



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGIA

**TRANSFORMACIONES PEDOGENÉTICAS POR EFECTO DEL
CAMBIO DE USO DE SUELO EN SISTEMAS CULTIVADOS
POR CAÑA EN LA REGIÓN DE CÓRDOBA, VERACRUZ**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

(CIENCIAS AMBIENTALES)

PRESENTA

ING. YUNIER CABRERA VÁZQUEZ

JURADO EXAMINADOR

DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO (Instituto de Geología, UNAM)

DRA. LYSSETTE E. MUÑOZ VILLERS (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)

DR. BRUNO M. CHÁVEZ VERGARA (Instituto de Geología, UNAM)

DR. HÉCTOR V. CABADAS BÁEZ (Facultad de Geografía, UAEM)

DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ (Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, MARZO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a CONACYT, por haberme otorgado una beca, sin la cual no hubiera sido posible la realización de este sueño, la que sin duda alguna fue indispensable y de gran ayuda económica para realizar el presente proyecto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de venir a este gran país y formar parte del amplio grupo de alumnos que estudian en esta Máxima Casa de Estudios de México.

Al Instituto de Geología, por el apoyo económico concedido para la culminación de este proyecto de tesis, así como al claustro de profesores que lo integran por haberme brindado las herramientas, conocimientos y enseñanzas necesarios para realizar la presente investigación.

En especial a la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, por toda su paciencia, dedicación y ayuda, pues más que una directora de tesis fue para mí, una madre en este hermoso país, brindándome no sólo todo su conocimiento sino también consejos y apoyo incondicional.

A los miembros del Comité Tutorial, compuesto por el Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara y el Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez, los que junto a mi asesora de tesis la Dra. Elizabeth Solleiro, dirigieron y apoyaron con su conocimiento la realización del proyecto.

A los miembros de este tribunal y examen de grado: Las Dras. Elizabeth Solleiro Rebolledo y Lyssette Elena Muñoz Villers, así como los Drs. Bruno Manuel Cháves Vergara, Héctor Víctor Cabadas Báez y Arturo Pérez Vázquez, por sus innumerables consejos, sugerencias y comentarios durante la revisión y culminación del presente trabajo de investigación lo que fue de gran ayuda para el perfeccionamiento del documento de tesis.

Al Lic. Reyes-García y familia por permitirme realizar este trabajo en las áreas de su propiedad, por brindarme su ayuda y hacerme sentir como en mi casa. Al Sr. Joacho por su ayuda y colaboración durante todo el trabajo de campo.

Al M. en C. Jaime Díaz por el apoyo en las salidas de campo, toma de muestras y la realización de los análisis de laboratorio, fundamentalmente en lo referente a las técnicas de micromorfología. Asimismo, al M. en C. Daniel Ramos y los integrantes del laboratorio de Geoquímica Ambiental (Laboratorio de Geoquímica y Mineralogía, LANGEM) del Instituto

de Geología por haberme permitido realizar análisis necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Al Sr Jorge René Alcalá por su ayuda y apoyo en los análisis de laboratorios realizados en el laboratorio de Física de Suelos, del LANGEM, del Instituto de Geología.

Al MC Hermenegildo Barceinas Cruz y la Dra. Beatriz Ortega Guerrero del Laboratorio de Susceptibilidad Magnética del Instituto de Geofísica, por su apoyo en la realización e interpretación de los análisis de susceptibilidad magnética.

A todos mis compañeros del grupo de Paleosuelos, Jaime, Yaz, Gigi, Daisy, Fer, el Dr. Sedov, en fin, a todo ese excepcional grupo que de manera incondicional apoyaron y brindaron su amistad y ayuda en todo momento.

A mi familia que siempre me apoyó en todas y cada una de mis decisiones, especialmente mi madre y hermanos que fueron el motor impulsor que me dio fuerzas para continuar cuando creía que ya no podría.

A mi abuela del alma, por ser la mejor persona que he conocido, por estar presente cuando incluso ya no estaba físicamente, por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme ese espíritu de lucha y compromiso, por haber sido la mejor abuela del mundo, que dios me la tenga en la gloria.

A todo el grupo de cubanos, mis amigos de corazón, por su apoyo incondicional y formar parte de mi vida durante este tiempo, a los que ya conocía y a los que tuve la suerte de poder conocer durante esta increíble etapa de mi vida.

A Yoandris, por formar parte en este viaje, por su apoyo incondicional y compañía en esta experiencia, por toda su paciencia y bondad, por su presencia y confianza, por todo lo que me brindo incondicionalmente.

A Zaida, Rachel, Félix, Raúl, Tamara, Majela, en fin, toda esa bella familia de amigos que me ayudaron en esta etapa de mi vida y sin los cuales no hubiera sido posible este sueño.

A Dayamy y Michel por su incondicional apoyo y voluntad de ayudar en todo momento, por ser parte de esas personas que hicieron posible y colaboraron para que pudiera estar aquí.

A Lander que siempre me brindó apoyo, fuerzas y soluciones ante cada obstáculo que se presentó y que fue un pilar importante para culminar con éxito este proyecto en mi vida, porque desde que nos conocimos fue, es y será un gran amigo, hermano y compañero de lucha.

A todos, muchísimas gracias por estar presentes de diversas formas, durante estos casi 3 años de aprendizaje y superación personal y profesional en este maravilloso país.

