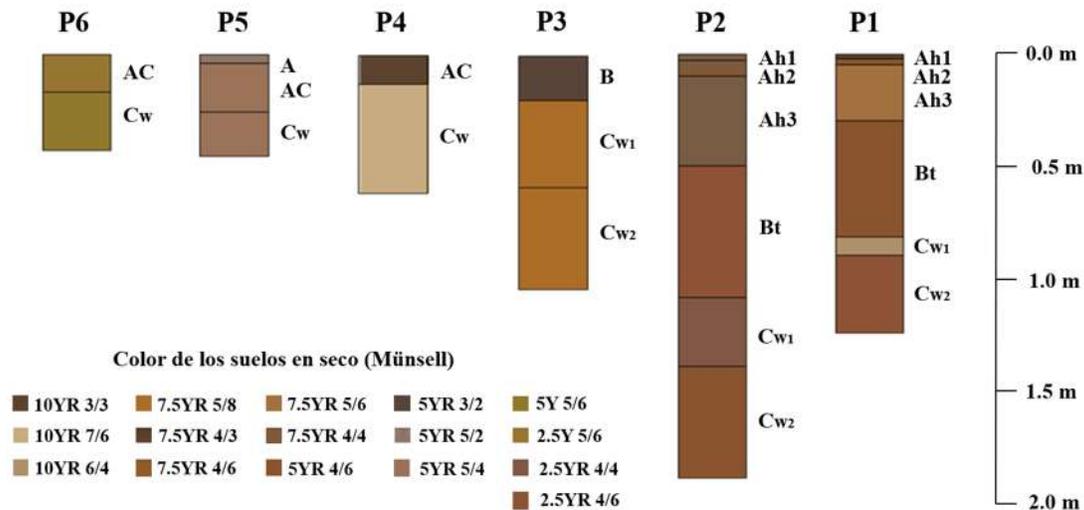


Figura 13. Color de los suelos en seco.

En la mayoría de los puntos con barrenaciones, se determinaron colores marrón y marrón oscuro (7.5 YR 4/2, 7.5 YR 5/6) se observaron a diferentes profundidades y al igual que en el los perfiles se identificaron colores rojizos (2.5 YR 6/4, 2.5 YR 6/6) que correspondieron a muestras con profundidad mayor a 0.5 m en los puntos P2.B, B1, B2, B3, B4 y B5. Los puntos P4.B, P5.B y P6.B presentaron color gris claro y gris ligeramente verdoso (5Y 7/2 y 10Y 8/1) que fueron diferentes al resto de los puntos de muestreo, ya que son suelos influenciados por agua freática. La Wc varió entre 10% y 60% en los puntos de muestreo y aumentó con la profundidad. Diez de los puntos presentaron Wc entre 40% y 50% de los cuales el punto B5 fue el más alto. El resto de los puntos presentaron Wc menor al 30% y no se observó una tendencia de disminución con la profundidad (Figura 14).

Cuadro 4. Propiedades físicas de los perfiles edáficos.

| Horizonte genético | Profundidad | A | L | R | Clase textural | DA | Wc |
|--------------------|-------------|-------|----|-------|-----------------------|--------------------|------|
| Perfil 1 (P1) | cm | % | % | % | USDA | g cm ⁻³ | % |
| Ah | 0-2 | 52.04 | 28 | 19.96 | Franca | 0.85 | 14.6 |
| Ah2 | 2-5 | 40.04 | 26 | 33.96 | Arcillo limosa | 0.92 | 21.5 |
| Ah3 | 5-30 | 38.04 | 30 | 31.96 | Arcillo limosa | 0.91 | 22.9 |
| Bt | 30-82 | 4.04 | 16 | 79.96 | Arcillosa | 1.08 | 27.3 |
| BC | 82-90 | 12.04 | 24 | 63.96 | Arcillosa | 1.24 | 31.8 |
| Cw | 90-125 | 30.04 | 16 | 53.96 | Arcillosa | 1.13 | 38.6 |
| Perfil 2 (P2) | | | | | | | |
| Ah | 0-3 | 59.88 | 20 | 20.12 | Franco arcillo limosa | 0.90 | 31.8 |
| Ah2 | 3-10 | 19.88 | 34 | 46.12 | Franco arcillo limosa | 1.24 | 26.1 |
| Ah3 | 10-50 | 23.88 | 28 | 48.12 | Franco arcillosa | 1.20 | 24.6 |
| Bt | 50-109 | 7.88 | 26 | 66.12 | Arcillosa | 1.38 | 27.9 |
| BC | 109-140 | 21.88 | 32 | 46.12 | Arcillosa | 1.23 | 32.0 |
| Cw | 140-190 | 19.88 | 32 | 48.12 | Arcillosa | 1.25 | 31.4 |
| Perfil 3 (P3) | | | | | | | |
| B | 0-20 | 32.96 | 12 | 55.04 | Arcillosa | 1.49 | 30.2 |
| Cw1 | 20-59 | 18.96 | 26 | 55.04 | Arcillosa | 1.43 | 33.3 |
| Cw2 | 59-105 | 18.96 | 26 | 55.04 | Arcillosa | 1.33 | 38.5 |
| Perfil 4 (P4) | | | | | | | |
| AC | 0-13 | 15.32 | 40 | 44.68 | Franco arcillosa | 1.09 | 27.2 |
| Cw | 13-62 | 13.32 | 30 | 56.68 | Arcillosa | 1.26 | 34.1 |
| Perfil 5 (P5) | | | | | | | |
| A | 0-4 | 69.88 | 10 | 20.12 | Franco arcillo limosa | 0.63 | 35.4 |
| AC | 4-26 | 17.88 | 34 | 48.12 | Arcillosa | 1.29 | 20.0 |
| Cw | 26-46 | 15.88 | 38 | 46.12 | Arcillosa | 1.44 | 22.4 |
| Perfil 6 (P6) | | | | | | | |
| AC | 0-17 | 18.96 | 36 | 45.04 | Arcillosa | 1.29 | 23.0 |
| Cw | 17-43 | 12.96 | 36 | 51.04 | Arcillosa | 1.27 | 31.4 |

Textura: A = arena. L = limo. R = arcilla. DA = densidad aparente. Wc = Humedad gravimétrica.

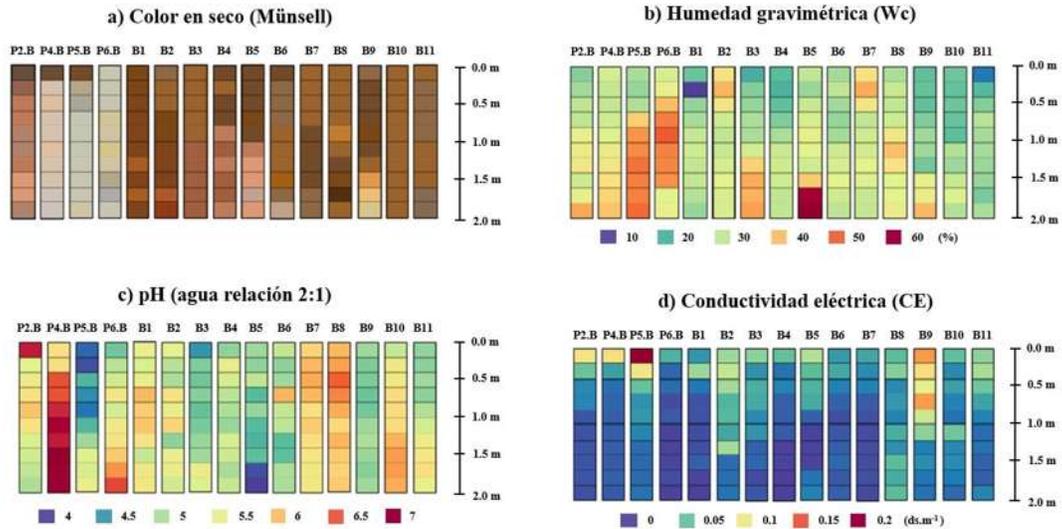


Figura 14. Propiedades físicas y químicas de los suelos en puntos de muestreo con barrenaciones.

En los suelos los valores de pH se concentraron en un intervalo de 5.96 a 4.44. Los valores más bajos (fuertemente ácidos) se reportaron en el P5 y en el horizonte Ah3 del P1, en comparación con el resto donde el pH fue más homogéneo y mayor a 5 (moderadamente ácidos) (Cuadro 5). En los puntos muestreados con barrena el pH varió de 6.86 a 4.37, los puntos B1, B7, B8, B10 y P6.B, presentaron acidez moderada y sólo los puntos P4.B a partir de 0.8 m y P2.B en la superficie indicaron suelos neutros. El resto de los puntos presentaron acidez fuerte (Figura 14). Lo anterior de acuerdo con la clasificación de pH (DOF, 2002). La CE de los perfiles varió entre 0.01 y 0.38 dS m^{-1} y en los puntos con barrena los valores se concentraron en un intervalo de 0.006 a 0.1 dS m^{-1} indicando que los suelos no están influenciados por salinidad (DOF, 2002) sin embargo, se observó que la CE disminuyó con la profundidad tanto en los perfiles como en los puntos muestreados con barrena (Figura 14 y Cuadro 5).

Los suelos indicaron alto contenido de CO y MO en los horizontes superficiales y disminuyó con la profundidad. Los valores más altos de CO y MO correspondieron al relieve original (P1 y P2), posiblemente por las diferencias extrínsecas como la cantidad de vegetación presente en los puntos de muestreo. Además, se observó que los Perfiles P3, P4,

P5 y P6 presentaron una disminución considerable de CO y MO en todo el espesor de suelo. La CIC de los suelos varió entre 15.54 y 41.07 cmol kg^{-1} , de los cuales los valores entre 15 y 25 cmol kg^{-1} indicaron una CIC media, los valores entre 25 y 40 cmol kg^{-1} presentaron CIC alta, y sólo el valor de 41.07 cmol kg^{-1} indicó una CIC muy alta (DOF, 2002) (Cuadro 5).

Por otra parte, la mayoría de los suelos presentaron un contenido bajo de calcio (Ca), con excepción de algunos horizontes cuyo contenido fue alto ($> 10 \text{ cmol kg}^{-1}$) y medio (7.56 cmol kg^{-1}). Todos los suelos mostraron contenido alto de magnesio (Mg) y bajo contenido de potasio (K) y sodio (Na) (DOF, 2002). Finalmente, SB varió entre 25.93 y 91.80% para todos los suelos presentando los valores más altos en el P2 y los más bajos en el P3 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Propiedades químicas de los perfiles edáficos.

| Horizonte genético | Profundidad | pH | CE | CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|--------------------|-------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|------|------|-------|
| Perfil 1 (P1) | cm | H ₂ O | dS m ⁻¹ | % | % | ----- | cmol kg ⁻¹ | ----- | | | % |
| Ah | 0-2 | 5.37 | 0.18 | 19.49 | 25.30 | 27.75 | 16.20 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 82.48 |
| Ah2 | 2-5 | 5.13 | 0.11 | 10.14 | 13.16 | 22.20 | 1.08 | 9.72 | 0.03 | 0.18 | 49.58 |
| Ah3 | 5-30 | 4.79 | 0.10 | 10.92 | 14.17 | 18.87 | 3.24 | 3.24 | 0.03 | 0.19 | 35.50 |
| Bt | 30-82 | 5.55 | 0.03 | 1.87 | 2.43 | 21.09 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.19 | 36.84 |
| BC | 82-90 | 5.79 | 0.02 | 1.40 | 1.82 | 22.20 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.20 | 35.06 |
| Cw | 90-125 | 5.96 | 0.02 | 2.34 | 3.04 | 24.42 | 1.08 | 5.40 | 0.02 | 0.18 | 27.33 |
| Perfil 2 (P2) | | | | | | | | | | | |
| Ah | 0-3 | 5.96 | 0.38 | 21.05 | 27.32 | 35.52 | 19.44 | 12.96 | 0.03 | 0.17 | 91.80 |
| Ah2 | 3-10 | 5.19 | 0.16 | 8.58 | 11.13 | 28.86 | 2.16 | 11.88 | 0.03 | 0.20 | 49.44 |
| Ah3 | 10-50 | 5.61 | 0.10 | 4.68 | 6.07 | 22.20 | 2.16 | 10.80 | 0.03 | 0.18 | 59.31 |
| Bt | 50-109 | 5.03 | 0.03 | 2.34 | 3.04 | 41.07 | 2.16 | 10.80 | 0.02 | 0.18 | 32.05 |
| BC | 109-140 | 5.59 | 0.02 | 1.87 | 2.43 | 23.31 | 1.08 | 10.80 | 0.02 | 0.18 | 51.83 |
| Cw | 140-190 | 5.57 | 0.02 | 1.56 | 2.02 | 31.08 | 1.08 | 11.88 | 0.02 | 0.18 | 42.33 |
| Perfil 3 (P3) | | | | | | | | | | | |
| B | 0-20 | 5.80 | 0.02 | 3.90 | 5.06 | 22.20 | 1.08 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 34.99 |
| Cw1 | 20-59 | 5.71 | 0.01 | 1.25 | 1.62 | 28.86 | 3.24 | 5.40 | 0.03 | 0.21 | 30.76 |
| Cw2 | 59-105 | 5.67 | 0.01 | 1.25 | 1.62 | 29.97 | 3.24 | 4.32 | 0.02 | 0.19 | 25.93 |
| Perfil 4 (P4) | | | | | | | | | | | |
| AC | 0-13 | 5.80 | 0.14 | 8.58 | 11.13 | 27.75 | 7.56 | 5.40 | 0.03 | 0.19 | 47.50 |
| Cw | 13-62 | 5.89 | 0.06 | 2.18 | 2.83 | 21.09 | 4.32 | 4.32 | 0.03 | 0.20 | 42.04 |
| Perfil 5 (P5) | | | | | | | | | | | |
| A | 0-4 | 4.44 | 0.32 | 2.03 | 2.63 | 25.53 | 7.56 | 7.56 | 0.03 | 0.18 | 60.05 |
| AC | 4-26 | 5.00 | 0.09 | 4.68 | 6.07 | 22.20 | 4.32 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 49.58 |
| Cw | 26-46 | 4.86 | 0.07 | 2.03 | 2.63 | 15.54 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.19 | 50.04 |
| Perfil 6 (P6) | | | | | | | | | | | |
| AC | 0-17 | 5.88 | 0.02 | 5.85 | 7.59 | 23.31 | 4.32 | 3.24 | 0.02 | 0.18 | 33.31 |
| Cw | 17-43 | 5.97 | 0.01 | 2.03 | 2.63 | 24.42 | 4.32 | 4.32 | 0.02 | 0.18 | 36.21 |

CE = Conductividad eléctrica. CO = Carbono orgánico MO = Materia orgánica. CIC = Capacidad de intercambio catiónico. Ca = Calcio Mg = Magnesio. K = Potasio. Na = Sodio. SB = Saturación de bases.

Clasificación y variación espacial del suelo

Los criterios que llevaron a clasificar el horizonte cámbico en el P1 fueron la textura arcillo limosa, la estructura en bloques subangulares y un espesor de 30 cm a partir de la superficie. En el P2 los criterios de clasificación correspondieron a la textura franco arcillosa, la estructura en bloques subangulares y un espesor de 50 cm a partir de la superficie y en el P3 la textura arcillosa, la estructura en bloques subangulares y un espesor de 59 cm a partir de la superficie.

La presencia del horizonte cámbico fue el criterio para clasificar el grupo de primer nivel, posteriormente el calificador del segundo nivel se nombró como háplico, ya que no aplican calificadores típicamente asociados ni integrados. En la parte baja de la microcuenca el P4, P5 y P6 clasificaron como Regosol por no cumplir con los criterios de clasificación de otros suelos, de igual forma el calificador del segundo nivel se clasificó como háplico porque no aplicaron otros calificadores.

En el mapa de suelos 97% del área de la microcuenca correspondió a un Cambisol háplico (CM ha) y sólo 3% a un Regosol háplico (RG ha) (Figura 15). Los suelos se desarrollaron sobre las mismas condiciones climáticas y en su mayoría con la misma vegetación forestal. La erosión por cárcavas en la zona dejó expuesta la ignimbrita en la parte baja de la microcuenca que ha originado los Regosoles háplicos. Es conveniente mencionar que en los Cambisoles háplicos se debe conservar la vegetación ya que además de contribuir en las propiedades físicas y químicas del suelo es una parte fundamental en la captación de agua que infiltra a través los suelos.