Y a todos los que faltaron por mencionar, porque son muchas personas a las que agradecer, quiero que sepan que a todos sin excepción de nadie, los llevo en el corazón, mil gracias a todos.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. HIPÓTESIS	4
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. GENERAL	5
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. SUELO: DEFINICIÓN	6
2.2. FACTORES FORMADORES	7
2.2.1. EL CLIMA	8
2.2.2. ORGANISMOS	8
2.2.3. EL RELIEVE	9
2.2.4. MATERIAL PARENTAL	9
2.2.5. TIEMPO	10
2.3. PEDOGÉNESIS	10
2.4. INFLUENCIA ANTRÓPICA EN EL PROCESO DE PEDOGÉNESIS	11
3. ÁREA DE ESTUDIO	14
3.1. UBICACIÓN	14
3.2. FISIOGRAFÍA	15
3.3. GEOLOGÍA	15
3.4. GEOMORFOLOGÍA	15
3.5. EDAFOLOGÍA	16
3.6. CLIMA	16
3.7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	17
3.8. VULCANISMO	17
4. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1. TRABAJO DE CAMPO	19
4.1.1. MUESTRAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA	20

4.1.2.	MUESTRAS DE MICROMORFOLOGÍA	21
4.1.3.	MUESTRAS PARA ANÁLISIS GENERALES	21
4.2.	TRABAJO DE LABORATORIO	21
4.2.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA	21
4.2.1.1.	COLOR	21
4.2.1.2.	TEXTURA	21
4.2.1.3.	SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA	22
4.2.2.	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	23
4.2.2.1.	DETERMINACIÓN DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	23
4.2.2.2.	CUANTIFICACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO (CO Y CI)	23
4.2.2.3.	MICROMORFOLOGÍA	24
4.2.2.4.	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICAS	24
5.	RESULTADOS	26
5.1.	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PERFILES EN EL CAMPO -	26
5.1.1.	PROPIEDADES FÍSICAS	36
5.1.1.1.	COLOR	36
5.1.1.2.	TEXTURA Y SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA --	36
5.1.2.	PROPIEDADES QUÍMICAS	43
5.1.2.1.	PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	43
5.1.2.2.	CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO (CO Y CI)	43
5.1.2.3.	MICROMORFOLOGÍA	44
5.1.2.4.	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	54
5.1.2.5.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CADA PERFIL	55
6.	DISCUSIÓN	56
6.1.	ETEROGENEIDAD DE LOS PERFILES ESTUDIADOS	56

6.2. LOS FACTORES DE FORMACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA PEDOGÉNESIS -----	58
6.2.1. RELIEVE VS MATERIAL PARENTAL -----	58
6.2.2. INFLUENCIA DEL TIEMPO -----	60
6.3. TRANSFORMACIÓN DE LAS TENDENCIAS PEDOGENÉTICAS POR LA INFLUENCIA ANTRÓPICA -----	60
6.3.1. CULTIVO DE CAÑA VS CAFÉ -----	60
6.3.2. INFLUENCIA PRE-HISPÁNICA -----	61
7. CONCLUSIONES -----	63
BIBLIOGRAFÍA -----	64

RESUMEN

El suelo es un recurso natural formado por materiales minerales y orgánicos con propiedades que reflejan el impacto de los factores formadores (material parental, clima, relieve, organismos y tiempo). En general, los suelos están en constante cambio, lo que se expresa en la diferenciación de los horizontes genéticos, al llevarse a cabo los procesos de formación. Muchas de sus propiedades pueden cambiar como resultado del uso del suelo o por factores naturales. Los suelos en las regiones cañeras sufren un manejo intensivo que repercute en sus características naturales. En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de suelos en Amatlán de los Reyes, Veracruz, caracterizado por ser una zona cañera durante largo tiempo (desde el siglo XVIII), para determinar si el manejo antrópico ha conducido a cambios en las tendencias pedogenéticas en los suelos, o si las variaciones se deben a las condiciones particulares de los factores formadores. Para ello se seleccionaron nueve perfiles de suelo con diferente uso: los perfiles 1, 2 y 3 dentro del área cañera, ubicados siguiendo la pendiente del terreno a diferentes niveles; el perfil 4 también en el área cañera, pero en un corte lateral del camino, que permitió observar los horizontes más profundos; el perfil 5 en un cafetal a pocos metros del área cañera; los perfiles 6, 7 y 8 en laderas de lomeríos de caliza y el perfil 9 que corresponde a un suelo rojo (que en el pasado estuvo sembrado con caña), localizado en una terraza alta.

En el laboratorio se determinaron las propiedades físicas y químicas (color, textura, susceptibilidad magnética, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico y materia orgánica). Asimismo, se tomaron muestras inalteradas de los horizontes genéticos de las que se hicieron láminas delgadas para estudios micromorfológicos. Se determinó la mineralogía por medio de difracción de rayos X. Dentro de los resultados obtenidos, resalta que los perfiles 1, 2 y 3 presentan características comunes (color, profundidad, tipo de horizontes y pedregosidad), los perfiles 4, 5 y 9, muestran rasgos parecidos (son los suelos más profundos, con evidencia de grado más avanzado de intemperismo y pedogénesis mucho más evolucionada). Los perfiles de las zonas de calizas presentan propiedades similares entre sí. Cabe señalar que en todos los perfiles destaca el elevado índice de intemperismo, el alto contenido de la fracción arcilla y también la mezcla de materiales muy intemperizados con

otros frescos. Los suelos cañeros mantuvieron una tendencia a ser suelos de colores más claros con mayores evidencias de alteración antrópica y menor contenido de materia orgánica. Se ha concluido que el manejo y uso de suelo afecta la pedogénesis, sin embargo, las condiciones de sitio claramente producen su propia tendencia diferenciadora, siendo el relieve, el factor que dirige los procesos.