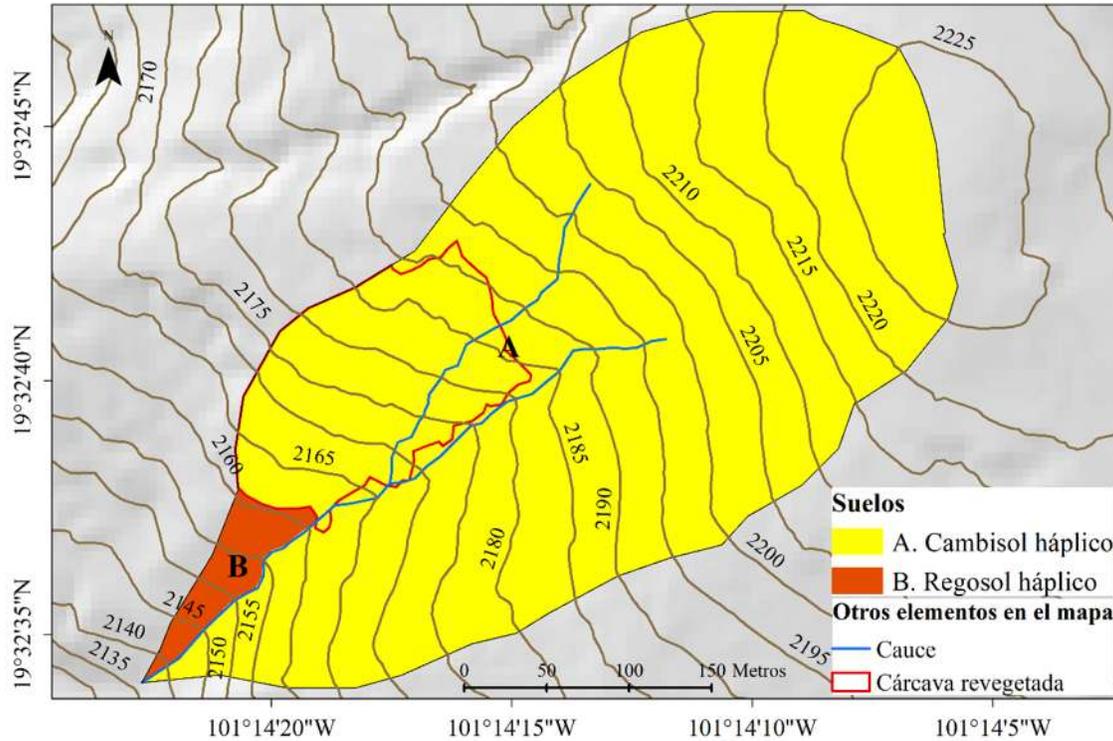


Figura 15. Variación espacial del suelo de la microcuena.

4.1.4 Discusión

Formas de relieve

Mediante los perfiles topográficos se obtuvo información de las formas de relieve que dominan la microcuena. De acuerdo con la hipsometría los cambios en el relieve se han originado en un intervalo relativamente corto de altitud. La pendiente en este caso ha favorecido la formación de cauces efímeros clasificados como barrancos (Ortiz, 1990). Por otro lado, el análisis hipsométrico indicó que se trata de una microcuena joven geológicamente sujeta a un ciclo erosivo activo, donde la forma convexa sugiere que gran proporción está ubicada en altitudes entre 2040 y 2220 m con erosión alzada posteriormente disectada, donde todavía dominan el alzamiento de la superficie o de las rocas (Quezada *et al.*, 2010).

La erosión que se observó en la microcuenca corresponde con lo reportado por Zepeda *et al* (2010) quienes mencionan que la erosión por cárcavas está presente en el 2.15% de la cuenca del Lago de Cuitzeo, indicando que la mayor distribución espacial de cárcavas se encuentra hacia el sur y suroeste de la cuenca, que se forman sobre materiales piroclásticos con diferente nivel de evolución como los que se presentan donde se ubica la microcuenca (Servenay y Prat, 2003).

Propiedades físicas y químicas del suelo

La textura de los suelos fue principalmente arcillosa en el endopedón que le otorga al suelo mayor microporosidad aumentando la compactación y mejorando el flujo matricial (Alaoui *et al.*, 2017), el epipedón se relacionó con textura franca y franco limosa. Las texturas francas y la DA le brindan porosidad y permeabilidad al suelo (Campos *et al.*, 2001). La DA de los suelos aumentó con la profundidad lo que concuerda con la textura media en la superficie y fina a mayor profundidad. Los resultados de textura y DA son similares a otros estudios de suelos volcánicos con propiedades ándicas en el CVT (Prado *et al.*, 2007).

La humedad gravimétrica indicó que los suelos en la superficie tienen mayor capacidad para almacenar agua en comparación con el epipedón, influyendo en esta propiedad la dinámica del manto freático. Al respecto, en un estudio hidrológico realizado en la microcuenca, Jiménez (2016) reportó agua en el horizonte Bt cercano al P2 en época seca, confirmando que la humedad del suelo además de las propiedades intrínsecas está influenciada por el manto freático. La Wc es altamente variable y depende de la temporalidad donde intervienen factores extrínsecos como la evapotranspiración, la precipitación (Geris *et al.*, 2017) y la absorción de agua de las raíces (Kumar *et al.*, 2013), sin embargo, en este trabajo no se abordó la dinámica de la humedad del suelo. El pH indicó que se trata de suelos ácidos cuyo rango para los perfiles y barrenaciones fue de 4.37 a 6.86, variando con la profundidad. La acidez severa del P5 fue similar a lo reportado en suelos jóvenes por Peña-Ramírez *et al* (2009) mientras que la acidez encontrada en el horizonte Ah3 del P1 concuerda con lo reportado por Campos *et al* (2001) para el mismo horizonte en Cofre de Perote, Veracruz, localizado dentro del CVT.

Adicionalmente, se ha mencionado que el rango de pH de 4 a 6.5 puede originarse de la MO, y en un intervalo de pH entre 5 y 7 se presenta el alófono propio de Andosoles (Alcalá *et al.*, 2001), por lo que en la mayoría de los puntos de muestreo el pH está influenciado por MO. En los puntos B8 y B10 es más probable que esté influenciado por las características de los Andosoles, que coincide con las propiedades ándicas que presentaron en todo el espesor dichos puntos. Por otro lado, la CE se relacionó con el pH ácido que disminuyó con la profundidad.

La alta cantidad de CO y MO en el horizonte Ah podría relacionarse con el predominio de ácidos húmicos negros presentes en suelos de cenizas volcánicas (Shindo *et al.*, 2004). Esta propiedad disminuyó con la profundidad que concuerda con lo reportado por Thiers y colaboradores (2014), sin embargo, el valor máximo de MO fue 4.5% más alto con respecto a otros trabajos donde estudiaron suelos con propiedades ándicas (Grisson *et al.*, 2016), lo que puede deberse a las condiciones intrínsecas del sitio de estudio, ya que esta propiedad se relacionó con la CIC alta en horizontes superficiales. Además, se observó que no hay una relación directa entre la CIC y el pH, y los valores reportados son similares a los mencionados por Prado *et al* (2007) para un Cambisol dístico de una cuenca en Valle de Bravo en el CTV. Sin embargo, se han reportados valores de hasta 47.13 cmol kg^{-1} en el horizonte A de suelos volcánicos (Putra *et al.*, 2015).

Aunado a lo anterior, el Ca y Mg presentaron valores más altos que los reportados en otros estudios para suelos volcánicos. Esto puede deberse en parte a la fuerte actividad biológica y complejos organominerales de los horizontes superficiales como lo menciona Gómez-Tagle (2008). Además, se conoce que el Mg está presente en los minerales arcillosos, y probablemente puede estar influenciando el tipo de arcilla, por lo que sería conveniente contar con estudios posteriores del tipo de arcilla y mineralógicos para poder corroborar los resultados de las bases intercambiables obtenidas en el presente trabajo, así como la composición química del material parental. Por otro lado, los valores del K y Na estuvieron dentro de los rangos reportados por Kleber *et al* (2004) y Uwitonze *et al* (2016). La SB fue más alta en los horizontes superficiales, los valores mayores a 80% fueron similares a los reportados en un Cambisol de Córdoba, Veracruz (Bautista *et al.*, 1998) y en horizontes

superficiales de Andosoles (Kleber *et al.*, 2004). La textura arcillosa en los Cambisoles háplicos le brinda al suelo mayor capacidad de retención de agua debido a la cantidad de microporosidad (Porta *et al.*, 1999). Los Cambisoles con alta saturación de bases como el caso de los suelos de la microcuenca en zonas templadas se consideran como los más productivos (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

Variación espacial de los suelos

Los suelos han evolucionado en condiciones climáticas similares a las actuales formando un horizonte árgico similar al reportado en el CVT por Sedov y colaboradores (2003). Son susceptibles a erosión por cárcavas reportadas al sur de Morelia (Servenay y Prat, 2003) que han originado cambios en la morfología de los suelos descritos. Por lo tanto, en la microcuenca la morfología de los suelos depende de la posición topográfica. Se determinó que de los seis perfiles descritos únicamente los Perfiles P1 y P2 fueron similares en la morfología y secuencia de horizontes de acuerdo con lo reportado por Gómez-Tagle (2008), el resto de los perfiles edáficos presentó cambios en la morfología, profundidad y secuencia de horizontes.

La morfología de los suelos indicó que la actividad biológica por macrofauna contribuye en la formación de macroporos, que influyen en la infiltración de agua (Zimmerman y Elsenbeer, 2009), al respecto los estudios de infiltración en la microcuenca sugieren que este proceso hidrológico está relacionado con la vegetación (Rodríguez, 2014), haciéndose evidente la importancia de conservar la cobertura vegetal con el fin de que los suelos no pierdan la funcionalidad antes mencionada. Por otro lado, la estructura granular y la porosidad de los horizontes superficiales (epipedón) brindan mayor permeabilidad (Alcalá *et al.*, 2001), que contrasta con el endopedón, cuyas características redoximórficas, recubrimientos de arcilla fueron similares a lo reportado por Sedov *et al* (2001).

Finalmente, las características del horizonte Cw determinaron que la roca es impermeable, similar a lo reportado por González *et al* (2006). Los Cambisoles identificados en mayor porcentaje en la microcuenca coincidieron con los reportados por Gómez-Tagle

(2008) en la zona de estudio. Sin embargo, difieren de los suelos reportados por DETENAL (1979) en una escala 1:50 000 ya que para la zona se reportan Acrisoles, estos suelos presentan un horizonte árgico con una CIC menor de 24 cmol kg^{-1} y una saturación de bases menor de 50%, los perfiles clasificados en este trabajo no cumplen con dichos criterios, aunque es importante resaltar que presentan un horizonte de textura arcillosa producto de iluviación.

Los Cambisoles en general constituyen buenas tierras agrícolas, aunque también se encuentran bajo uso forestal (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Para el caso de los Cambisoles de la microcuenca se considera de importancia conservar la vegetación forestal ya que cumple una función importante en la captación de agua de lluvia (Gómez-Tagle *et al.*, 2015). Por otro lado, los Regosoles son suelos débilmente desarrollados, que se encuentran en zonas erosionadas como es el caso de la microcuenca que se encuentra en una de las zonas donde se presenta erosión por cárcavas (Servenay y Prat, 2003) lo mejor para estos suelos es dejarlos bajo bosque (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

4.1.5 Conclusiones

Los resultados del presente trabajo demostraron que en el relieve donde se ubica la microcuenca se han originado incisiones que dieron lugar a los cauces efímeros, originando una microcuenca geológicamente joven con potencial erosivo; donde se desarrollaron suelos poligenéticos en la parte alta, que a consecuencia de la cárcava se ha modificado negativamente la morfología de los suelos perdiendo de forma gradual el endopedón en la parte media y baja de la microcuenca. El análisis geomorfológico ayudó a dar una interpretación del desarrollo de los suelos ya que está controlando la profundidad, el espesor del suelo y la distribución de las propiedades físicas y químicas como; el porcentaje de humedad, textura y materia orgánica.

Se obtuvo el modelo conceptual de los suelos que fue representado por un mayor porcentaje de Cambisoles Háplicos. Identificando suelos profundos y de mayor evolución sobre el relieve original hacia la parte alta de la microcuenca y suelos autóctonos en proceso

de formación a partir del afloramiento de ignimbrita localizado en la parte baja de la microcuenca. Mediante la evaluación de la morfología se determinó que es importante la conservación de la vegetación debido a que influye en la infiltración, y que además actúa como soporte para que el suelo no pierda las propiedades actuales y sea susceptible a los procesos erosivos. Este trabajo permitió obtener la variación espacial de los suelos que no está reportada en la información generada por instituciones encargadas de la cartografía del país. Lo cual es importante porque es necesario incluir los cambios locales cuando se trabaja en áreas pequeñas como es el caso de la microcuenca. Este trabajo puede ser de utilidad en proyectos a largo plazo en el área de estudio entre ellos el hidrológico, ya que está ubicada en la zona de importancia hidrológica y forestal dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, por lo que se deben tomar medidas para evitar un cambio de uso de suelo no sólo en la microcuenca sino en zonas cercanas, tomando en cuenta la susceptibilidad de los suelos para perder su funcionalidad actual.

4.2 Caracterización de suelos de origen volcánico empleando sondeos eléctricos verticales en una microcuenca del centro de México

4.2.1 Introducción

Tradicionalmente, los levantamientos de suelos se basan en la excavación de perfiles, la descripción y el análisis de muestras en el laboratorio (Greiner *et al.*, 2017) y barrenas para la extracción de muestras alteradas de suelo (Legros, 2005); en este proceso la variación espacial y vertical de los suelos está controlada por el material parental, el relieve, el clima, los organismos, el tiempo y los procesos geomorfológicos (Sinowski y Auerswald, 1999). Por lo tanto, la determinación del patrón de la distribución de suelos es importante en la sostenibilidad de ecosistemas (Burbano-Orjuela, 2016) y en estudios hidropedológicos (Lin *et al.*, 2005). Sin embargo, estos métodos resultan costosos y son altamente demandantes en tiempo y esfuerzo; aunado a que generalmente no se presenta la variación vertical de los suelos de la cual existe poca información cuantitativa (Vanwalleghem *et al.*, 2010); debido a la falta de resolución de la información de las propiedades del suelo que restringe la predicción de funciones en el ámbito ecológico, agrícola y geológico (Liao *et al.*, 2014). Por ello, los métodos geoelectrónicos han llamado la atención de diversos grupos de trabajo en todo el mundo (Brunet *et al.*, 2010; Mostafa *et al.*, 2017). Uno de ellos es el sondeo eléctrico vertical (SEV), que permite medir la resistividad eléctrica aparente utilizando arreglos electródicos lineales con electrodos de emisión y recepción (Auge, 2008).

Los valores de resistividad en el suelo constituyen un reto en el análisis de la prospección eléctrica; debido a que varios factores determinan los cambios entre ellos la matriz del sólido, la interconexión de los poros, la saturación de fluidos y la temperatura (Ley, 2001) los cuales pueden variar en un amplio intervalo (Robain *et al.*, 1996). Los levantamientos geoelectrónicos empleando SEV mayoritariamente se enfocan en los cambios verticales de resistividad del medio asociados a la presencia de agua subterránea; incluyendo la estimación de profundidades de acuíferos y propiedades de los mismos (Hamzah *et al.*, 2007). También han sido empleados junto con información geológica para definir

estratigrafía (Sinha *et al.*, 2013; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2014) o estructuras geológicas (Tsalha *et al.*, 2014) y en disciplinas como la arqueología (Bersezio *et al.*, 2007).

Entre los trabajos que utilizan SEV en la exploración de suelos destacan los de Ozcep *et al* (2009), quienes estudiaron la relación entre el contenido de humedad del suelo y la resistividad eléctrica demostrando relaciones de tipo exponencial negativo. Weinzettel *et al* (2009) lograron identificar exitosamente (con aprox. 3.5 % de error) la profundidad y presencia de horizontes petrocálcicos; empleando configuraciones de Schlumberger y Wenner con tomografía eléctrica en un Paleudol petrocálcico. Por otro lado, Samouëlian y colaboradores (2005) indicaron que la resistividad eléctrica puede ser una variable *proxy* para analizar la variación espacial y temporal de diferentes propiedades físicas como la estructura, el contenido de humedad o la densidad.

El SEV ha sido aplicado exitosamente para diferenciar capas de suelo cuando presentan resistividades eléctricas contrastantes; como es el caso de algunos Criosoles (Abakumov y Parnikoza, 2015; Abakumov y Tomashunas, 2016), en terrazas marinas en el archipiélago de Svalbard, Noruega (Alekseev y Abakumov, 2016) o para detectar horizontes delgados con resistividades muy distintas al resto del ambiente edáfico (Weinzettel *et al.*, 2009). Se ha empleado para detectar la profundidad de la roca definiendo el grado de intemperismo de la misma en Cambisoles y Estagnosoles (Novakova *et al.*, 2013), así como en el mapeo de unidades edáficas a escala de parcela en Cambisoles calcáricos y Cambisoles hiperéutricos (Buvat *et al.*, 2014). En México se ha utilizado la tomografía eléctrica en procesos ecohidrológicos del suelo en la región sur del complejo volcánico de la Sierra de San Miguelito (Rodríguez-Robles *et al.*, 2017). El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis geofísico empleando sondeos eléctricos verticales para la identificación de las capas u horizontes de los suelos de la microcuenca. Se espera que las propiedades físicas (la textura y humedad) y los factores de relieve (altitud y pendiente) presenten mayor sensibilidad al método.

4.2.2 Materiales y métodos

Muestro de suelo y análisis de laboratorio

Los puntos de muestreo y descripción de suelo, así como los análisis físicos y químicos que se utilizaron en la parametrización de los modelos de resistividad eléctrica y para realizar los análisis estadísticos en este apartado corresponden a los descritos en la sección 4.1.2.

Sondeo eléctrico vertical (SEV)

El procedimiento de método consiste en medir el potencial resultante de una corriente conocida que fluye en el suelo desde la superficie (Robain *et al.*, 1996), basado en un arreglo de cuatro electrodos A, B, M y N. Donde los electrodos A y B son los que hacen circular la corriente eléctrica (I) y los electrodos M y N registran la diferencia del potencial (V) que está desplazándose en el suelo; con la finalidad de obtener la resistividad eléctrica que es la medida de un material para oponerse al paso de corriente eléctrica (Herman, 2001). La resistividad eléctrica aparente en $\Omega.m^{-1}$ se calculó empleando la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde; ΔV es la diferencia de potencial (Voltios), I es el total de corriente (Amperios) y K es una constante geométrica adimensional. Se utilizó el arreglo electródico Wenner- α donde los cuatro electrodos (A, B, M, N) están colocados a la misma distancia (a) y la constante geométrica es:

$$K = 2\pi a \quad \text{Ecuación (2)}$$

Las distancias entre electrodos que se emplearon fueron 5, 20, 30, 40, 60 y 67 cm en transectos de 14 metros en los puntos B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, P4.B, P5.B y P6.B. Las distancias de 5, 20 y 30 cm se utilizaron en transectos con una distancia

máxima de 12 metros en los puntos P1, P2.B y P3. El equipo empleado se diseñó con cuatro electrodos, dos multímetros (mul-630 y mul-050), una batería de 12 Voltios y un inversor de 800 Watts para cambiar de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA) de 60 Hz y prevenir la polarización macroscópica que puede provocar que las partículas cargadas eléctricamente se acumulen en el electrodo (Lachhab y Booterbaugh, 2011). Todos los componentes del circuito fueron de sencilla adquisición y bajo costo. Como material adicional se utilizó un longímetro eléctricamente aislante, un martillo de goma y agua para obtener mejor contacto entre el suelo y los electrodos (Samouëlian *et al.*, 2005).

Los modelos de resistividad fueron parametrizados con la información de campo mediante el método directo suavizando puntos fuera de tendencia. Se realizaron cuatro transectos con la finalidad de representar la variación vertical de la resistividad eléctrica aparente y la secuencia de capas del suelo; de la parte alta a la parte baja de la microcuenca. El Transecto 1 (T1) incluyó los puntos B1, P2.B y B2; el Transecto 2 (T2) los puntos B5, B6, B7 y B8; el Transecto 3 (T3) los puntos P3 y B10 y el Transecto 4 (T4) los puntos P6.B y B11 (Figura 16). Los análisis anteriores se realizaron en el programa de cómputo IPI2win-V 3.0.1 (Bobachev *et al.*, 2000) que permitió interpretar la curva de datos obtenidas con el SEV en 1D empleando interpretaciones iterativas semi-automatizadas.

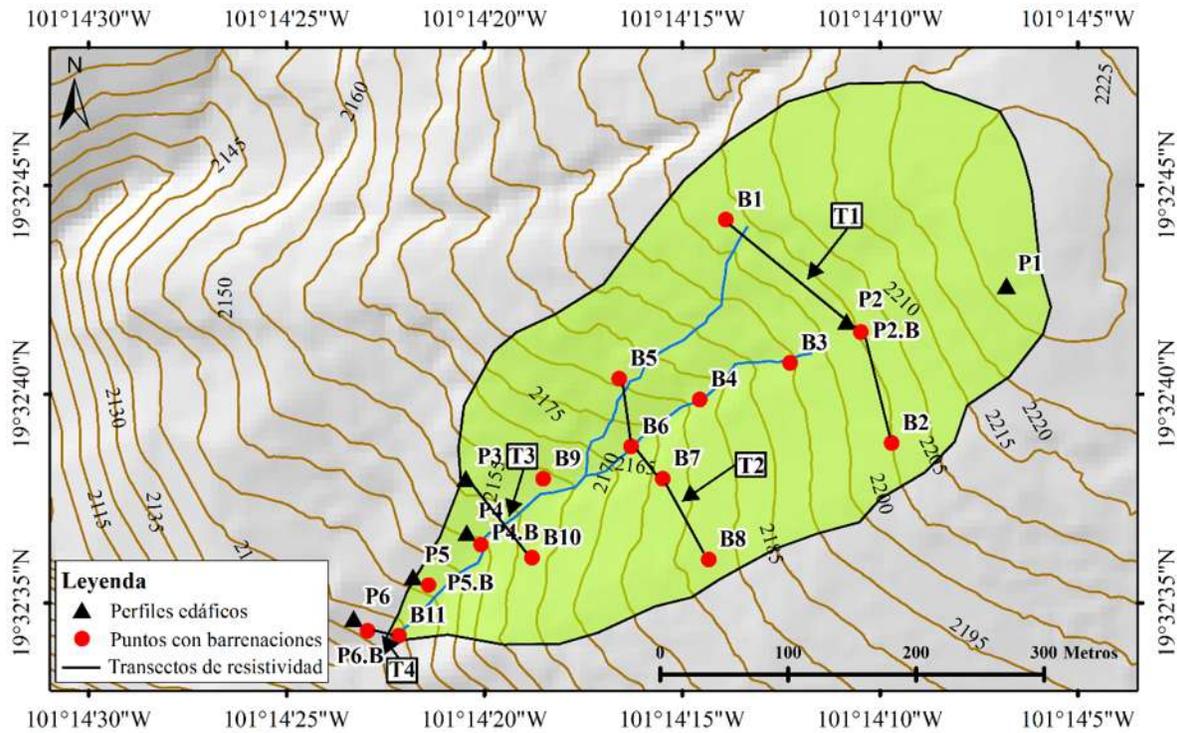


Figura 16. Transectos de resistividad eléctrica. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4.

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de componentes principales (Crawley, 2007) para hacer una reducción de variables y obtener las más significativas para la resistividad eléctrica verdadera, evitando la colinealidad. Con las variables de mayor relevancia del análisis de componentes principales, se hizo un análisis de agrupamiento jerárquico aglomerativo aplicando el método de Ward's (Crawley, 2007), buscando minimizar la varianza dentro de cada grupo para obtener similitudes entre puntos de muestreo y, por último, se obtuvieron los intervalos de resistividades eléctricas verdaderas para la microcuenca de estudio. Todos los análisis estadísticos se realizaron empleando el ambiente de programación estadístico R v 3.4.2. (R Core Team, 2017).

4.2.3 Resultados

Resistividad de los suelos

Las secciones de los cuatro transectos (Figura 17) mostraron la resistividad aparente y las pseudosecciones de los mismos transectos (Figura 18) reflejaron los valores de resistividad verdadera de la variación vertical y la secuencia de capas, respectivamente. La variación vertical de la resistividad aparente en los cuatro transectos se concentró en un intervalo de $64 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ a $2660 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ (Figura 17).

El Transecto 1 (T1) tiene una longitud de 220 m correspondiente a la parte alta de la microcuenca donde los suelos presentaron mayor desarrollado pedogenético. La capa superficial presentó espesores de 0.1 a 0.2 m con resistividades de 155 a $1280 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$. Los valores de resistividad de esta capa pueden atribuirse al alto contenido de materia orgánica. La segunda capa de 0.25 a 0.4 m de espesor presentó resistividades de 200 a $1382 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ que puede atribuirse al horizonte Ah identificado en campo. La tercera capa de 1.6 a 1.65 m espesor con resistividades de 66 a $122 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ indicó horizontes Bt + BC caracterizados por una textura arcillosa. La cuarta capa con resistividades de 75 a $165 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ puede atribuirse a un horizonte Cw (Figura 18).

El Transecto 2 (T2) ubicado en la parte media de la microcuenca con longitud de 162 m presentó una capa superficial con espesores de 0.1 y 0.2 m y resistividades de 77 a $1701 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ que puede atribuirse a un horizonte orgánico. La segunda capa presentó espesores de 0.3 a 0.9 m y resistividades de 126 a $3511 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$, que corresponde a un horizonte de ceniza volcánica. La tercera capa con espesores de 1.2 a 1.6 m y resistividades de 64 a $875 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ indicó un horizonte Bt + BC. Finalmente, la cuarta capa con resistividades de 90 a $183 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ correspondió a un horizonte Cw (Figura 18).

El Transecto 3 (T3) con longitud de 80 m, se ubicó en la parte baja de la microcuenca. La primera capa presentó espesores de 0.1 a 0.2 m y resistividades de 38 a $429 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ que puede atribuirse al horizonte orgánico. La segunda capa presentó espesores de 0.49 a 0.8 m, con resistividades de 133 a $1343 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ que se atribuyó a un horizonte orgánico. La tercera

capa presentó espesores de 1.0 a 1.41 m y resistividades de 83 a 264 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$, indicó un horizonte AC. La cuarta capa con resistividades de 95 a 114 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$ correspondió al horizonte Cw (Figura 18).

El Transecto 4 (T4) fue el más cercano al punto de salida de la microcuenca, la longitud fue de 36 m. En este transecto la primera capa con espesores de 0.17 a 0.2 m y resistividades de 87 a 268 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$, puede atribuirse al horizonte orgánico. La segunda capa con espesores de 0.26 a 0.8 m y resistividades de 66 a 160 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$ indicó un horizonte orgánico. La tercera capa presentó espesores de 1.0 a 1.57 m y resistividades de 15 a 42 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$, indicó un horizonte AC. Finalmente, la cuarta capa con resistividades de 60 a 71 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$ correspondió al horizonte Cw (Figura 18).

En el Cuadro 6 se presenta la resistividad eléctrica verdadera mínima (MIN), máxima (MAX) y media (MEDIA), así como la desviación estándar (SD) de cada una de los horizontes identificados con los modelos para los suelos de mayor y menor desarrollo pedogenético. En el cual se observó que la resistividad media para las cuatro capas es más baja en los suelos de menor desarrollo pedogenético.

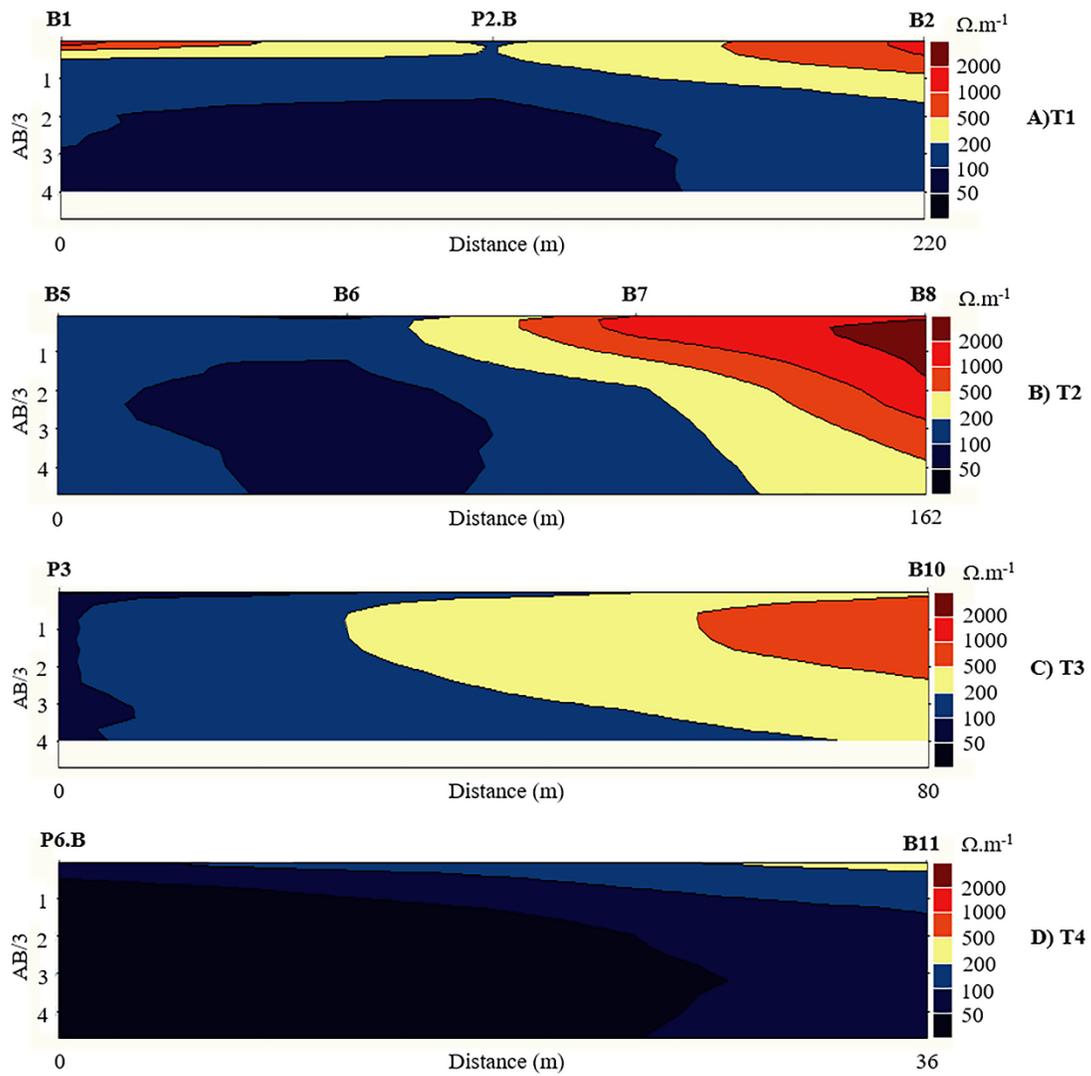


Figura 17. Transectos de la variación vertical de resistividad aparente. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4.

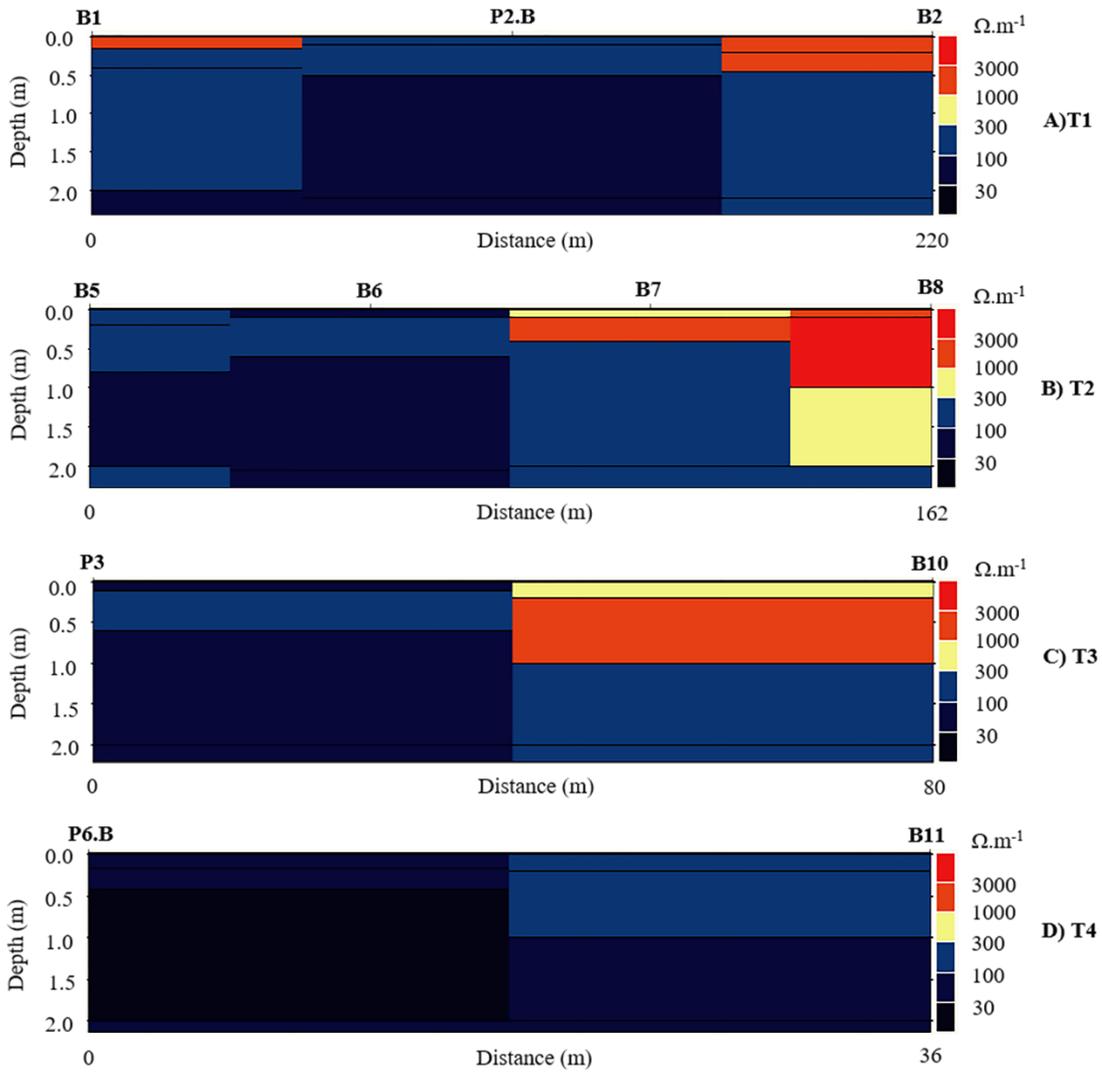


Figura 18. Transectos de la secuencia de capas del suelo identificadas en la microcuenca con el SEV. T1=Transecto 1, T2=Transecto 2, T3=Transecto 3 y T4=Transecto 4.