Palabras claves: Intemperismo, procesos pedogenéticos, acción antrópica

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos son el resultado de la interacción de un conjunto de procesos y factores, los cuales les imprimen características y propiedades distintivas, en función del grado e intensidad en que actúen. La pedogénesis marca el desarrollo y evolución de los suelos en ambientes naturales y puede modificarse fácilmente por las actividades humanas. Sin embargo existen propiedades estables que sufren menos el impacto de la antropización y hay otras que se consideran de “cambio rápido”, como la transferencia de calor, la difusión de gases, los iones en solución o la compactación (Richter, 1987). Es sabido que la agricultura incide en la pedogénesis, por lo que también modifica las propiedades del suelo (Hernández *et al.*, 2013). Estas modificaciones pueden traer como consecuencia que se incremente la erosión por escorrentía superficial (Mollerup, 2008; Muñoz-Villers, McDonell, 2013), de tal forma que el material removido a otras zonas, inicia un nuevo proceso de formación de suelo bajo nuevas condiciones de desarrollo pedogenético.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La región de Córdoba, Veracruz es una de las áreas cañeras más grandes e importantes del país, la que no solo se destina al cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) sino de café (*Coffea arabica* L.). En esta zona, la caña de azúcar fue introducida desde la época colonial, teniendo altibajos en la producción, pero intensificándose a mediados del siglo pasado (Crespo y Vega, 1988). Amatlán de los Reyes, municipio aledaño a la región de Córdoba, ha sido explotado intensivamente para la producción de caña de azúcar, durante los últimos 100 años; en tanto que el café mantiene una producción menor, bajo sistemas tradicionales de café de sombra y está limitado a las zonas montañosas con vegetación característica de bosque de niebla (Reyes-García, comunicación personal).

Este municipio se encuentra en un pequeño valle drenado por el río Seco, el cual proviene de la región volcánica del Pico de Orizaba, ubicado al oeste. Asimismo, está circundado por sierras de caliza las cuales son cortadas por este río y forman pequeñas terrazas aluviales. Por otro lado, esta zona reporta asentamientos humanos pre-hispánicos de edad Formativa (900

AC), cuyos habitantes erigieron pequeñas pirámides que han sido prácticamente destruidas (Heredia, 2013).

Un problema característico de la zona reside en la práctica agrícola de monocultivo y uso intensivo en la caña de azúcar, la que presenta un ciclo anual y perenne que no permite el descanso o barbecho de la tierra. Esto tiene una fuerte repercusión en las características de los suelos, logrando presentar variaciones con respecto a su estado original, conduciéndolo en muchos casos a la pérdida, no solo de la materia orgánica sino de su estructura, color y finalmente de su productividad (Garside *et al.*, 2005). En los suelos cultivados con caña de azúcar en Brasil, se ha observado el fuerte impacto que tiene esta actividad, aumentando la densidad aparente (compactación) y el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial (Cavalcanti *et al.*, 2019).

Sin embargo, en los suelos del municipio de Amatlán de los Reyes, se desconoce cómo esta actividad antrópica, a la que han estado expuestos durante largo tiempo, ha modificado los procesos pedogenéticos que conllevan a diferencias en su desarrollo. En consecuencia, es fundamental determinar qué propiedades cambian por el cultivo de la caña de azúcar, en comparación con el efecto que imprime la pedogénesis natural.

1.2. HIPOTESIS

Los suelos cultivados por caña de azúcar presentaran cambios en sus propiedades a consecuencia de la alteración en los procesos pedogenéticos identificados en suelos naturales de Amatlán de los Reyes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Evaluar el efecto del cambio de uso del suelo sobre la modificación de las propiedades pedogenéticas en suelos cultivados por caña de azúcar en la región de Córdoba, Veracruz.

1.3.2. ESPECÍFICOS

- a) Determinar las características químicas y físicas de suelos localizados en parcelas del municipio Amatlán de los Reyes, con diferente uso del suelo (incluyendo perfiles de suelos bajo condiciones “naturales”).
- b) Comparar el grado de afectación en las propiedades de los suelos bajo diferentes tipos de manejo.
- c) Interpretar las transformaciones pedogenéticas presentes en suelos de Amatlán de los Reyes, Veracruz.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. SUELO: DEFINICIÓN

Dokuchaev (1883) definió el suelo como “aquellos horizontes de la roca que diaria o casi diariamente cambian sus relaciones bajo la influencia conjunta del agua, el aire y varias formas de organismos vivos y muertos”. Además, para su época, Dokuchaev concibió el suelo como “un cuerpo natural independiente y evolutivo, formado bajo la influencia de cinco factores”, de los cuales él consideraba que el clima y la vegetación era el más importante (Lorenz, 2015).

El suelo es, entonces, un cuerpo natural continuo, formado por materiales minerales y orgánicos con propiedades que reflejan el impacto de los factores formadores (material de origen, clima, organismos (incluido al hombre), topografía y tiempo). En general, los suelos están en constante cambio, lo que se expresa con la diferenciación de los horizontes genéticos, al llevarse a cabo los procesos de formación del suelo. Estos cambios se “detienen” cuando el suelo llega a un equilibrio cuasi estable, de acuerdo con la teoría clímax de Clement (1916). Sin embargo, los suelos son sistemas dinámicos, abiertos, con diversas sinergias que lo llevan a tomar caminos impredecibles a lo largo de su desarrollo (Phillips, 1998).

La ciencia del suelo considera el desarrollo y la evolución de los suelos, con transformaciones que ocurren tanto de manera lenta como acelerada. Richter (1987) sugiere que, en los suelos no cultivados, por ejemplo, tanto la estructura como la composición mineralógica cambian lentamente, a diferencia de otros componentes como el calor, el aire, el agua o los iones en solución, “componentes rápidos”. En suelos cultivados, existen modificaciones en el comportamiento de estos últimos, mientras que en la estructura y composición también se presentan cambios pero en intervalos de tiempo más largos.

De acuerdo con Richter (1987) los procesos más dinámicos en el suelo son: la evaporación, la lixiviación de carbonatos, el transporte de calor, la difusión de gases, el intercambio catiónico, la mineralización, la compactación y la desalinización. Por otro lado, los procesos

lentos se refieren a la descomposición del humus, la gleyzación, la laterización la podzsolización y la sodización. A diferencia, Targulian y Krasilnikov (2007) proponen como procesos rápidos la formación de lúter, la gleyzación, la estagnización, la pardificación, la crio y bioturbación, la compactación y la estructuración. Para los procesos más lentos se menciona a la ferralitización, la alitización, la petrocementación y la formación de saprolitas profundas.

Por otro lado, los sistemas de clasificación se basan en propiedades del suelo definidas en términos de horizontes, propiedades y materiales diagnóstico que son significativos para el uso y manejo de estos (WRB, 2015). Sin embargo, una vez que se realiza un cambio de uso del suelo, las propiedades físicas pueden cambiar y perderse el horizonte superficial, lo que repercute en la ausencia de las características diagnósticas, dificultando tener una clasificación precisa del suelo.

Independientemente de los autores y definiciones, existen múltiples puntos de encuentro en las interpretaciones sobre el suelo, ya que se coincide, en mayor o menor medida, en la estrecha interrelación entre los diferentes procesos y compartimentos de la Tierra. Lo anterior hace que los suelos presenten una heterogeneidad muy elevada, que hace necesario contar con múltiples elementos para poder realizar el análisis y clasificación de los suelos de forma particular o general.

2.2. FACTORES FORMADORES

La formación de un suelo comprende una serie de procesos que están sujetos o regulados por la incidencia de los llamados agentes o factores formadores de suelo. Estos pueden actuar indistintamente, con mayor o menor intensidad y, según sea el caso, se presentan variaciones en el suelo que resulte. Los factores que actúan en la formación de los suelos son clima, vegetación, relieve, material parental y el tiempo, actuando de variadas formas según sean las condiciones en las que se presenten cada uno de ellos de manera puntual o general (INTAGRI, 2017). Estos factores modifican o inciden en las transformaciones que ocurren

en la fase sólida del suelo, por medio del proceso de intemperismo, ya sea físico, químico o biológico. El intemperismo físico produce materiales clásticos que no solo ocupan un espacio dentro del suelo, sino que pueden jugar un papel importante en la estabilidad del mismo (Birkeland, 1999). El intemperismo químico transforma los minerales de la roca, libera cationes y es el motor en la formación de arcilla (Birkeland, 1999). En el intemperismo biológico, los organismos producen tanto un intemperismo físico como químico. Por su parte, los factores de formación actúan de la siguiente forma en la génesis de los suelos:

2.2.1. EL CLIMA

El clima es uno de los factores que influye de manera directa sobre la formación del suelo, pues condiciona la velocidad de intemperismo de la roca madre. Sus elementos más importantes son la temperatura y la precipitación. Estos dos parámetros afectan la tasa de intemperismo químico, el crecimiento de las poblaciones de organismos y la velocidad de descomposición de la materia orgánica. El agua es el solvente y medio para todas las reacciones y procesos del suelo, mientras que la temperatura determina la tasa de reacciones químicas y la intensidad de la actividad biológica.

2.2.2. ORGANISMOS

La actividad biológica de los organismos y microorganismos que integran la flora, fauna y en torno al suelo juegan un rol fundamental en la transformación y translocación de materiales orgánicos del suelo. Las raíces de la vegetación son capaces de crecer dentro de las grietas y fisuras de las rocas, acelerando el intemperismo físico y contribuyendo a la alteración química debido a que producen ácidos orgánicos y dióxido de carbono, que son compuestos que aceleran el proceso de descomposición de los minerales y la liberación de nutrientes requeridos por las plantas. Por otra parte, la vegetación crea microclimas ya que reduce la velocidad del viento, forma un área de sombreado de la superficie. También, los musgos y líquenes que crecen sobre las superficies de rocas contribuyen al proceso de intemperismo del material parental. Así como la participación de la fauna edáfica juega un papel importante en muchos de los procesos que se desarrollan y facilitan el intemperismo en los suelos (Lang *et al.*, 2011).

2.2.3. EL RELIEVE

El relieve es el conjunto de formas o irregularidades que presenta la corteza terrestre: elevaciones, depresiones, llanuras etc., y cada una de estas geoformas desempeña un papel fundamental en la formación del suelo, ya que influye en la distribución del agua recibida por medio de la lluvia, por lo que afecta directamente el proceso de la erosión hídrica. Como regla general, las superficies elevadas con relieves inclinados o convexos pierden más agua por escorrentía, arrastrando sedimentos, creando suelos más someros. En cambio, las superficies más bajas, cóncavas, reciben más agua y sedimentos, por lo que el desarrollo de los suelos es más profundo. De hecho, Phillips (2005) establece que un control importante en los paisajes erosionables es el intemperismo, ya que en las áreas montañosas los productos se movilizan, cuando son liberados por la acción de este proceso.

Asimismo, se ha propuesto que cuando existe inestabilidad geomórfica, los suelos llevan una tendencia pedogenética divergente, es decir sus propiedades se van diferenciando; por el contrario, cuando hay estabilidad, las tendencias son convergentes y los perfiles de suelos se asemejan (Phillips, 2005). Además, en el hemisferio norte las laderas con orientación sur reciben más radiación solar que las de orientación norte, por lo que los suelos de las laderas al sur son más cálidos y menos húmedos. Tal vez las diferencias entre las temperaturas sean de apenas dos grados y entre la humedad sea mínima, sin embargo, los efectos con el tiempo se maximizan, formando suelos con un contenido de materia orgánica más elevada en las laderas del norte.