Cuadro 6. Intervalos de resistividad eléctrica verdadera de las capas de suelo diferenciadas mediante SEV.

| Suelos de mayor desarrollo pedogenético | MIN | MEDIA | MAX | SD |
|---|-----|-------|------|------|
| Horizonte orgánico | 77 | 650 | 1701 | 532 |
| Horizonte de ceniza volcánica | 148 | 944 | 3511 | 1073 |
| Horizonte Bt + BC | 42 | 181 | 875 | 238 |
| Horizonte Cw | 60 | 113 | 180 | 39 |
| Suelos de menor desarrollo pedogenético | MIN | MEDIA | MAX | SD |
| Horizonte orgánico | 38 | 83 | 105 | 26 |
| Horizonte de ceniza volcánica | 66 | 95 | 133 | 28 |
| Horizonte AC | 15 | 69 | 94 | 32 |
| Horizonte Cw | 32 | 74 | 101 | 27 |

El análisis de componentes principales explicó el 28.56% de variación en el componente principal 1 (CP1), donde se incluyeron la arcilla y la arena. El segundo componente (CP2) explicó el 23.14% de la variación formado por la altitud y la pendiente. En la gráfica de los Eigenvalues se observó que los tres primeros componentes agrupan el 69.89% de la variabilidad de los datos originales (Figura 19). De estos componentes la arcilla, la altitud y el pH fueron las variables con mayor valor absoluto de cada componente que fueron consideradas como las variables más significativas para la resistividad eléctrica (Cuadro 7). El análisis de agrupamiento indicó que, mediante la resistividad, la arcilla, el pH y altitud, los puntos de muestreo se agruparon de acuerdo a la similitud morfológica de los suelos formando en total 5 grupos (Figura 20).

Cuadro 7. Variables con mayor valor absoluto de los tres primeros componentes.

| Variable | PC1 | PC2 | PC3 |
|----------|-------|-------|-------|
| Arcilla | 0.628 | | |
| Altitud | | 0.543 | |
| pH | | | 0.574 |

Modelo conceptual edafológico

El modelo conceptual edafológico de la microcuenca mediante el sondeo eléctrico vertical muestra que la disposición de capas u horizontes depende de la altitud y del grado de desarrollo de los suelos. Los suelos se dividen en tres zonas. La Zona 1 corresponde a Cambisoles háplicos que se caracterizan por presentar cuatro capas, de las cuales los horizontes clave para su diferenciación en la microcuenca son el horizonte cámbico de cenizas volcánicas con resistividad media de $944 \Omega \cdot m^{-1}$ y el horizonte Bt + BC que presenta resistividad media de $181 \Omega \cdot m^{-1}$. En esta zona el espesor de estos horizontes junto con las propiedades físicas y químicas (Cuadro 4 y Cuadro 5) favorecen la infiltración y retención de agua (Figura 21).

La Zona 2 se conforma por suelos que se encuentran en la cárcava revegetada, en esta zona los Cambisoles háplicos perdieron el horizonte superficial por lo que aflora un horizonte con 55.04% de arcilla. Los horizontes B y Cw son clave para su identificación presentan resistividades medias de $87 \Omega \cdot m^{-1}$ y $116 \Omega \cdot m^{-1}$, respectivamente. La Zona 3 se ubica en la parte baja de la microcuenca y corresponde a Regosoles háplicos, en los cuales la resistividad media en el horizonte AC es de $55 \Omega \cdot m^{-1}$, la cual es menor a la que presenta el horizonte Cw que tiene resistividad media de $68 \Omega \cdot m^{-1}$ (Figura 21). Esta zona está influenciada por la presencia de agua, ya que es la más cercana al cauce perenne y al sitio donde el manto freático puede identificarse a una profundidad menor a un metro lo que puede explicar la disminución de los valores de resistividad del horizonte Cw en comparación con las otras dos zonas.

Se muestra que la resistividad del horizonte arcilloso (Bt + BC y B) cambia con la altitud. Este horizonte es más resistivo en la parte alta de la microcuenca con respecto a los suelos ubicados en la cárcava revegetada. Esta tendencia se observa también en el horizonte Cw de la Zona 1 con los suelos de la Zona 3, donde la diferencia es de $45 \Omega \cdot m^{-1}$. De acuerdo con la variación vertical de la resistividad (Figura 21) se observa que en la microcuenca los Cambisoles háplicos presentan mayor resistividad en la parte Este en comparación con la parte Oeste donde la resistividad de los suelos es menor, esto se debe a los horizontes

genéticos de los suelos y sus propiedades físicas y químicas (Cuadro 4 y Cuadro 5). De manera empírica el modelo conceptual sugiere que es importante conservar la vegetación forestal sobre la que se encuentran los suelos para que la disposición de las capas u horizontes genéticos no se vean afectadas, sobre todo el horizonte superficial que puede ser susceptible a la erosión.

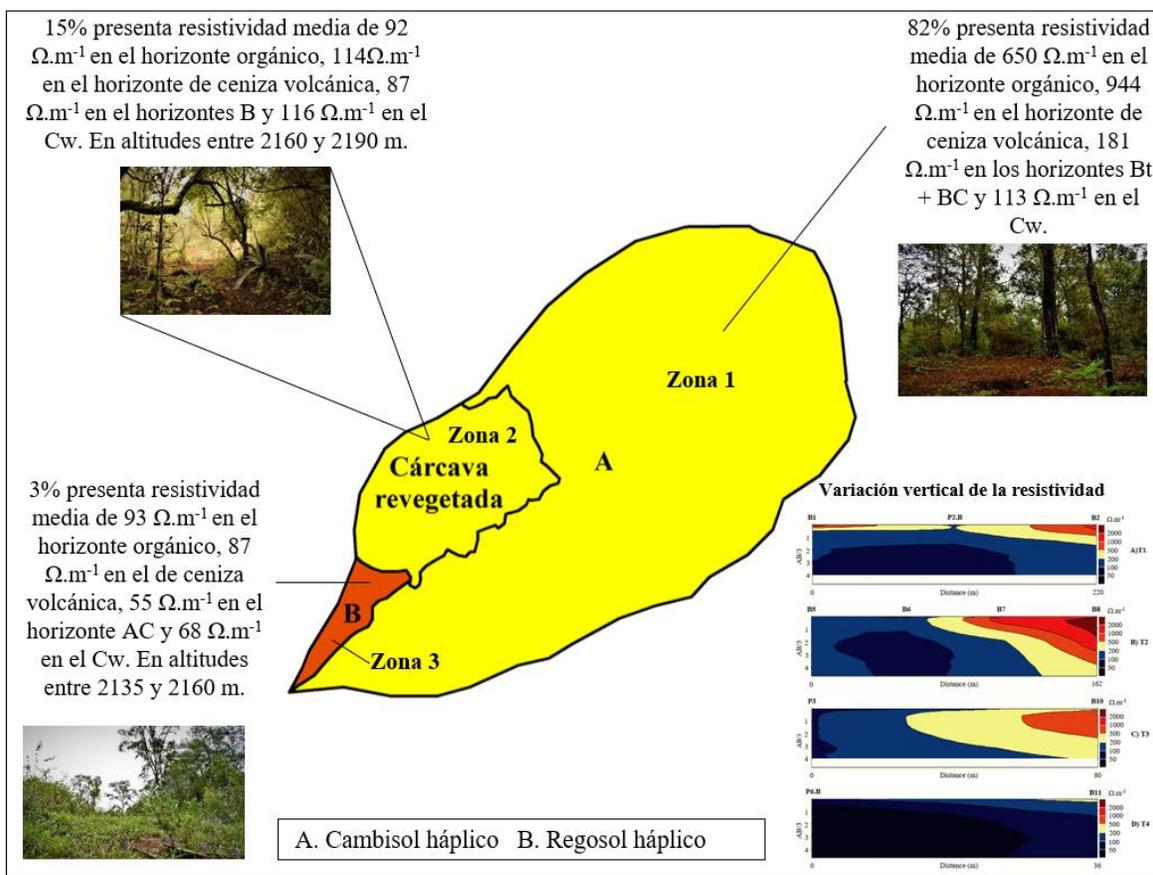


Figura 21. Modelo conceptual edafológico de la microcuenca mediante SEV.

4.2.4 Discusión

Identificación de capas de suelos con SEV

El SEV resultó eficiente para identificar capas contrastantes de suelo, similar a lo reportado por Weinzettel *et al* (2009). Las variables de suelo y de relieve más significativas para la resistividad en este estudio han sido reportadas previamente. Doolittle y Brevik, (2014) mencionaron que el pH está asociado a los cambios de conductividad aparente (inverso de la resistividad) de los suelos. Por otro lado, la arcilla que ha sido la más estudiada influye directamente en la resistividad eléctrica o su inverso la conductividad eléctrica (CE) (Neely *et al.*, 2016). Respecto a la altitud Singh *et al* (2016) obtuvieron correlaciones significativas entre la elevación y la CE. Aunado a lo anterior, Liao *et al* (2014) reportaron que las propiedades del suelo como el pH, materia orgánica, profundidad de la roca y contenido de arcilla son más estables comparadas con el contenido de humedad que es afectada por la temporalidad y factores como evapotranspiración y precipitación. Por lo que se asume en este estudio que en el periodo de muestreo (época seca) los valores eléctricos de los suelos corresponden a las propiedades de los suelos más estables.

La baja resistividad en la capa superficial ha sido reportada en otros trabajos donde el aumento de humus disminuye el campo eléctrico (Pozdnyakov, 2008), además se ha reportado que algunos componentes de MO estabilizan los agregados y genera macroporos continuos que aumentan la capacidad de conducir corriente eléctrica (Simón *et al.*, 2013).

La resistividad de la capa de cenizas volcánicas donde probablemente pudo influir la cantidad de raíces de la vegetación concuerda con lo reportado por Arias *et al* (2012); se atribuyó principalmente al incremento en la porosidad que implica mayor cantidad de espacios con aire en condiciones de suelo seco. El espesor depende de la posición topográfica y de factores como la distribución, densidad y tipo de vegetación, que se relaciona con la cantidad de raíces. Rodríguez-Robles *et al* (2017) reportaron que las raíces tienen influencia en la resistividad, causando un aumento entre 0 y 1 m probablemente por el secado de suelo por absorción de agua de la raíz y la evaporación del suelo en la época de sequía estacional.

La disminución de resistividad de la capa de los horizontes Bt + BC coincidió con lo reportado en suelos con mayor cantidad de arcilla debido a que es buen conductor (Harvey y Morgan, 2009; Paillet *et al.*, 2010). Se determinó mediante los análisis de suelo que la resistividad eléctrica de esta capa depende más de los minerales arcillosos (Corwin y Lesch, 2005) y no conductores (cuarzo, feldespato) que de la porosidad (contenido de aire y/o agua) en época seca (Banton *et al.*, 1997). Los valores de resistividad de la capa arcillosa fueron más altos contrastados con los registrados en otros trabajos donde se compararon con métodos tradicionales (Delgado *et al.*, 2012), probablemente porque la resistividad puede variar dependiendo de las interacciones complejas entre las propiedades intrínsecas del suelo y múltiples variables de un sitio en particular (Doolittle y Brevik, 2014).

El SEV no fue exitoso para diferenciar el horizonte pedogenético BC reportado en campo, probablemente no sólo por el bajo contraste de resistividad sino también por la geometría y características (Buvat *et al.*, 2014) que fueron similares al horizonte Bt. Esta limitación ha sido reportada en trabajos con diferencias claras sólo entre horizontes contrastantes (Adam *et al.*, 2012; Abakumov, 2017). Aunque con dicha limitación el SEV aproxima las profundidades de contacto entre horizontes de forma relativamente más rápida y sencilla respecto a los métodos convencionales (Buvat *et al.*, 2014), evidenciando que entre mayor es la variabilidad de las propiedades del suelo mayor será la posibilidad de diferenciarlas (Tabbagh *et al.*, 2000).

La resistividad fue menor en la capa transicional AC en la parte baja de la microcuenca, debido a las condiciones de reducción que disminuyen los parámetros eléctricos, el valor medio de resistividad para esta capa ($< 100 \Omega \cdot m^{-1}$) fue similar al reportado para un horizonte gley eluvial (Pozdnyakova, 1999). El intervalo de resistividades de la capa de saprolita fue similar al reportado en otros estudios donde los valores mínimos fueron atribuidos a la presencia de agua del subsuelo (Ritz *et al.*, 1999). Se desconoce el espesor de esta capa porque no fue posible acceder a mayor profundidad con la metodología empleada. Sin embargo, para fines edafológicos, el contacto con la capa inicial de formación de suelo fue identificada con el SEV, logrando definir el espesor de las capas de suelo en el sitio de estudio.

4.2.5 Conclusiones

Este estudio mostró la fiabilidad del SEV para la caracterización de capas del suelo. Se logró obtener la variabilidad vertical de los suelos mediante los cambios de resistividad, donde se consideró importante contar con un control de campo para facilitar la interpretación. Se diferenciaron cuatro capas de suelo que incluyeron un amplio intervalo de resistividades en el sitio de estudio. Se determinó que el SEV fue más exitoso en los suelos de mayor desarrollo pedogenético debido a los cambios contrastantes entre capas. Las propiedades de suelos que ayudaron a diferenciar las capas correspondieron a las que permanecen más estables, así como la altitud.

El modelo conceptual edafológico indica que la disposición de las capas u horizontes del suelo están relacionadas con factores extrínsecos, en este caso la erosión por cárcavas ha diferenciado a los Cambisoles háplicos en dos zonas, donde la principal diferencia es la presencia del horizonte cámbico, por lo que la disposición de los horizontes influye en la funcionalidad hidrológica y ecológica de la microcuenca. Además, se determinó que los suelos ubicados en la parte baja de la microcuenca clasificados como Regosoles presentan menor resistividad debido a que están cercanos al cauce perenne.

Los resultados mostraron que se requiere más investigación para determinar la variación vertical de los suelos de montaña con SEV para contar con valores de referencia de las capas de suelo identificadas en áreas de mayor extensión. La enorme variación de suelos en México denota la necesidad de contar con métodos que contribuyan en el estudio no sólo de las capas de suelo sino en la dinámica ecohidrológica de los mismos incluyendo la temporalidad de la resistividad eléctrica en futuros estudios.

Capítulo 5: DISCUSIÓN GENERAL

Fue posible cumplir con el objetivo general del presente trabajo mediante la realización de dos objetivos particulares desarrollados en dos apartados. Los resultados del Apartado 4.1 sustentan la primera hipótesis planteada (H1), ya que indican que los suelos de la microcuenca están sujetos a erosión por cárcavas, que ha provocado la modificación de la morfología de los suelos con la pérdida gradual del epipedón en la parte media de la microcuenca. Sin embargo, los resultados del Apartado 4.2 no sustentan completamente la segunda hipótesis (H2) debido a que no se demostró estadísticamente que el porcentaje de humedad gravimétrica fuera una variable significativa en los cambios de resistividad eléctrica. Se determinó que para la microcuenca las propiedades químicas (pH) y factores de relieve (altitud) son importantes en la interpretación de los resultados obtenidos con el sondeo eléctrico vertical (SEV).

Cabe mencionar que la mayoría de los trabajos revisados en el Apartado 4.2 corresponden a otros países, en México todavía no está desarrollado el uso de métodos geoelectrónicos en estudios edafológicos, por lo que sería conveniente seguir incluyendo dichos métodos en estudios de suelo. En el Cuadro 8 se muestra una comparación de estudios con el presente trabajo donde se utiliza el SEV y otros métodos geoelectrónicos en la identificación de capas de suelo, así como aplicaciones adicionales de los métodos.

La profundidad de exploración con los métodos geoelectrónicos depende del objetivo de estudio que puede ir desde centímetros a más de diez metros. Para fines edafológicos la profundidad de dos metros es útil ya que de acuerdo con IUSS Grupo de Trabajo WRB (2015), el objeto clasificado es cualquier material dentro de los primeros dos metros de la superficie de la Tierra o hasta donde haya roca. Los estudios del Cuadro 8 muestran una mayor similitud en los arreglos electrodicos, siendo los de Wenner y Schlumberger los más utilizados en diferentes tipos de suelos y con diferentes aplicaciones. Los resultados del presente trabajo en cuanto a la fiabilidad del SEV en la identificación de capas de suelo son similares a los reportados en otros estudios. Principalmente donde se identifican suelos

limosos y arcillosos con la diferencia de que se utiliza un equipo de diseño propio con materiales de sencilla adquisición y bajo costo.

Asimismo, en el Cuadro 8 se menciona el tipo de suelo en el que se llevan a cabo los estudios con métodos geoelectricos. Se pone de manifiesto que el conocimiento edafológico detallado es importante, ya que tanto los datos de campo como de laboratorio ayudan en la interpretación de los modelos de capas derivados con el método geoelectrico, tal como lo realizado en este trabajo, donde fue necesario primeramente contar con la información local del suelo para la posterior aplicación del SEV.

Los resultados del presente trabajo concuerdan con otros estudios donde se han identificado horizontes orgánicos, capa de ceniza volcánica, capa arcillosa y saprolita con el SEV; en los cuales también se mencionan algunas dificultades y bondades del método. Abakumov (2017) quien obtuvo valores de resistividades bajos en horizontes orgánicos superficiales similar a lo reportado en este trabajo, menciona también que el SEV es eficiente en la identificación de la heterogeneidad del suelo, sin embargo, indicó que la resistividad eléctrica se ve fuertemente afectada por las propiedades del mismo, por la alteración de la estratificación del suelo y aumento en la permeabilidad.

Los valores de resistividad de la capa de cenizas volcánicas identificada en este trabajo concuerdan con los reportados por Arias *et al* (2012), quienes indican que la resistividad de Andosoles puede variar entre 1000 y 2500 $\Omega.m^{-1}$, adicionalmente mencionan que el intervalo de resistividades puede variar ampliamente en un sitio y entre sitios de estudio, y que una de las debilidades del SEV puede ser la poca correspondencia entre los modelos de resistividades de estratos teóricos con modelos físicos (Arias *et al.*, 2012), dificultad que se presentó en este trabajo, ya que la resistividad media de las capas identificadas en los suelos de mayor y menor desarrollo pedogenético fueron diferentes, probablemente por la variación de las condiciones del medio, por ejemplo la vegetación y el contenido de agua (Pozdnyakov, 2008).

El estudio de Pozdnyakov (2008) identificó horizontes; A, B y C, donde uno de los factores importantes fue el relieve ya que condiciona la pedogénesis y por lo tanto los parámetros eléctricos, tal como lo reportado en este trabajo donde la altitud fue de importancia en los cambios de resistividad. Cabe mencionar que la baja resistividad de la capa arcillosa (horizonte Bt + BC) coincide con lo reportado anteriormente, Buvat *et al* (2014) asignaron taxones geofísicos que fueron consistentes con características pedológicas tales como la presencia de una capa arcillosa o la profundidad del perfil de suelo, demás determinaron que el SEV abre camino en el desarrollo de mapas de suelo semiautomáticos a partir de la resistividad eléctrica. Por otro lado, Robain *et al* (1996) mencionan que los resultados pedológicamente relevantes obtenidos con el SEV dependen en gran medida del uso de datos auxiliares de campo.

Cabe mencionar que el SEV no fue exitoso identificando horizontes transicionales, debido al bajo contraste en las propiedades del suelo, lo que indica que el SEV es eficiente cuando hay diferencias marcadas entre capas, al respecto Weinzettel *et al* (2009) quienes identificaron horizontes petrocálcicos indican que el SEV es eficiente identificando horizontes delgados con resistividades muy distintas al resto del ambiente edáfico; lo que concuerda con los resultados del presente trabajo y con lo reportado por Banton y colaboradores (1997), quienes también coinciden que el SEV es un método que puede evaluar la variación del suelo cuando la escala del trabajo o el nivel de contraste es suficientemente grande.

Como información adicional se incluyen en el Cuadro 8 trabajos cuyas aplicaciones han sido en el contexto hidrológico y geológico, lo que verifica el potencial de los métodos geoelectrónicos en estudios integrativos, entre ellos se encuentra el trabajo de Rodríguez-Robles *et al* (2017) quienes realizaron reconstrucciones de raíces para obtener su distribución junto con la variación del contenido de agua y el de Liao *et al* (2014) quienes llevaron a cabo un estudio hidrogeológico donde se consideró que las características temporales de la conductividad eléctrica puede ayudar a identificar la variación espacial y temporal de las propiedades hidropedológicas.

Cuadro 8. Comparación entre estudios para la identificación de capas de suelos con sondeo eléctrico vertical (SEV) en diferentes tipos de suelos y otras aplicaciones de métodos geoelectrónicos.

| Método geoelectrónico | Capas de suelo identificadas y otras aplicaciones | Arreglo electródico | Profundidad de exploración | Equipo geofísico | Referencia |
|--|---|--------------------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|
| SEV | Horizonte orgánico y profundidad del permafrost en Crisoles y Tecsoles | Schlumberger | 3.0 m | Landmapper ERM-03 (Landviser, USA) | Abakumov (2017) |
| SEV | Profundidad del permafrost (Crisoles) | Schlumberger | 5.0 m | Landmapper ERM-03 (Landviser, USA) | Abakumov y Tomashunas (2016) |
| SEV | Ceniza volcánica, capa arcillosa, arena aluvial, saprolita | ---- | ---- | ---- | Arias <i>et al</i> (2012) |
| SEV | Aluvión, capa arenosa y esquisto arenoso (Podzol humo-férrico) | Wenner y Schlumberger | 2.80 m | Transmisor-receptor (ABEM Terrameter 300B) | Banton <i>et al</i> (1997) |
| SEV | Taxones geofísicos con la identificación de capa arcillosa (Cambisol calcáreo y Cambisol hiperéutrico) | ---- | 05, 1.0 y 1.7 m | Auto-dispositivo de prueba de resistividad matemática (ARP®, Geocarta, París, Francia) | Buvat <i>et al</i> (2014) |
| SEV | Horizontes A, B y C (Podzoles y Chernozems) | Schlumberger | 5.0 m | Landmapper ERM-03 (Landviser, USA) | Pozdnyakov (2008) |
| SEV | Material arcilloso, material ferruginoso y saprolita | Wenner y Schlumberger | ---- | ---- | Robain <i>et al</i> (1996) |
| SEV | Secuencias litológicas. Rocas basálticas erosionadas, mezcla de basaltos y granito, fracturas | Schlumberger | 70 m | ---- | Tsalha <i>et al</i> (2014) |
| SEV | Cambios espaciales y temporales de salinidad (Vertisol) | Wenner | 40 cm | Resistivity-meter SYSCAL R1+ (IRIS Instruments, Orléans, France) | Adam <i>et al</i> (2012) |
| Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) | Distribución del contenido de agua en parcelas de maíz (Luvisol háplico) | ---- | 1.4 m | SYSCAL Pro | Beff <i>et al</i> (2013) |
| Inducción electromagnética (EMI) | Variaciones espaciales y temporales de propiedades hidropedológicas (Luvisol, Acrisol, Nitosol, Cambisol y Gleysol) | ---- | 1.5 m | EM38 (Geonics, Mississauga, ON, Canada) | Liao <i>et al</i> (2014) |
| Geo radar de penetración y TRE | Profundidad de roca erosionada, distribución espacial de raíces, distribución de agua (Leptosoles) | Wenner | 2.5 m | ---- | Rodríguez-Robles <i>et al</i> (2017) |
| TRE | Capa de materiales limosos, capa arcillosa, presencia de agua | Schlumberger-Wenner | ---- | Sistema de múltiples electrodos (Syscal Junior) | Sudha <i>et al</i> (2009) |
| TRE | Horizontes petrocálcicos someros (Paleudol petrocálcico) | Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo | 3.0 y 4.0 m | Resistivímetro marca AGI modelo Supersting R1/IP con 56 electrodos | Weinzettel <i>et al</i> (2009) |
| SEV | Horizonte orgánico, ceniza volcánica, horizonte B _i (arcilloso) y saprolita | Wenner | 2.0 m | Diseño propio | Onchi-Ramuco (en proceso) |

Ventajas y desventajas de la metodología

El método directo (excavación y descripción de perfiles) para la identificación de horizontes de suelos es el más adecuado. Debido en primer lugar, a que se puede observar en campo, brinda la fiabilidad de que los espesores de los horizontes sean más exactos, obteniendo incluso la forma del límite entre los mismos. Mediante el color y la dureza se puede obtener una primera información sobre el suelo. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, también se requiere de esfuerzo en campo y de arduo trabajo de laboratorio para poder obtener resultados cuantitativos. Por lo que es altamente demandante en tiempo.

Generalmente el método directo tiene como objetivo realizar una clasificación para representar de forma espacial la variación de suelos de un área determinada, sin embargo, en el contexto del manejo de ecosistemas, se requiere que los estudios estén enfocados también en la funcionalidad del suelo tomando en cuenta la variación vertical del mismo. Por esta razón, el emplear un método indirecto puede disminuir, una de las desventajas del método directo: el tiempo y esfuerzo. El método geoelectrico fue capaz de identificar cuatro capas de suelo, con la facilidad de poder intensificar puntos de muestreo, aunque es necesario contar con un control de campo no es necesario realizarlo con el mismo detalle y además disminuye el número de operadores en campo. Por lo que puede resultar menos costoso.

Otro punto a favor del método indirecto es que no solamente puede dar información sobre las profundidades y espesores de capas de suelo, sino que al mismo tiempo puede generar información cuantitativa sobre la funcionalidad del mismo. Por otro lado, una desventaja del método indirecto es que requiere de modificaciones según el área de estudio. Otra desventaja es que son numerosos factores los que influyen en el método geoelectrico y éstos pueden diferir dependiendo de las condiciones del sitio por lo que se debe ser cauteloso al momento de interpretar los resultados.

Capítulo 6: CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluyó lo siguiente:

Se obtuvo el modelo conceptual edafológico de la microcuenca el cual indica que características topográficas y geomorfológicas están controlando la profundidad, el espesor del suelo y la distribución de las propiedades físicas y químicas. Muestra que los suelos con mayor desarrollo pedogenético están en la parte alta de la microcuenca. Aunado a lo anterior, el modelo conceptual refleja que la variación espacial de los suelos está conformada por dos grupos de suelo (Cambisoles y Regosoles) con una función hidrológica importante, en términos de recarga. Dicha variación espacial ha sido originada por el sistema de cárcavas presentes en el área de estudio, por ello, es necesario conservar la cobertura forestal para que no se modifique la morfología actual de los suelos.

En este trabajo se demostró la fiabilidad del SEV en la identificación de capas de suelo, señalando que el equipo de diseño propio es factible en dicha aplicación cuyos resultados estuvieron sustentados por una cantidad considerable de datos de campo y laboratorio. Aunado a lo anterior, se comprobó la importancia de contar con información de las propiedades físicas y químicas del suelo en la aplicación del SEV, ya que dichas propiedades están estrechamente relacionadas con la resistividad eléctrica (variable descriptora de los modelos de capas de suelo generados con el SEV que presentó un amplio rango de valores, obteniendo que la capa de cenizas volcánicas fue altamente resistiva en comparación con las otras tres capas de suelo identificadas. En este trabajo tanto las formas de relieve como la morfología de los suelos fueron importantes, ya que los resultados indicaron que para la microcuenca la arcilla, pH y altitud fueron las variables de mayor peso en la interpretación del SEV.

Finalmente, se enfatiza la importancia de seguir utilizando métodos geoelectrónicos en estudios edafológicos y de manera integrada en trabajos ecohidrológicos, ya que pueden

ayudar a dar respuesta a diferentes problemas ambientales y, por lo tanto, la metodología del presente trabajo puede ser empleada en otros sitios de estudio.

Aplicación del SEV y perspectivas en trabajos futuros

Aunque no se demostró estadísticamente que la humedad fuera una de las propiedades más significativas para dicho método, probablemente porque no se abordó la temporalidad y a la alta variabilidad que puede presentar; es importante hacer referencia que tomando como objeto de estudio la dinámica hidrológica, el método geoelectrico puede ser de utilidad y por ello, se resalta en este apartado como una aplicación adicional para utilizarlo.

La parte biológica del suelo también es otro aspecto que se puede abordar con los métodos geoelectricos, identificando raíces que tienen una función importante en la infiltración de agua y en el crecimiento de la vegetación. Además, puede ser de utilidad en el monitoreo de la salinidad del suelo y profundidad del manto freático por lo que se pueden obtener estudios integrados.

Las sugerencias de este trabajo en un contexto integrativo son las siguientes:

- Tomando en cuenta que en la microcuenca se lleva a cabo la toma de datos diarios y mensuales de humedad edáfica es necesario integrarlos en futuros trabajos, así como la precipitación y análisis fisicoquímicos del agua, que permitan abordar la temporalidad de la dinámica hidrológica mediante métodos geoelectricos.
- Se recomienda seguir con la recolección de datos mediante SEV dentro de la microcuenca en puntos donde no se llevaron a cabo, y en puntos estratégicos fuera del parteaguas de la microcuenca para corroborar la información existente hasta el momento.
- De una breve revisión de trabajos de varios años realizados sobre suelos, hidrología superficial, infiltración y vegetación en la microcuenca, es evidente que cuenta con información valiosa. Se recomienda que mediante la inclusión de la metodología abordada

con el método geoelectrico en este trabajo se pueda incorporar la dinámica de la hidrología en la zona no saturada en trabajos posteriores. En este trabajo se obtuvieron resultados interesantes y valiosos, pero en varios aspectos incompletos.

- Referente al equipo empleado para llevar a cabo el SEV se recomienda tomar en cuenta el potencial espontáneo y trabajar con las curvas de resistividad aparente en campo. Se recomienda además incluir el arreglo de Schlumberger que es otro de los más comúnmente utilizados.

REFERENCIAS

Abakumov, E. (2017). Vertical electric resistivity sounding of natural and anthropogenically affected cryosols of Fildes Peninsula, Western Antarctica. *Czech Polar Reports* 7(2): 109-122.

Abakumov, E. V. y Parnikoza, I. Yu. (2015). Determination of the soil-permafrost border in selected plots of Antarctic Peninsula on the base of vertical electric sounding data. *Ukrainian Antarctic Journal* 14: 138-142.

Abakumov, E. y Tomashunas, V. (2016). Electric resistivity of soils and upper permafrost layer of the Gydan Peninsula. *Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research & German Society of Polar Research* 86(1): 27-34.

Adam, I., Michot, D., Guero, Y., Soubega, B., Moussa, I., Dutin, G. y Walter, C. (2012). Detecting soil salinity changes in irrigated Vertisols by electrical resistivity prospecting during a desalinisation experiment. *Agricultural Water Management* 109:1-10.

Adli, Z. H., Musa, M. H. y Arifin, M. N. (2010). Electrical Resistivity of Subsurface: Field and Laboratory Assessment. *International Journal of Geological and Environmental Engineering* 69: 805-808.

Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S. y Blöschl, G. (2017). Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology* 557:631-642.

Alcalá, M., Ortiz, S. C. y Gutiérrez, C. M. del C. (2001). Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana* 19(3):227-239.

Alekseev, I. y Abakumov, E. (2016). Vertical electrical sounding of soils and permafrost of marine terraces of Gronfjord (Svalbard archipelago). *Czech Polar Reports* 6(2): 210-220.

Amundson, R. (2014). *Soil Formation*. Elsevier. University of California, Berkeley, CA, USA. pp. 1-26.

Aparicio, M. F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa, México, 302 pp.

Arango-Galván, C., De la Torre-González, B., Chávez-Segura, R. E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G. y Hernández-Quintero, E. (2011). Structural pattern of subsidence in an urban area of the southeastern Mexico Basin inferred from electrical resistivity tomography. *Geofísica internacional* 50(4):401-409.

Arias, D. (2011). *Exploración geotécnica-Relaciones geoelectricas*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 102 pp.

Arias, D. E., Echeverri, O. y Hoyos, F. (2012). relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 31:39-50.

Arrubarrena-Moreno, M. y Arango-Galván, C. (2013). Use of electrical resistivity tomography in the study of soil pollution caused by hydrocarbons: Case study in Puebla (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65(2):419-426.

Auge, M. (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. 30 pp.

Banton, O., Seguin, M. K. y Cimon, M. A. (1997). Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity. *Soil Science Society of America Journal* 61:1010-1017.

Battle-Aguilar, J., Schneider, S., Pessel, M., Tucholka, P., Coquet, Y. y Vachier, P. (2009). Axisymmetrical Infiltration in Soil Imaged by Noninvasive Electrical Resistivity. *Soil Science Society of America Journal* 73:510-520.

Bautista, F., Rivas, H., Durán, C. y Palacio, G. (1998). Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geológicas Boletín* 36:21-33.

Beaudette, D.E., Roudier, P. y O'Geen, A.T. (2012). Algorithms for Quantitative Pedology: A Toolkit for Soil Scientists. *Computers & Geosciences* 52:258-268.

Beff, L., Günther, T., Vandoorne, B., Couvreur, V. y Javaux, M. (2013). Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17:595-609.

Bersezio, R., Giudici, M. y Mele, M. (2007). Combining sedimentological and geophysical data for high-resolution 3-D mapping of fluvial architectural elements in the Quaternary Po plain (Italy). *Sedimentary Geology* 202:230-248.

Besson, A., Cousin, I., Samouëlian, A., Boizard, H. y Richard, G. (2004). Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research* 79:239-249.

Bobachev, A., Modin, I. y Shevnin, V. (2000). IPI2WIN Software. Moscow State University. Moscow, Russia. 33 pp.

Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hammer, R. D. y Tandarich, J. P. (2005). Historical development of key concepts in Pedology. *Geoderma* 124:23-36.

Bolaños, M. A., Paz, F., Cruz, C. O., Argumedo, J. A., Romero, V. M. y de la Cruz, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:271-288.

Briceño, J. H. (1997). Guía y procedimientos para la medición de la resistividad aparente e interpretación de resultados. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 27 pp.

Brunet, P., Clément, R. y Bouvier, Ch. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)-A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology* 380:146–153.

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33:117-124.

Buvat, S., Thiesson, J., Michelin, J., Nicoullaud, B., Bourennane, H., Coquet, Y. y Tabbagh, A. (2014). Multi-depth electrical resistivity survey for mapping soil units within two 3ha plots. *Geoderma* 317-327.

Campos, A. (1999). Proceso de Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2^{da} ed. San Luis Potosí, México. pp. 33-34.

Campos, A., Oleschko, K., Cruz, L., Etchevers, J. D. y Hidalgo, C. (2001). Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana* 19(2):105-116.

Cardoza-Vázquez, R., Guevara, F. L., García, C. J. S., Guerrero, H. J. A., González, O. J. C., Hernández, M. H., Lira, Q. M de L., Nieves, F. J. L., Tejeda, S. D. y Vázquez, M. C. M. (2007). Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales. (Manual de Obras y Prácticas). 3^a Edición. ISBN: 068-6021-19-1. CONAFOR; Zapopan, Jalisco. pp. 15-283.

Castellanos, I., García, N. E. y Cano, Z. (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana* 35:51-64.

Castro, A., Acevedo-Berruecos, D., Urbietta, J., Iturbe, R. y Delgado-Rodríguez, O. (2013). Caracterización geoquímica y geoelectrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65(2):405-418.

CNA. (2007). Prospección geoelectrica y registros geofísicos de pozos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 187 pp.