2.2.4. MATERIAL PARENTAL

Los suelos derivan principalmente de las rocas, aunque pueden también originarse de materiales muy variados como cenizas volcánicas, depósitos de otros suelos, lava entre muchos otros. Estos materiales definen en gran parte el color, la composición, la textura y la estructura de los suelos. Sin embargo, un mismo tipo de roca o material parental puede dar lugar a suelos con distintas características, dependiendo las condiciones del medio en el que evolucione. El material parental incide sobre la fertilidad del suelo de muchas maneras. En primer lugar, el tipo de material parental determina los minerales que predominan en el suelo.

En segundo lugar, el material parental es la principal fuente de los nutrimentos que se liberan en la solución del suelo, que posteriormente pueden ser absorbidos por plantas, otros organismos o lixiviados.

2.2.5. TIEMPO

La formación del suelo es un proceso constante que involucra la interacción entre el clima, los organismos, el relieve, material parental y el tiempo. Este último actúa de forma transversal al resto de los factores formadores lo que le transfiere gran importancia en muchas de las características de los suelos, como puede ser su grado de desarrollo, aunque no siempre tiene esto una relación directa o real. El tiempo como factor de formación ha recibido atención, dado que indica el lapso en el cual el paisaje es “estable” permitiendo la pedogénesis. Jenny (1941) estimó las escalas de tiempo, para la formación de suelo y propuso un modelo de desarrollo hasta llegar a su equilibrio dinámico. Dado que no todas las propiedades de los suelos evolucionan de la misma manera, se ha planteado tener tiempos característicos de formación de ciertas propiedades, que pueden ir desde tiempos cortos ($N \times 10^1$ o 10^2), tiempos moderados ($N \times 10^3$ o 10^4) o tiempos largos ($N \times 10^5$ o 10^6) (Targulian y Krasilnikov, 2007). Por ejemplo, en México se tienen trabajos que muestran tiempos característicos para suelos volcánicos (Peña *et al.*, 2015; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2015).

2.3. PEDOGÉNESIS

La pedogénesis es el proceso mediante el cual se forma un suelo. La pedogénesis incluye un grupo de otros procesos y factores como son el intemperismo, humificación, tiempo, relieve, clima, material parental y organismos entre otros, que en su conjunto actúan en la formación y evolución o desarrollo del suelo, imprimiéndole características distintivas, mediante las cuales se les puede clasificar. El efecto de este proceso tiene su inicio en el material parental sobre el cual comenzará a formarse el suelo, bajo la acción del clima y los organismos, por medio del intemperismo. El desarrollo posterior depende de las diferentes combinaciones e incidencias de los otros factores formadores (Chadwick y Graham, 2000). La pedogénesis ha tenido diferentes definiciones las cuales convergen en el concepto de que es la responsable del desarrollo de los suelos. Las ideas iniciales proponían que la pedogénesis estaba

controlada únicamente por la vegetación y el clima, pero a finales del siglo XIX, V.V. Dokuchaev postula que el suelo es función de los cinco factores de formación. Estas ideas fueron retomadas posteriormente por Jenny en los años 40 amplió esta idea, destacando que cada uno de los factores tenía un papel fundamental de acuerdo al modo en que se incidían en un área en cuestión Jenny (1941). Targulian y Krasilnikov (2007) señalan que la pedogénesis integra a un conjunto de procesos pedogenéticos específicos, cada uno de los cuales se caracteriza por un conjunto de propiedades, expresando la dependencia con los factores de formación de la siguiente manera:

Factores formadores > funcionamiento interno del sistema suelo > procesos pedogenéticos específicos > propiedades del suelo > Funciones externas del suelo

Lo anterior pone de manifiesto que los procesos de pedogénesis tienen una gran importancia para explicar el comportamiento del desarrollo y funcionamiento del suelo y marcar las tendencias de cambio en caso de que alguno de los factores se modifique.

2.4. INFLUENCIA ANTRÓPICA EN EL PROCESO DE PEDOGÉNESIS

El proceso de la pedogénesis puede ser modificado o alterado por la actividad antrópica de forma sustancial, debido, en gran medida, al impacto y repercusión que tiene en las tendencias naturales, al romper el equilibrio en la organización original. Por ejemplo, la deforestación de áreas para el establecimiento tanto de ganado, viviendas o cultivos, alteran los procesos naturales de pedogénesis que ocurren en los suelos. Como se ha mencionado antes, el cultivo y la labranza transforman los componentes del suelo rápidamente (Richters, 1995). Por lo que el cambio de uso del suelo es uno de los aspectos que más puede afectar o modificar los procesos pedogenéticos, ya que esta actividad interviene de forma decisiva en la dinámica de varios elementos del sistema.

El hombre es un componente vivo de extrema importancia que está presente dentro del factor formador de actividad biológica, pero que por su influencia, se ha llegado a separar, dado que cada vez quedan menos lugares inaccesibles a su intervención y aún menos lugares

verdaderamente vírgenes. Su actividad se puede considerar tanto beneficiosa como perjudicial. La acción de este factor sobre el material parental de los suelos, la topografía, el clima (o sobre algunos de sus componentes) y los otros organismos vivos en función del tiempo es muy marcada.

El efecto antrópico se puede observar además en suelos empleados para la agricultura, sólo con la variación de las técnicas de cultivo empleadas, tipo de cultivo, si existe o no riego, calidad de las aguas de riego, fertilización química u orgánica, entre tantos otros factores que pueden generar o desencadenar un factor de cambio, tanto positivo como negativo, dentro de los suelos aun cuando estos se encuentren bajo condiciones similares.

El uso del suelo con fines cañeros genera un impacto importante debido al uso de maquinaria, empleo de productos agroquímicos, intensidad de uso, el paso de maquinaria y vehículos para la cosecha y todo el paquete tecnológico, en general, que exige este cultivo. Esto genera un desgaste en los suelos que debe ser compensado con un manejo adecuado, empleo de enmiendas que reponga al menos los elementos necesarios, extraídos por el cultivo, y las pérdidas que esto genera. En Cuba, se ha documentado la modificación de las propiedades de suelos rojos (Nitisoles ferrálicos, líxicos) por efecto de la agricultura, denominándose cambios agrogénicos (Hernández *et al.*, 2011; 2013).

La erosión del suelo es uno de los aspectos que más ha impactado a los suelos “antropogenizados”, por efecto del cambio de uso de suelo, lo que ha llevado a la pérdida de nutrimentos, materia orgánica, y, en general, a una transformación de las condiciones socioeconómicas de la población (Borrelli *et al.*, 2017). Otra de las propiedades que se modifican fuertemente, es la conductividad hidráulica, por compactación, lo que también incrementa el escurrimiento superficial y puede ocasionar daño por inundaciones, movimiento de masas, daño en la calidad del agua y otros riesgos asociados (Renderos *et al.*, 2002). Pérez-Pérez (2016) menciona que precisamente en suelos cultivados con caña, en la región de Xalapa-Coatepec se encontraron los valores más bajos de conductividad hidráulica, en comparación con suelos con cultivo de café y bosque mesófilo de montaña. Muñoz-Villers

y McDonell (2013) refieren que el escurrimiento en bosques maduros y secundarios en Veracruz es menor que en áreas con pasturas, ya que se encuentran más protegidos.

Por otro lado, los suelos que son destinados a usos de plantas maderables y/o perennes, como cultivos cafetaleros u otros, que siempre presentan una cobertura vegetal que proteja al suelo y no necesite de labores de preparación del suelo, ni otras técnicas de cultivo, generalmente se conservan más, pues mantienen una pedogénesis relativamente más natural, ya que crean ambientes muy controlados y similares a los naturales.

Con respecto a la materia orgánica, se sabe que este componente determina o regula muchas de las funciones y propiedades de los suelos, cumpliendo además diversos roles dentro del mismo, como la captura, secuestro o almacenamiento de carbono, mejorando sus características y funcionalidad. La acción antrópica puede favorecer notoriamente estos aspectos como ocurre en los suelos conocidos como *terra preta*, donde hay un proceso de melanización en los suelos producto a la gran almacenamiento de materia orgánica lo que provoca una súper fertilidad y aumento de muchas propiedades de los suelos haciéndolos muy productivos y eficientes (Sanabria y Ricaurte, 2013); aunque esta influencia antrópica pueden también llevar al deterioro y degradación del suelo, provocando erosión, pérdida de la materia orgánica y por consiguiente de la estructura, y muchas otras características que pueden ocasionar compactación, acidificación, detrimento de la productividad y hasta la desertificación en casos extremos (Mollerup, 2008). Hernández *et al.*, (2013) señalan que, con el cultivo intensivo de caña de azúcar, se produce una oxidación de la materia orgánica del suelo rompiendo la estructura, aumentando el factor de dispersión que conlleva a una compactación. Garside *et al.*, (2005) coinciden en esta observación, sobre todo en suelos con monocultivo de caña por largos periodos. La pérdida de materia orgánica repercute también en cambios notables del color del suelo (Moreno *et al.*, 2014). Debido a esto, es importante conservar no solo la cobertura vegetal o boscosa de los suelos, sino también el mantillo resultante de ésta, ya que así se mantiene un flujo constante de materiales que, en unión con la macro y micro-biota presente, formaran parte del reciclaje de materia y energía (nutrientes) dentro del sistema.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN

El Municipio de Amatlán de los Reyes tiene una superficie de 150.71 km², lo que representa el 0.2% de la superficie total del Estado de Veracruz. La división política territorial del Municipio comprende 76 localidades, de las cuales 4 son urbanas y el resto están caracterizadas como rurales, de acuerdo al criterio establecido por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Entre sus principales localidades encontramos: la ciudad de Peñuela, Paraje Nuevo, Guadalupe (La Patrona), Manuel León (San José de Gracia) y Amatlán de los Reyes, cabecera municipal. Se ubica geográficamente entre las coordenadas 18° 51' latitud Norte y 96° 55' longitud Oeste, a una altitud promedio de 720 metros sobre el nivel del mar. Limita al Norte con Córdoba y Atoyac, al Este con Atoyac y Yanga, al Sur con Cuichapa, Omealca y Coetzala, y al Oeste con Córdoba, Fortín y Naranjal (Ramírez, 2000) (Figura 1).