Colín, G., Fernández, D. S., Martínez, M. R., Ríos, J. D., Sánchez P., Rubio, E. y Ibáñez, L. A. (2017). Clasificación digital de suelos a través de covariables ambientales de la cuenca del río Mixteco. *Terra Latinoamericana* 35:281-291.

Corwin, D. L. y Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:11-43.

Cotler, H., Martínez, M. y Etchevers, J. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34:125-138.

- Crawley, M. J. (2007). *The R Book*. John Wiley & Sons, Ltd., UK. pp 731-747.
- Cuanalo, H. (1975). *Manual de descripción de perfiles en el campo*. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 40 pp.
- Daza, F. A. (2012). *Métodos geoelectricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales*. Tesis. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Concepción, Chile. 250 pp.
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación agro-ecológica de suelos*. Mundi-Prensa Libros. Madrid. 404 pp.
- Delgado, O., Ladrón de Guevara, M., Shevnin, V. I. y Ryjov, A. (2012). Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. *Geofísica Internacional* 51(1): 5-15.
- Dena-Ornelas O. S., Obeso-Cortez G., Leyva J., Domínguez-Acosta M., Hernández-Jacobo V., Granados-Olivas A. y De la Cruz-Cháidez S. T. (2011). Estudio geológico y geofísico de la ladera sur del corte del mirador hidalgo en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Ingeniería investigación y tecnología* 7(4):339-451.
- DETENAL (Dirección General de Estudios del Territorio Nacional). (1979). *Edafología del municipio de Morelia, Michoacán (1979)*. México, D. F.
- Díaz, E. P. (2010). *Implementación del código ZONDRES2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 97 pp.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2000). NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. 85 pp. http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=717582.
- Doolittle, J. A. y Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 223-225.
- Ekwe, A. C., Onu, N. N. y Onuoha, K. M. (2006). Estimation of aquifer hydraulic characteristics from electrical sounding data: the case of middle Imo River basin aquifers, south- eastern Nigeria. *Journal of Spatial Hydrology* 6(2):121-132.
- Estrada, L. A. (2013). *Prospección geoelectrica*. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias exactas y tecnología, departamento de geodesia y topografía. Tucumán, Argentina. 20 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s05.htm>. Fecha de consulta: enero de 2018.

- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Roma, Italia. pp. 34-37.
- FitzPatrick, E. A. (1996). Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial Trillas. México, D. F. 288 pp.
- Freer, J., McDonnell, J. J., Beven, K. J., Peters, N. E., Burns, D. A., Hooper, R. P., Aulenbach, B. y Kendall, C. (2002). The role of bedrock topography on subsurface storm flow. *Water Resources Research* 38(12):5-1-5-16.
- García, M. T. y Lugo, J. (2003). El relieve mexicano en mapas topográficos. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 145 pp.
- Geris, J., Tetzlaff, D., McDonnell, J. J. y Soulsby, Ch. (2017). Spatial and temporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments. *Science of the Total Environment* 595:486-493.
- Gómez-Tagle Ch., A., Gómez-Tagle R., A. F., Ávila, J. A. y Bruijnzeel, L. A. (2015). Partición de la precipitación en un bosque tropical montano de pino-encino en el centro de México. *Bosque* 36 (3):505-518.
- Gómez-Tagle, A. (2008). Variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y conductividad hidráulica superficial en la cuenca de Cuitzeo. INIRENA. Tesis Doctoral de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México. 164 pp.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W. y Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301:128-147.
- González, J. C., Cabrera, A. y Ayala, J. M. (2006). Flujo, calidad de agua y uso potencial de los manantiales de la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, México. *Biológicas* 8:31-46.
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A. y Papritz, A. J. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy* 69:224-237.
- Grison, H., Petrovsky, E., Kapicka, A. y Stejskalova, S. (2016). Magnetic and chemical parameters of andic soils and their relation to selected pedogenesis factors. *Catena* 139:179-190.
- Hamzah, U., Samsudin, A. R. y Malim, E. P. (2007). Groundwater investigation in Kuala Selangor using vertical electrical sounding (VES) surveys. *Environmental Geology* 51:1349-1359.

Harvey, O. R. y Morgan, C. L. S. (2009). Predicting regional-scale soil variability using single calibrated apparent soil electrical conductivity model. *Soil Science Society of America Journal* 73:164-169.

Herman, R. (2001). An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics* 69(9): 943-952.

Hernández-Jiménez, A., Ascanio-García, M. O., Cabrera-Rodríguez, A., Morales-Díaz, M., Medina-Basso, N. y Rivero-Ramos, B. (2004). Problemas actuales de clasificación de suelos: énfasis en Cuba. ISBN: 968-834-638-1. Universidad Veracruzana, Dirección Editorial. Xalapa, Veracruz. pp. 07-221.

Hodgson, J. (1987). Muestreo y descripción de suelos. Reverté. España. 225 pp.

Imhof, A., Guell, A. E. y Villagra, M. S. (2001). Aplicación del método geoeléctrico para la determinación de horizontes salinos en la colonia Lloveras-PCIA de San Juan-Argentina. *Brazilian Journal of Geophysics* 19(3):263-278.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2008). Guías para la interpretación de cartografía. Edafología, 2ª ed. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags.

INEGI. (2010). Estado actual y futuro de la cartografía de suelos en México. 1^{er} taller latinoamericano globalsoilmap.net atlas de suelos de Latinoamérica. México, D. F.

INEGI. (2016). Estadísticas a propósito del día internacional de los bosques. México, D. F.

INIFAP (Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias) – CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2008). Edafología. Catálogo de metadatos geográficos. CONABIO. México, D. F. 5 pp. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no. Fecha de consulta: 06/08/2018.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. 117 pp.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma. 205 pp.

Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 593 pp.

Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation. A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill. NY. 271 pp.

- Jiménez, O. (2016). Influence of rainfall patterns into runoff generation mechanisms in a headwater catchment within the Mexican Neovolcanic Belt. Extension of Master Thesis in Hydrology. Vrije Universiteit Amsterdam. Amsterdam. 106 pp.
- Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I. (2002). An introduction to geophysical exploration. Blackwell Science. *Geophysical Prospecting* 47:85-101.
- Kleber, M., Mikutta, Ch. y Jahn, R. (2004). Andosols in Germany-pedogenesis and properties. *Catena* 56:67-83.
- Kramer, P. J. (1974). Relaciones hídricas del suelo y plantas, una síntesis moderna. Edutex S. A. México, D. F. pp. 51-80.
- Krasilnikov, P. (2011). Metodología de la geografía de suelos. En P. Krasilnikov, F. J. Jiménez, T. Reyna y N. E. García (eds.), *Geografía de suelos de México* (pp. 133-141). Facultad de Ciencias. UNAM. México: Prensas de Ciencias.
- Kumar, R., Jat, M. K. y Shankar, V. (2013). Evaluation of modeling of water ecohydrologic dynamics in soil-root system. *Ecological Modelling* 269:51-60.
- Lachhab, A. y Booterbaugh, A. P. (2011). A fabricated resistivity apparatus used with other geophysical methods to explore buried structure on the bench and in the field. *FastTIMES* 16(4): 27-37.
- Legros, J. P. (2005). Mapping of the soil. Science Publishers. NH, USA. pp. 100-159.
- Leslie, I. N. y Heinse, R. (2012). Characterizing Soil-Pipe Networks with Pseudo Three-Dimensional Resistivity Tomography on Forested Hillslopes with Restrictive Horizons. *Vadose Zone Journal Research* 1-10.
- Ley, A. Y. (2001). Modelado de sondeos eléctricos verticales en medios estratificados con variación exponencial de la resistividad. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D. F. 65 pp.
- Liao, K. H., Zhu, Q. y Doolittle, J. A. (2014). Temporal Stability of Apparent Soil Electrical Conductivity Measured by Electromagnetic Induction Techniques. *Journal of Mountain Science* 11(1): 98-109.
- Lin, H. (2012). *Hydropedology, synergistic integration of soil science and hydrology*. Elsevier. USA. 783 pp.
- Lin, H., Bouma, J., Wilding, L. P., Richardson, J. L., Kutilek, M. y Nielsen, D. R. (2005). Advances in hydropedology. *Advances in Agronomy* 85: 1-89.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. Technical note of Geotomo Software. 60 pp.

Mendoza, M. y Bocco, G. (2010). Geomorfología. En: S. Cram, L. Galicia e I. Israde Alcántara (eds.), Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental. (pp. 48-53). México: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Moeys, J. (2016). The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. GNU General Public License Version 3 (<http://www.gnu.org/licenses/agpl.html>).

Mostafa, M., Anwar, M. B. y Radwan, Amr. (2017). Application of electrical resistivity measurement as quality control test for calcareous soil. Housing and Building National Research Center Journal 1-6.

Neely, H. L., Morgan, C. L., Hallmark, C. T., McInnes, K. J. y Molling, Ch. C. (2016). Apparent electrical conductivity response to spatially variable vertisol properties. Geoderma 263:168-175.

Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G. y Tejedor, M. (2012). Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). Catena 98:55-62.

Novakova, E., Karous, M., Zajíček, A. y Karousová, M. (2013). Evaluation of Ground Penetrating Radar and Vertical Electrical Sounding Methods to Determine Soil Horizons and Bedrock at the Locality Dehtáře. Soil & Water Research 8(3): 105-112.

Núñez, E. A., Ruiz, M., Chuk, D. y Rossini, B. (2013). Determinación de perfiles de humedad en suelos homogéneos a través de un método geoelectrico. Ciencia del Suelo (Argentina) 31(2): 271-277.

Orellana, E. y Silva, E. O. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Parte 1. Paraninfo. Madrid España. pp. 28-37.

Ortiz, C. A., Sánchez, P., Gutiérrez, E. V. y Gutiérrez, M. de C. (2011). El factor clima en la distribución de suelos en México. En P. Krasilnikov, F. J. Jiménez, T. Reyna y N. E. García (eds.), Geografía de suelos de México (pp. 57-71). Facultad de Ciencias. UNAM. México: Prensas de Ciencias.

Ortiz, M. A. (1990). Perfiles geomorfológicos complejos (Significado y aplicación en la interpretación morfotectónica). Universidad Autónoma de México. México, D. F. 46 pp.

Ozcep, P., Tezel O. y Ascı, M. (2009). Correlation between electrical resistivity and soil-water content: Istanbul and Golcuk. International Journal of Physical Sciences 4(6):362-365.

Paillet, Y., Cassagne, N. y Brun, J. J. (2010). Monitoring forest soil properties with electrical resistivity. Biology and Fertility of Soils 46(5):451-460.

Peinado-Guevara, H., Green-Ruíz, C., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O., Delgado-Rodríguez, O., Belmonte Jiménez, S. y Ladrón de Guevara, M. (2012). Relationship between chloride concentration and electrical conductivity in groundwater and its estimation from vertical electrical soundings (VES) in Guasave, Sinaloa, Mexico. *Ciencia e investigación agraria* 39(1):229-239.

Peña-Ramírez, V. M., Vázquez-Selem, L. y Siebe, Ch. (2009). Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835-30,500 years B.P.) in Mexico. *Geoderma* 149:224-234.

Pizarro, L. R. (2015). Interpretación de mediciones de resistividad de terreno por medio de curvas de patrón. Magister en Ingeniería. Universidad Andrés Bello. Talcahuano, Chile.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente, 2ª edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España. 807 pp.

Pozdnyakov, A. I. (2008). Electrical Parameters of Soils and Pedogenesis. *Eurasian Soil Science* 41(10):1050–1058.

Pozdnyakova, L. A. (1999). Electrical Properties of Soils. PhD thesis, Department of Renewable Resources, University of Wyoming, Laramie, WY. p 25.

Prado, B., Duwig, C., Hidalgo, C., Gómez, D., Yee, H., Prat, C., Esteves, M. y Etchevers, J. D. (2007). Characterization, functioning and classification of two Volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma* 139:300-313.

Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. *Fundamentos y métodos*. Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. de C.V. (IEPSA). México, D. F. pp. 53-62.

Pujolar, M. R., Salgado, N. E., Sánchez, O. S. y Vilaró, S. A. (2011). Estudio de la conductividad hidráulica saturada a distintas profundidades en un bosque de suelo volcánico en Morelia, centro de México. Tesis de Licenciatura Universidad de Barcelona, España, 99 pp.

Putra, A. N., Sudarto y Rayes, M. L. (2015). The characteristics and genesis of volcanic ash soils at the northern slope toposequence of Kawi Mountain in Malang Regency. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 2(4):383-390.

Quezada, J., Cerda, J. L. y Jesen, A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology* 37 (1):78-109.

R Core Team. (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

Ramos-Leal, J. A., López-Loera, H., Martínez, V. J. y Aranda-Gómez, J. J. (2007). Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoelectricos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24(1):31-46.

Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tana, C. S. y Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110:131-146.

Rezaei, M., Saey, T., Seuntjens, P., Joris, I., Boënné, W., Meirvenne, M. V. y Cornelis, W. (2016). Predicting saturated hydraulic conductivity in a sandy grassland using proximally sensed apparent electrical conductivity. *Journal of Applied Geophysics* 126:35-41.

Ritz, M., Parisot, J. C., Diouf, S., Beauvais, A., Dione, F. y Niang, M. (1999). Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa. *Journal of Applied Geophysics* 41:335-344.

Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M. y Atangana, Q. Y. (1996). A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics* 34:237-253.

Rodríguez, J. (2014). Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturboscuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 83 pp.

Rodríguez-Robles, U., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Ramos-Leal, J. A. y Yépez, E. A. (2017). Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences* 14:5343-5357. DOI: 10.5194/bg-14-5343-2017.

Rosas, D. M. (2015). “Funcionamiento hidrológico de una microcuenca instrumentada, en un bosque templado de la cuenca del lago de Cuitzeo”. Tesis de maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. UMSNH. Morelia, Mich. 105 pp.

Rucker, D. (2009). A coupled Electrical Resistivity-Infiltration Model for Wetting Front Evaluation. *Vadose Zone Journal* 8:383-388.

Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A. y Bruand, A. (2003). Electrical Resistivity Imaging for Detecting Soil Cracking at the Centimetric Scale. *Soil Science Society of America Journal* 67:1319–1326.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. y Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83:173-193.

Sánchez, F. J. (2011). Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales. Depto. Geología, Universidad Salamanca. España. 12 pp

Sedov, S. N., Solleiro-Rebolledo, E. y Gama-Castro, J. E. (2003). Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena* 54:495-513.

Sedov, S. N., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J. E., Vallejo-Gómez, E. y González-Velázquez, A. (2001). Buried palaeosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in central Mexico. *Journal of Quaternary Science* 16(4):375-389.

Servenay, A. y Prat, C. (2003). Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma* 117:367-375.

Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Fernández-Linares, L., Zegarra, H., Mousatov, A. y Ryjov, A. (2005). Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, Mexico. *Geofísica Internacional* 44(3):251-263.

Shindo, H., Honna, T., Yamamoto, S. y Honma, H. (2004). Contribution of charred plant fragments to soil organic carbon in Japanese volcanic ash soils containing black humic acids. *Organic Geochemistry* 35:235-241.

Siebe, Ch., Jahn, R. y Stahr, K. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo. México. 40 pp.

Simón, M. I. (1999). Análisis de sensibilidad en la resistividad aparente en función de la saturación y calidad de agua para medios porosos: los casos de los valles de Hermosillo y el yaqui, Sonora. Tesis de posgrado. UNAM, Instituto de Geología. Posgrado en Ciencias de la Tierra, México, D.F. 77 pp.

Simón, M., Peralta, N. y Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 31(1): 45-55.

Singh, G., Williard, K. W. J. y Schoonover, J. E. (2016). Spatial relation of apparent soil electrical conductivity with crop yields and soil properties at different topographic positions in a small agricultural watershed. *Agronomy* 1-22.

Sinha, R., Yadav, G. S., Gupta, S., Singh, A. y Lahiri, S. K. (2013). Geo-electric resistivity evidence for subsurface palaeochannel systems adjacent to Harappan sites in northwest India. *Quaternary International* 66-75.

Sinowski, W. y Auerswald, K. (1999). Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89:113-128.

Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A basic system for soil classification for making and interpreting soil surveys* 2nd ed. USDA-NRCS. Washington, D. C. Agriculture Handbook 436 pp.

SSSA. (2002). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America book series:5. Madison, Wisconsin, USA. 1663 pp.

Steinich, B., Simón, I., Chavarría, J. A., y Marín, L. E. (1997). Geophysical investigations of the vadose zone in the Valley of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional* 36:191-200.

Strahler A. (1952). Hypsometric (area-altitude) Analysis of Erosional Topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63:1117-1142.

Sudha, K., Israil, M., Mittal, S. y Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67:74-79.

Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A. y Panissod, C. (2000). Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* 97:393-404.

Tan, Z., Liu, S., Johnston, C. A., Loveland, T. R., Tieszen, L. L., Liu, J. y Kurtz, R. (2005). Soil organic carbon dynamics as related to land use history in the northwestern Great Plains. *Global Biogeochemical Cycles* 19:1-10.

Thiers, O., Reyes, J., Gerding, V. y Schlatter, J. E. (2014). Suelos en ecosistemas forestales. En Donoso, C., González, M. E. y Lara, A. eds. *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. Valdivia, Chile. Ediciones UACH. pp. 133-178.

Tsalha, M. S., Lar, U. A., Yakubu, T. A. y Oniku, S. A. (2014). Geophysical Investigation of the Subsurface Fractures Zones Using Vertical Electrical Sounding in Kassa Volcanic Field (KVF) on the Jos Plateau, North central, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science* 4(10):150-160.