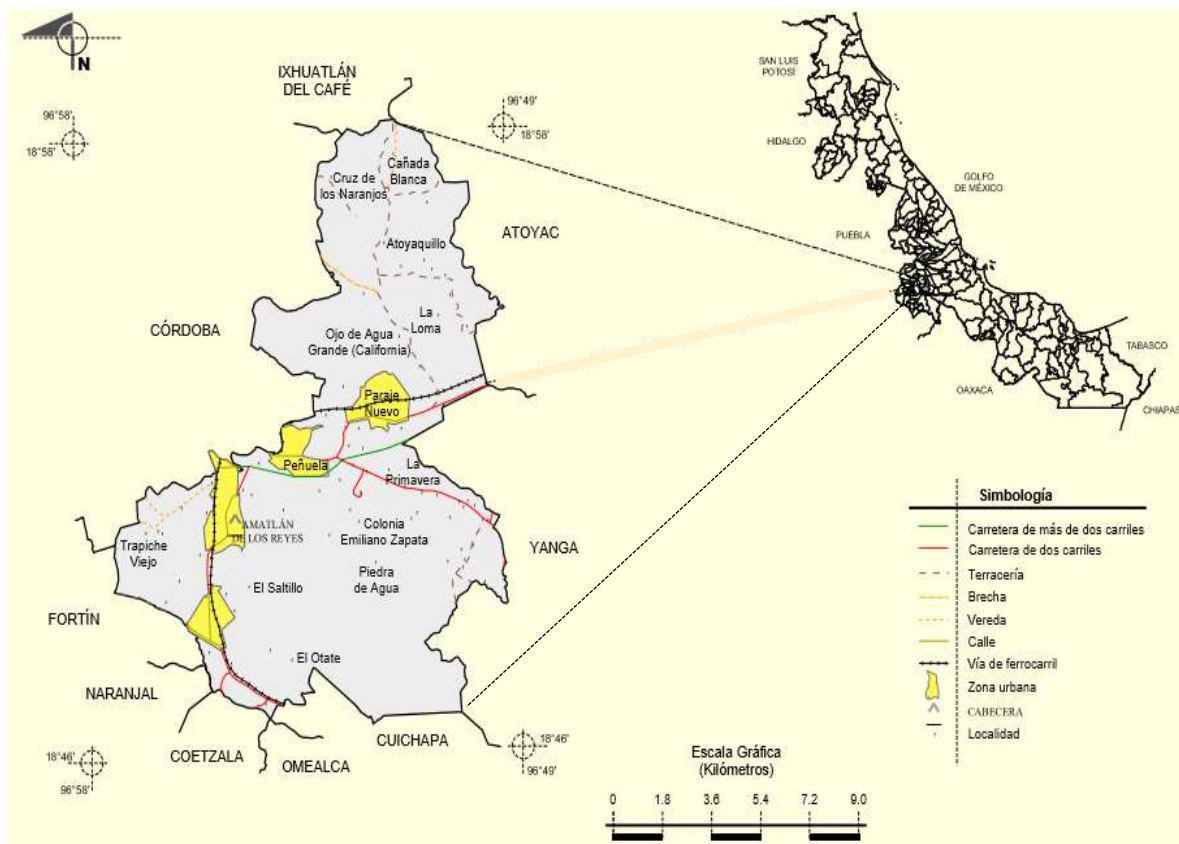


Figura 1. Mapa donde se muestra la ubicación geográfica del Municipio Amatlán de los Reyes (tomado del Prontuario de información geográfica del municipio, 2009).

3.2. FISIOGRAFÍA

Las provincias que comprenden al Estado de Veracruz son seis: la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, las Montañas de Chiapas, la Mesa Central, el Cinturón Neovolcánico Transversal y la Planicie costera del golfo de México. El municipio de Amatlán de los Reyes se localiza en las Provincias Fisiográficas del Eje Neovolcánico. La Provincia del Eje Neovolcánico representa el 14 % restante del territorio localizándose en la vertiente norte del municipio. Siguiendo la clasificación de Lugo Hubp (1991), citado por Ortiz (2011), dicha Provincia se originó posteriormente a la Sierra Madre Oriental y se conforma por lomeríos volcánicos, planicies de acumulación y estructurales, superficies de pie de monte y montañas plegadas, tanto del Plioceno-Cuaternario como del Terciario; motivo por el cual únicamente se identifican planicies y lomeríos a lo largo del municipio.

3.3. GEOLOGÍA

Amatlán de los Reyes, se localiza en el centro del Estado de Veracruz, en la provincia geológica Sierra Madre Oriental. Esta provincia se caracteriza por el afloramiento de rocas mesozoicas que fueron deformadas durante la Orogenia Laramide, y que en consecuencia muestran pliegues y cabalgaduras, así como la presencia de una variedad de fallas y fracturas. Al noroeste y al sur del municipio se observan calizas que están asociadas con las pendientes de mayor altitud del relieve del municipio (Ortiz, 2011). Las rocas mesozoicas están cubiertas por depósitos cuaternarios que varían entre conglomerados, depósitos de origen volcánico y depósitos fluviales, que pueden ser erosionados con facilidad.

3.4. GEOMORFOLOGÍA

En un contexto geomorfológico amplio del municipio Amatlán de los Reyes, se han diferenciado dos unidades geomorfológicas: planicies exógenas acumulativas y lomeríos exógenos tectónicos. La unidad geomorfológica de lomeríos exógenos tectónicos se localiza al norte, noroeste y sureste del municipio, esta unidad se encuentra conformada por rocas calizas, estructurados a partir de movimientos tectónicos. En estas zonas el material se encuentra estable, lo que disminuye su potencial a presentar deslaves. La altura máxima que se registró en estas zonas es de 400 metros a partir de la base de las estructuras; la disección

vertical va de ligera, mediana y hasta muy fuerte. La segunda unidad geomorfológica y de mayor extensión, es la comprendida por planicie exógena acumulativa, que comprende toda la parte central del Municipio, se encuentra conformada por material aluvial, es decir, material que es arrastrado por corrientes fluviales desde zonas altas y depositado en las bajas.