Tsuboyama, Y., Sidle, R. C., Noguchi, S. y Hosoda, I. (1994). Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. *Water Resources Research* 30(4):879-890.

Urrutia-Fucugauchi, J., Trigo-Huesca, A., Téllez-García, E., Pérez-Cruz, L., Méndez-Rivero, F. y Valsequillo, P. T. (2014). Volcano-sedimentary stratigraphy in the Valsequillo Basin, Central Mexico inferred from electrical resistivity soundings. *Geofísica Internacional* 53(1): 87-94.

Uwitonze, P., Msanya, B. M., Mtakwa, P. W., Uwingabire, S. y Sirikare, S. (2016). Pedological Characterization of Soils Developed from Volcanic Parent Materials of Northern Province of Rwanda. *Agriculture, Forestry and Fisheries* 5(6):225-236.

Vanwallegem, T., Poesen, J., McBratney, A. y Deckers, J. (2010). Spatial variability of soil horizon depth in natural loess-derived soils. *Geoderma* 157:37-45.

Velázquez, J., Ochoa, G., Oballos, J., Manrique, J. y Santiago, J. (2004). Metodología para la delimitación cartográfica de suelos. *Revista Forestal Latinoamericana* 19(2):15-34.

Vences, O. E. G. (2013). Adaptación de datos de sondeos eléctricos verticales para obtener imágenes eléctricas 2D. Tesis ingeniero geofísico. UNAM. Facultad de Ingeniería. División de ingeniería en Ciencias de la Tierra. México, D.F. 81 pp.

Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S. y Usunoff, E. (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 27(1):135-146.

Weller, U., Zipprich, M., Sommer, M., Zu, W. y Wehrhan, M. (2007). Mapping Clay Content across Boundaries at the Landscape Scale with Electromagnetic Induction. *Soil Science Society of America Journal* 71:1740-1747.

Wendroth, O., Koszinski, S. y Pena-Yewtukhiv, E. (2006). Spatial Association among Soil Hydraulic Properties, Soil Texture, and Geoelectrical Resistivity. *Vadose Zone Journal* 5: 341-355.

Zepeda, H., Medina, L., Gómez-Tagle, A., Gómez-Tagle, A. F. y Mariano, F. (2010). Suelos. En: S. Cram, L. Galicia e I. Israde Alcántara (eds.), *Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental.* (pp. 44-47). México: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Zevenbergen, L. W. y Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms* 12:47-56.

Zimmermann, B. y Elsenbeer, H. (2009). The near-surface hydrological consequences of disturbance and recovery: A simulation study. *Journal of Hydrology* 364:115-127.

Zinck, J. A. (2012). *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales.* Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands. 123 pp.

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE PERFILES EDÁFICOS

Perfil 1

Fecha de descripción: 09 de abril de 2017

Pendiente: 2°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 6-2cm; hojarasca sin alteración.

Horizonte Oe. 2-0.5 cm; hojarasca con alteración moderada, parcialmente fragmentada.

Horizonte Oa. 0.5-0 cm; hojarasca muy descompuesta con mineralización incompleta.

Horizonte Ah. 0-2 cm; muy seco; color en seco 7.5 YR 4/3 (*Brown*); 5 YR 3/3 (*dark reddish brown*) color en húmedo; textura Franco-limosa; ligeramente ácido (pH 6.0 en agua); estructura en bloques subangulares biogénicos, fuerte y media; pedregosidad del 1% (cantos finos); estabilidad de agregados muy alta; muchos poros finos y medianos, gruesos y muy finos comunes, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción nula al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte ondulado y gradual.

Horizonte Ah2. 2-5 cm; seco; color en seco 7.5 YR 4/6 (*Strong brown*); 5 YR 4/3 (*Reddish brown*) color en húmedo; textura Franco-limosa gruesa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques subangulares biogénicos, fuerte, media y fina; pedregosidad del 1% (cantos finos); estabilidad de agregados alta; poros comunes, gruesos y medianos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad muy alta de raíces finas; reacción nula al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte difuso y ondulado.

Horizonte Ah3. 5-30 cm; fresco; color en seco 7.5 YR 5/6 (*Strong brown*); 5 YR 4/4 (*Reddish brown*) color en húmedo; textura Franco-limosa Fina; moderadamente ácido (pH 4.5 en agua); estructura en bloques subangulares, fuerte, gruesa, media y fina; pedregosidad del 1% (cantos finos); estabilidad de agregados alta; poros comunes medianos, tubulares, muchos finos tubulares, dentro de agregados; densidad alta de raíces finas; reacción nula al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte claro, irregular.

Horizonte Bt. 30-82cm; fresco; color en seco 2.5 YR 4/6 (*Red*); 2.5 YR 4/6 (*Red*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 4.5 en agua); estructura en bloques subangulares, finos, medios y gruesos; pedregosidad del 1% (cantos finos); estabilidad de agregados moderada; poros pocos, gruesos,

medianos y muy finos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; cutanes de arcilla < 1mm de grosor entre agregados; densidad alta de raíces finas; reacción nula al HCL; con reacción moderada al H₂O₂; transición al siguiente horizonte claro, irregular.

Horizonte BC. 82-90 cm; fresco; color en seco 10 YR 6/4 (*Light yellowish brown*); 10 YR 6/4 (*Light yellowish brown*) color en húmedo; textura Franco arcillosa; moderadamente ácido (pH 4.5 en agua); estructura en bloques angulares y subprismática, fuerte, muy finos, finos y gruesos; sin pedregosidad; estabilidad de agregados moderada; poros pocos, gruesos, medianos y muy finos, vesiculares y tubulares, entre agregados; cutanes de arcilla delgados a gruesos, moderadamente abundantes, < 1 mm de grosor; concreciones de roca, densidad baja de raíces finas; reacción nula al HCL; sin reacción al H₂O₂; transición al siguiente horizonte gradual, irregular.

Horizonte Cw. 90-125 cm; fresco; color en seco 2.5 YR 4/6 (*Red*); 10 YR 3/6 (*Dark yellowish brown*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura en bloques angulares, fuerte, finos, medios y gruesos; sin pedregosidad; estabilidad de agregados moderada; poros comunes, muy finos, tubulares y vesiculares, dentro de agregados y poros comunes, finos, tubulares, entre agregados; cutanes de arcilla moderadamente abundantes, < 1 mm de grosor; concreciones de roca, densidad muy baja de raíces finas; reacción nula al HCL; sin reacción al H₂O₂.

Análisis físicos del Perfil 1

| Horizonte | Espesor | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | DA | Humedad gravimétrica |
|-----------|---------|-------|------|---------|----------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm ⁻³ | % |
| 0-2 | 2 | 52.04 | 28 | 19.96 | Franca | 0.854 | 14.554 |
| 2-5 | 3 | 40.04 | 26 | 33.96 | Arcillo limosa | 0.922 | 21.468 |
| 5-30 | 25 | 38.04 | 30 | 31.96 | Arcillo limosa | 0.908 | 22.910 |
| 30-82 | 52 | 4.04 | 16 | 79.96 | Arcillosa | 1.075 | 27.298 |
| 82-90 | 8 | 12.04 | 24 | 63.96 | Arcillosa | 1.238 | 31.790 |
| 90-125 | 35 | 30.04 | 16 | 53.96 | Arcillosa | 1.134 | 38.613 |

Análisis químicos del Perfil 1

| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m ⁻¹ |
| 0-2 | 2 | 5.37 | 0.183 |
| 2-5 | 3 | 5.13 | 0.109 |
| 5-30 | 25 | 4.79 | 0.103 |
| 30-82 | 52 | 5.55 | 0.029 |
| 82-90 | 8 | 5.79 | 0.018 |
| 90-125 | 35 | 5.96 | 0.021 |

Análisis químicos del Perfil 1

| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|-------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg ⁻¹ | % |
| 19.49 | 25.30 | 27.75 | 16.20 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 82.48 |
| 10.14 | 13.16 | 22.20 | 1.08 | 9.72 | 0.03 | 0.18 | 49.58 |
| 10.92 | 14.17 | 18.87 | 3.24 | 3.24 | 0.03 | 0.19 | 35.50 |
| 1.87 | 2.43 | 21.09 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.19 | 36.84 |
| 1.40 | 1.82 | 22.20 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.20 | 35.06 |
| 2.34 | 3.04 | 24.42 | 1.08 | 5.40 | 0.02 | 0.18 | 27.33 |

Perfil 2

Fecha de descripción: 01 de mayo de 2017

Pendiente: 9°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 5-3 cm; hojarasca sin alteración.

Horizonte Oe. 3-0 cm; hojarasca con alteración moderada, parcialmente fragmentada.

Horizonte Ah. 0-3 cm; muy seco; color en seco 7.5 YR 4/3 (*Brown*); 10 YR 2/2 (*Very dark brown*) color en húmedo; textura Franco-limosa fina; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura granular, muy fina, fina, media y gruesa, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros muy finos, finos y medianos, vesiculares, cilíndricos y tubulares, dentro y entre agregados; densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción muy baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte ondulado y difuso.

Horizonte Ah2. 3-10 cm; muy seco; color en seco 7.5 YR 4/4 (*Brown*); 7.5 YR 2.5/2 (*Very dark brown*) color en húmedo; textura Franco arcillo limoso; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques subangulares, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros comunes, medianos, finos y muy finos, vesiculares y cilíndricos, dentro de agregados; densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción muy baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte ondulado y difuso.

Horizonte Ah3. 10-50 cm; muy seco; color en seco 7.5 YR 4/3 (*Brown*); 7.5 YR 2.5/3 (*Very dark brown*) color en húmedo; textura Franco arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques subangulares, medios, gruesos y muy gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados media; poros comunes, medianos, finos y muy finos, vesiculares, tubulares y cilíndricos, dentro de agregados; densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción muy baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte claro, irregular.

Horizonte Bt. 50-109 cm; fresco; color en seco 2.5 YR 4/6 (*Red*); 2.5 YR 4/6 (*Red*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques angulares, medios, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados moderada; poros comunes, medianos, finos y muy finos, aproximadamente esféricos, tubulares y vesiculares, dentro y entre agregados; presencia de cutanes de arcilla y concreciones de manganeso, densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción muy baja al

HCL; con reacción moderada al H₂O₂; transición al siguiente horizonte claro, irregular.

Horizonte BC. 109-140 cm; fresco; color en seco 2.5 YR 4/4 (*Reddish brown*); 2.5 YR 4/6 (*Red*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques angulares, finos, medios, gruesos y muy gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos y muy finos, tubulares, cilíndricos y vesiculares, entre agregados; presencia de cutanes de arcilla. concreciones de manganeso y concreciones de roca intemperizada; densidad baja de raíces finas; reacción muy baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂ por la presencia de concreciones de manganeso; transición al siguiente horizonte gradual, irregular.

Horizonte Cw. 140-190 cm; fresco; color en seco 5 YR 4/6 (*Yellowish red*); 2.5 YR 4/8 (*Red*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques angulares, finos, medios, gruesos y muy gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos y muy finos, vesiculares intersticiales, entre agregados; presencia de cutanes de arcilla, concreciones de manganeso y concreciones de roca intemperizada; densidad baja de raíces finas; reacción muy baja al HCL; con reacción muy baja al H₂O₂

Análisis físicos del Perfil 2

| Horizonte | Espesor | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | DA | Humedad gravimétrica |
|-----------|---------|-------|------|---------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm ⁻³ | % |
| 0-3 | 3 | 59.88 | 20 | 20.12 | Franco arcillo limosa | 0.902 | 31.823 |
| 3-10 | 7 | 19.88 | 34 | 46.12 | Franco arcillo limosa | 1.244 | 26.088 |
| 10-50 | 40 | 23.88 | 28 | 48.12 | Franco arcillosa | 1.203 | 24.641 |
| 50-109 | 59 | 7.88 | 26 | 66.12 | Arcillosa | 1.379 | 27.869 |
| 109-140 | 31 | 21.88 | 32 | 46.12 | Arcillosa | 1.232 | 31.999 |
| 140-190 | 50 | 19.88 | 32 | 48.12 | Arcillosa | 1.250 | 31.413 |

Análisis químicos del Perfil 2

| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m ⁻¹ |
| 0-3 | 3 | 5.96 | 0.382 |
| 3-10 | 7 | 5.19 | 0.157 |
| 10-50 | 40 | 5.61 | 0.099 |
| 50-109 | 59 | 5.03 | 0.029 |
| 109-140 | 31 | 5.59 | 0.024 |
| 140-190 | 50 | 5.57 | 0.020 |

Análisis químicos del Perfil 2

| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|-------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg ⁻¹ | % |
| 21.05 | 27.32 | 35.52 | 19.44 | 12.96 | 0.03 | 0.17 | 91.80 |
| 8.58 | 11.13 | 28.86 | 2.16 | 11.88 | 0.03 | 0.20 | 49.44 |
| 4.68 | 6.07 | 22.20 | 2.16 | 10.80 | 0.03 | 0.18 | 59.31 |
| 2.34 | 3.04 | 41.07 | 2.16 | 10.80 | 0.02 | 0.18 | 32.05 |
| 1.87 | 2.43 | 23.31 | 1.08 | 10.80 | 0.02 | 0.18 | 51.83 |
| 1.56 | 2.02 | 31.08 | 1.08 | 11.88 | 0.02 | 0.18 | 42.33 |

Perfil 3

Fecha de descripción: 19 de junio de 2017

Pendiente: 9°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 2-1 cm; Hojarasca sin mineralización aparente.

Horizonte Oe. 2-1 cm; Hojarasca fragmentada

Horizonte Oa. 1-0 cm; Hojarasca totalmente descompuesta.

Horizonte B. 0-20 cm; muy seco; color en seco 5 YR 3/2 (*Dark reddish brown*); 5 YR 3/4 (*Dark reddish brown*) color en húmedo; textura arcillosa; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura en bloques subangulares finos, medios y gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados baja; poros muchos muy finos y finos, vesiculares y tubulares, dentro y entre agregados; densidad mediana de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte ligeramente ondulado y claro.

Horizonte Cw1. 20-59 cm; seco; color en seco 7.5 YR 5/8 (*Strong brown*); 10 YR 4/6 (*Dark yellowish brown*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques subangulares, finos, medios, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados mediana; poros comunes finos y muy finos, vesiculares y tubulares, dentro y entre agregados; presencia de cutanes; densidad baja de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción baja al H₂O₂; transición al siguiente horizonte uniforme y difuso.

Horizonte Cw2. 59-105 cm; Fresco; color en seco 7.5 YR 5/8 (*Strong brown*); 10 YR 4/6 (*Dark yellowish brown*) color en húmedo; textura Arcillosa; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura en bloques subangulares, finos, medios, gruesos y muy gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados mediana; poros comunes finos y muy finos, vesiculares, dentro de agregados; presencia de cutanes; densidad muy baja de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción baja al H₂O₂.

Análisis físicos del Perfil 3

| Horizonte | Espesor | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | Da | Humedad gravimétrica |
|-----------|---------|-------|------|---------|----------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm^{-3} | % |
| 0-20 | 20 | 32.96 | 12 | 55.04 | Arcillosa | 1.485 | 30.199 |
| 20-59 | 39 | 18.96 | 26 | 55.04 | Arcillosa | 1.432 | 33.322 |
| 59-105 | 46 | 18.96 | 26 | 55.04 | Arcillosa | 1.326 | 38.487 |

Análisis químicos del Perfil 3

| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m^{-1} |
| 0-20 | 20 | 5.80 | 0.017 |
| 20-59 | 39 | 5.71 | 0.008 |
| 59-105 | 46 | 5.67 | 0.007 |

Análisis químicos del Perfil 3

| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | N | SB |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg^{-1} | cmol kg^{-1} | cmol kg^{-1} | cmol kg^{-1} | cmol.kg^{-1} | % |
| 3.90 | 5.06 | 22.20 | 1.08 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 34.99 |
| 1.25 | 1.62 | 28.86 | 3.24 | 5.40 | 0.03 | 0.21 | 30.76 |
| 1.25 | 1.62 | 29.97 | 3.24 | 4.32 | 0.02 | 0.19 | 25.93 |

Perfil 4

Fecha de descripción: 25 de junio de 2017

Pendiente: 10°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 1-0 cm; Hojarasca sin mineralización aparente.

Horizonte AC. 0-13 cm; Seco; color en seco 10 YR 3/3 (*Dark brown*); 7.5 YR 3/3 (*Dark brown*) color en húmedo; textura Franco arcillo limosa; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura en bloques angulares, medios, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros biogénicos finos y medianos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad muy alta de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte claro y uniforme.

Horizonte Cw. 13-62 cm; fresco; color en seco 10 YR 7/6 (*Yellow*); 10 YR 7/4 (*Very pale brown*) color en húmedo; textura Arcillo arenosa; moderadamente ácido (pH 5.0 en agua); estructura cementación, cutanes probablemente de arcilla entre los poros de raíz, presencia de lenguas albelúvicas; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados mediana; poros comunes finos y medianos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad muy baja de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción moderada al H₂O₂.

Nota: color seco y húmedo de moteados y manchas de cada horizonte.

Horizonte de 0-13 cm. 60 % de manchas dispersas en el agregado. Color en seco 5 YR 5/8 (yellowish red). Color en húmedo 5 YR 4/6 (yellowish red).

Horizonte de 13-62 cm. 40 % de manchas color en seco 5G 6/2 (pale green). Cutanes color en seco 5 YR 4/6 (yellowish red). Color de manchas en húmedo 5 G 4/2 (grayish green). Cutanes color en húmedo 5 YR 3/4 (dark reddish brown).

Análisis físicos del Perfil 4

| Horizonte | Espesor | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | Da | Humedad gravimétrica |
|-----------|---------|-------|------|---------|------------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm ⁻³ | % |
| 0-13 | 13 | 15.32 | 40 | 44.68 | Franco arcillosa | 1.085 | 27.167 |
| 13-62 | 49 | 13.32 | 30 | 56.68 | Arcillosa | 1.261 | 34.073 |

Análisis químicos del Perfil 4

| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m ⁻¹ |
| 0-13 | 13 | 5.80 | 0.143 |
| 13-62 | 49 | 5.89 | 0.055 |

Análisis químicos del Perfil 4

| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg ⁻¹ | % |
| 8.58 | 11.13 | 27.75 | 7.56 | 5.40 | 0.03 | 0.19 | 47.50 |
| 2.18 | 2.83 | 21.09 | 4.32 | 4.32 | 0.03 | 0.20 | 42.04 |

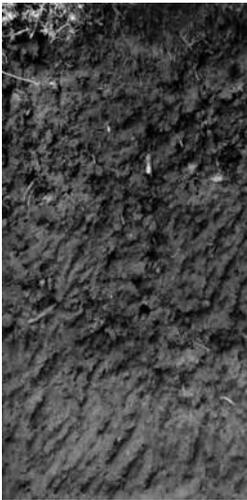
Perfil 5

Fecha de descripción: 21 de mayo de 2017

Pendiente: 13°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 3-2 cm; Hojarasca sin mineralización aparente.

Horizonte Oe. 2-0 cm; Hojarasca moderadamente descompuesta.

Horizonte A. 0-4 cm; muy seco; color en seco 5 YR 5/2 (*Reddish gray*); 10 YR 2/2 (*Very dark brown*) color en húmedo; textura Franco-limosa fina; ligeramente ácido (pH 6.0 en agua); estructura en bloques angulares biogénicos, finos, medios, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros muy finos, y finos, vesiculares, cilíndricos y tubulares, dentro y entre agregados; densidad extremadamente alta de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte ondulado y claro.

Horizonte AC. 4-26 cm; muy seco; color en seco 5 YR 5/4 (*Reddish brown*); 5 YR 4/3 (*Reddish brown*) color en húmedo; textura Franco arcillosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura en bloques angulares, medios, gruesos y muy gruesos, fuerte; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros comunes, medianos, finos y muy finos, vesiculares, tubulares y cilíndricos, entre agregados; presencia de cutanes; densidad alta de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción moderada al H₂O₂; transición al siguiente horizonte irregular y difuso.

Horizonte Cw. 26-46 cm; fresco; color en seco 5 YR 5/4 (*Reddish brown*); 5 YR 4/2 (*Dark reddish gray*) color en húmedo; textura Franco arcillo limosa; moderadamente ácido (pH 5 en agua); estructura masiva; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados alta; poros finos y muy finos, vesiculares, dentro de agregados; densidad media de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción muy baja al H₂O₂.

Nota: color seco y húmedo de moteados y manchas de cada horizonte.

Horizonte de 0.4 cm. 20 % de manchas pequeñas dispersas y difusas. Color en seco 5 YR 5/8 (yellowish red). Color en húmedo 5 YR 4/6 (yellowish red).

Horizonte de 4-26 cm. 20 % de manchas dispersas. Color en seco 5 YR 5/6 (yellowish red), color en húmedo 5 YR 5/8 (yellowish red). Cutanes: color en seco 5 YR 4/6 (yellowish red), color en húmedo 5 YR 3/4 (dark reddish brown).

Horizonte de 26-46 cm. 40 % de manchas color en seco 7.5 YR 5/8 (Strong brown) y color en húmedo 5 YR 5/8 (yellowish red).

Análisis físicos del Perfil 5

| Horizonte | Espeso | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | Da | Humedad gravimétrica |
|-----------|--------|-------|------|---------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm ⁻³ | % |
| 0-4 | 4 | 69.88 | 10 | 20.12 | Franco arcillo limosa | 0.631 | 35.421 |
| 4-26 | 22 | 17.88 | 34 | 48.12 | Arcillosa | 1.291 | 19.993 |
| 26-46 | 20 | 15.88 | 38 | 46.12 | Arcillosa | 1.444 | 22.361 |

Análisis químicos del Perfil 5

| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m ⁻¹ |
| 0-4 | 4 | 4.44 | 0.318 |
| 4-26 | 22 | 5.0 | 0.0925 |
| 26-46 | 20 | 4.86 | 0.0663 |

Análisis químicos del Perfil 5

| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg ⁻¹ | % |
| 2.03 | 2.63 | 25.53 | 7.56 | 7.56 | 0.03 | 0.18 | 60.05 |
| 4.68 | 6.07 | 22.20 | 4.32 | 6.48 | 0.03 | 0.18 | 49.58 |
| 2.03 | 2.63 | 15.54 | 2.16 | 5.40 | 0.02 | 0.19 | 50.04 |

Perfil 6

Fecha de descripción: 18 de junio de 2017

Pendiente: 16°



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA



Horizonte Oi. 1-0 cm; Hojarasca sin mineralización aparente.

Horizonte AC. 0-17 cm; Fresco; color en seco 2.5 Y 5/6 (*Light olive brown*); 2.5 Y 3/3 (*Dark olive brown*) color en húmedo; textura Franco arcillo limosa; fuertemente ácido (pH 4.0 en agua); estructura en bloques angulares finos, medios y gruesos, moderada; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados baja; poros biogénicos muchos muy finos y finos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad baja de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂; transición al siguiente horizonte gradual y uniforme.

Horizonte Cw. 17-43 cm; mojado; color en seco 5 Y 5/6 (*Olive*); 5 Y 5/4 (*Olive*) color en húmedo; textura Arcillo arenosa; fuertemente ácido (pH 4.0 en agua); estructura masiva; pedregosidad del 1%; estabilidad de agregados baja; poros comunes finos, vesiculares y tubulares, dentro de agregados; densidad muy baja de raíces finas; reacción baja al HCL; con reacción intensa al H₂O₂.

Nota: color seco y húmedo de moteados y manchas de cada horizonte.

Horizonte de 0-17 cm. 30 % de moteados: color en seco 7.5 YR 5/8 (strong brown), color en húmedo 5 YR 4/6 (yellowish red) y 40 % de moteados: color en seco 5 G 6/2 (pale green) y color en húmedo 5 G 5/2 (grayish green).

Horizonte de 17-43 cm. 40 % de moteados: color en seco 7.5 YR 5/8 (strong brown), color en húmedo 5 YR 4/6 (yellowish red) y 60 % de moteados: color en seco 5 G 6/2 (pale green) y color en húmedo 5 G 5/2 (grayish green).

Análisis físicos del Perfil 6

| Horizonte | Espesor | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural | Da | Humedad gravimétrica |
|-----------|---------|-------|------|---------|----------------|--------------------|----------------------|
| cm | cm | % | % | % | USDA | g cm^{-3} | % |
| 0-17 | 17 | 18.96 | 36 | 45.04 | Arcillosa | 1.285 | 22.992 |
| 17-43 | 26 | 12.96 | 36 | 51.04 | Arcillosa | 1.267 | 31.366 |

Análisis químicos del Perfil 6

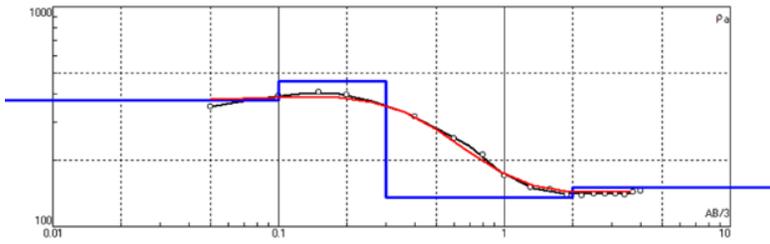
| Horizonte | Espesor | pH | CE |
|-----------|---------|----------|--------------------|
| cm | cm | 2:1 agua | dS m^{-1} |
| 0-17 | 17 | 5.88 | 0.022 |
| 17-43 | 26 | 5.97 | 0.010 |

Análisis químicos del Perfil 6

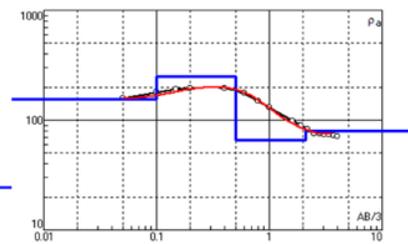
| CO | MO | CIC | Ca | Mg | K | Na | SB |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| % | % | cmol kg^{-1} | % |
| 5.85 | 7.59 | 23.31 | 4.32 | 3.24 | 0.02 | 0.18 | 33.31 |
| 2.03 | 2.63 | 24.42 | 4.32 | 4.32 | 0.02 | 0.18 | 36.21 |

ANEXO 2

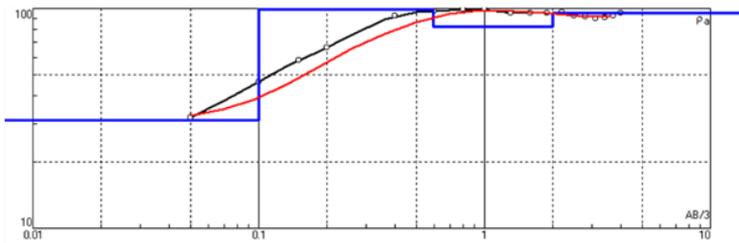
Curvas de resistividad aparente obtenidas con el sondeo eléctrico vertical



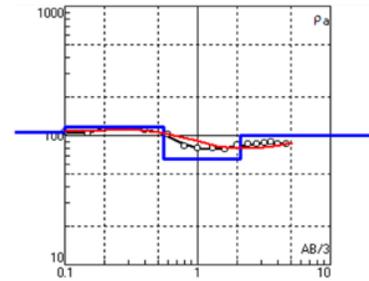
Perfil 1 (P1)



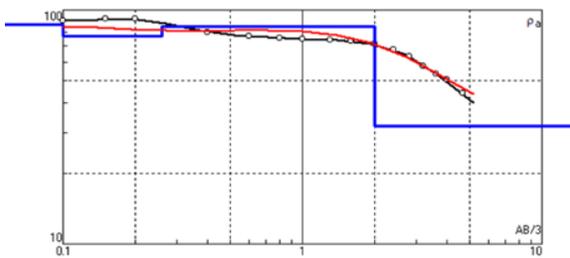
P2.B



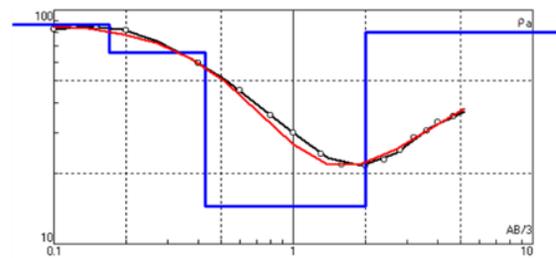
Perfil 3 (P3)



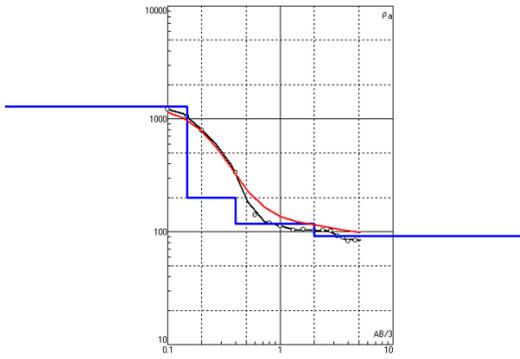
P4.B



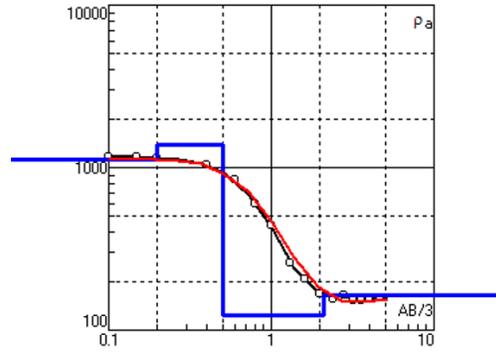
P5.B



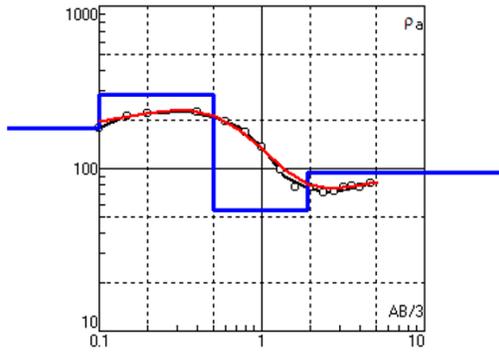
P6.B



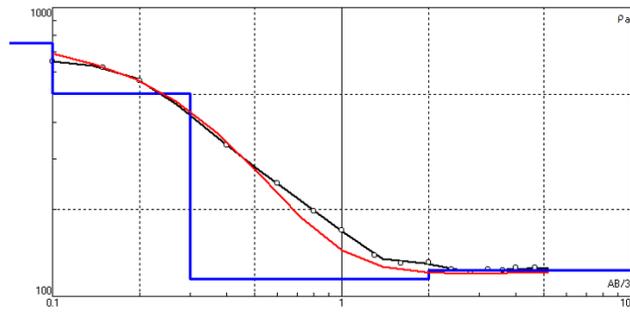
B1



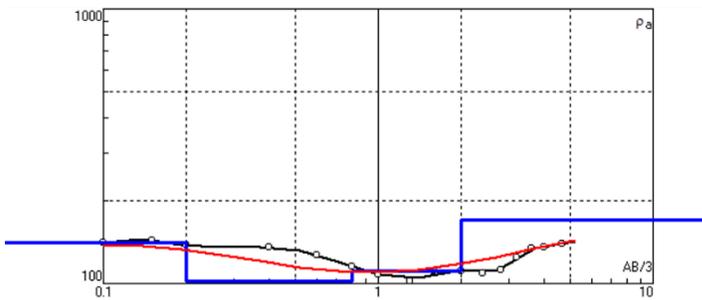
B2



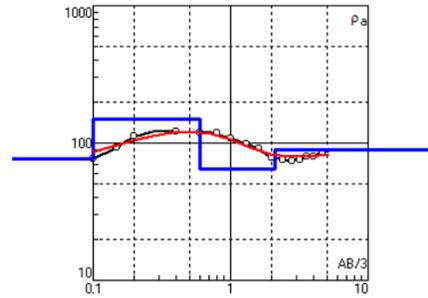
B3



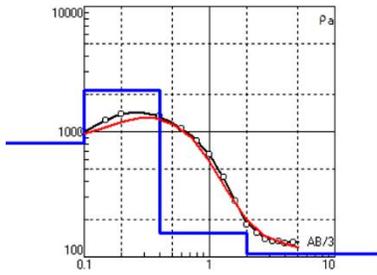
B4



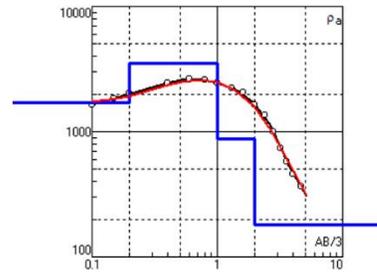
B5



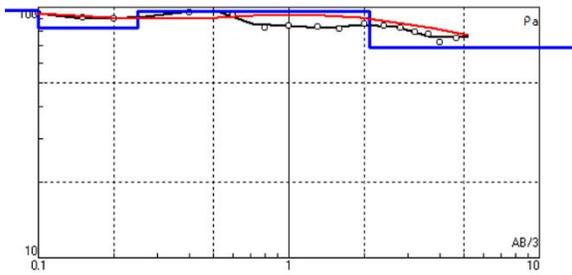
B6



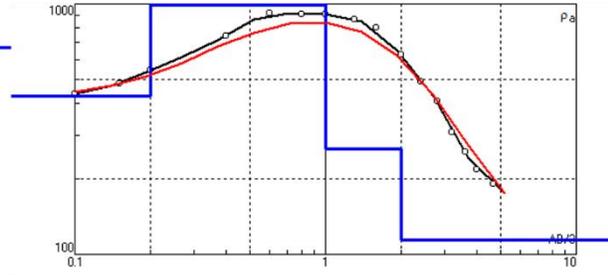
B7



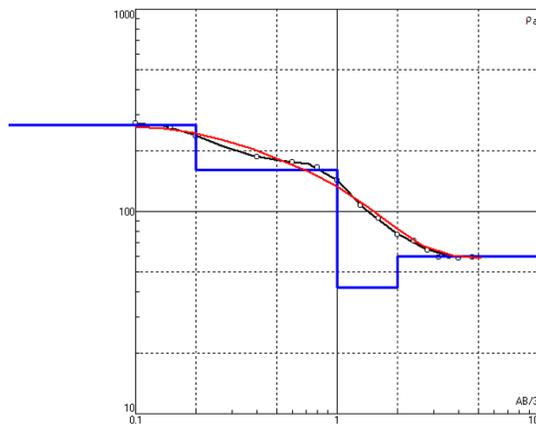
B8



B9



B10



B11