3.5. EDAFOLOGÍA

Ortiz (2011) plantea que en el municipio de Amatlán de los Reyes se pueden encontrar suelos tipo Vertisol, Leptosol, y Fluvisol, con diferentes niveles de antropización en dependencia a su ubicación y uso, siendo los Vertisoles aquellos predominantes en el territorio. Dentro de los Vertisoles están presentes, el Vertisol Crómico y el Vertisol Pélico, los cuales se caracterizan por ser suelos muy arcillosos, con poca profundidad y coloración oscura. Dichos suelos se localizan desde la vertiente sur-suroeste del municipio, pasando por la región central, hasta la vertiente este-noreste del territorio, zona donde se encuentra la mayor parte de los cultivos de caña de azúcar. Siguen en cobertura los Leptosoles, localizados en los extremos sureste y norte donde se encuentran los lomeríos exógenos tectónicos, caracterizándose por la presencia de una capa muy delgada menor a 10 centímetros de profundidad. Por último, el Fluvisol Eútrico generalmente está en zonas inundables y que suele utilizarse para la agricultura. El municipio se encuentra asociado justamente en esta unidad ya que varios afluentes de los ríos Seco y Jamapa, cruzan por la región. Es válido destacar que estos suelos pueden presentar diferentes niveles de afectación por incidencia volcánica dada su cercanía con el estratovolcán Pico de Orizaba (Amatlán de los Reyes, 2016).

3.6. CLIMA

El Municipio se encuentra influenciado por un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (88%) y semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (12%), teniendo un rango de precipitación de 1 900 – 2 600 mm y una temperatura promedio que oscila entre 19 y 24 °C (INEGI, 2009).

3.7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Según datos proporcionados en el Prontuario INEGI (2009), se identifican siete unidades de uso de suelo: selva alta perennifolia, remanente de selva alta perennifolia, uso de suelo habitacional, uso de suelo industrial, vegetación secundaria, compuesta por selva alta perennifolia y cultivos de café de sombra, área agrícola y área urbana. El área comprendida por selva alta perennifolia se localiza al sur-este del municipio, esta se caracteriza por ser la más compleja de todas las unidades vegetales y los árboles conservan durante todo el año su follaje. Los materiales geológicos de los que se deriva son calizas, cabe señalar que el suelo en esta zona son suelos aluviales profundos y bien drenados. Los remanentes de este tipo de vegetación, es decir parches no extensos se localizan principalmente en la zona centro y sur del municipio. La zona con vegetación secundaria se localiza al norte y comprende remanentes de selva alta perennifolia, así como cultivos de cafetal de sombra entre otros.

El área agrícola se localiza en la zona central y se cultiva principalmente la caña de azúcar. Con relación al uso de suelo urbano, éste comprende las áreas urbanas del municipio las cuales son: Peñuela, Paraje Nuevo, Guadalupe y la cabecera municipal Amatlán de los Reyes, así como otras localidades de orden rural. El área con uso de suelo industrial comprende el Parque Industrial Córdoba-Amatlán, el cual se encuentra dentro de una amplia zona conurbada, es considerado como un importante eje comercial, cuenta con un área de alrededor de 600 m² (Ortiz, 2011).

3.8. VULCANISMO

El volcán Pico de Orizaba o Citlaltépetl es clasificado como volcán activo en estado de quietud. La última erupción ocurrió en el año 1687. La actividad de este estratovolcán incluye la producción de flujos de lava de diferentes composiciones, caída de ceniza, flujos piroclásticos (ignimbritas y flujos de bloques y ceniza), así como avalanchas de escombros y lahares. Lo cual afecta gran parte del estado de Veracruz. La topografía influye con un gran porcentaje al peligro experimentado, ya que los diferentes tipos de flujos (como flujos piroclásticos, lahares, avalanchas) se canalizan por barrancas en los flancos del volcán en áreas proximales. El Municipio de Amatlán de los Reyes, sufriría de la ocurrencia de

fenómenos volcánicos, como son diferentes tipos de flujos y caída de ceniza en caso de una erupción (Ortiz, 2011).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó en el municipio Amatlán de los Reyes, en los meses de abril y agosto 2017. Para el estudio se tuvo en cuenta las características del terreno, vegetación, geoforma y uso del suelo, tomando un total de nueve perfiles (los perfiles 1, 2, 3 y 9 se realizaron en el mes de abril mientras que los perfiles 4, 5, 6, 7 y 8 en el mes de agosto) debido a que inicialmente solo se realizaría la evaluación en los suelos cañeros, pero luego de haber realizado el levantamiento y toma de muestras en el mes de abril, se decidió realizar otro muestreo para incrementar los perfiles a estudiar ya que se observó mayor variabilidad en las características de los suelos que tenían otro tipo de manejo. Los tres primeros perfiles se hicieron dentro de una parcela cultivada con caña de azúcar, tomándose los puntos para la realización de los perfiles a lo largo de la pendiente y a diferentes niveles, uno en la parte alta, otro en la media y el último en la baja. El cuarto perfil se realizó en la parte más elevada de la parcela, en el camino de acceso; el quinto se hizo en una parcela cafetalera que se encontraba al otro lado del camino; el sexto perfil se tomó en el piedemonte de una sierra de caliza; el séptimo y el octavo, en otro piedemonte, dentro de una depresión kárstica describiendo solo uno de ellos. El noveno perfil corresponde a un suelo rojo que antes estuvo cultivado con caña, que se localiza en la parte alta de una planicie, al lado de un camino cerca del pueblo (Figura 2).

Se realizó el levantamiento, tanto del área de estudio (delimitación del polígono) como de cada perfil realizado, con un GPS (Figura 2). En todos los puntos, se realizó la descripción de campo de acuerdo con la WRB (2015), para la confección de un registro detallado de todas las características que se observaron tanto en los perfiles como alrededor de estos, se tomaron muestras a diferentes profundidades lo cual fue útil para establecer cómo se comportan las características de los suelos y posteriormente realizar análisis en el laboratorio que ayudaran en el estudio. Es importante señalar que a pesar de que se realizaron los muestreos separados en tiempo (abril y agosto), se tuvo en cuenta para la interpretación de los resultados, debido a que puede haber variaciones en los resultados de análisis como el pH y conductividad, por las diferencias climáticas de la región fundamentalmente.

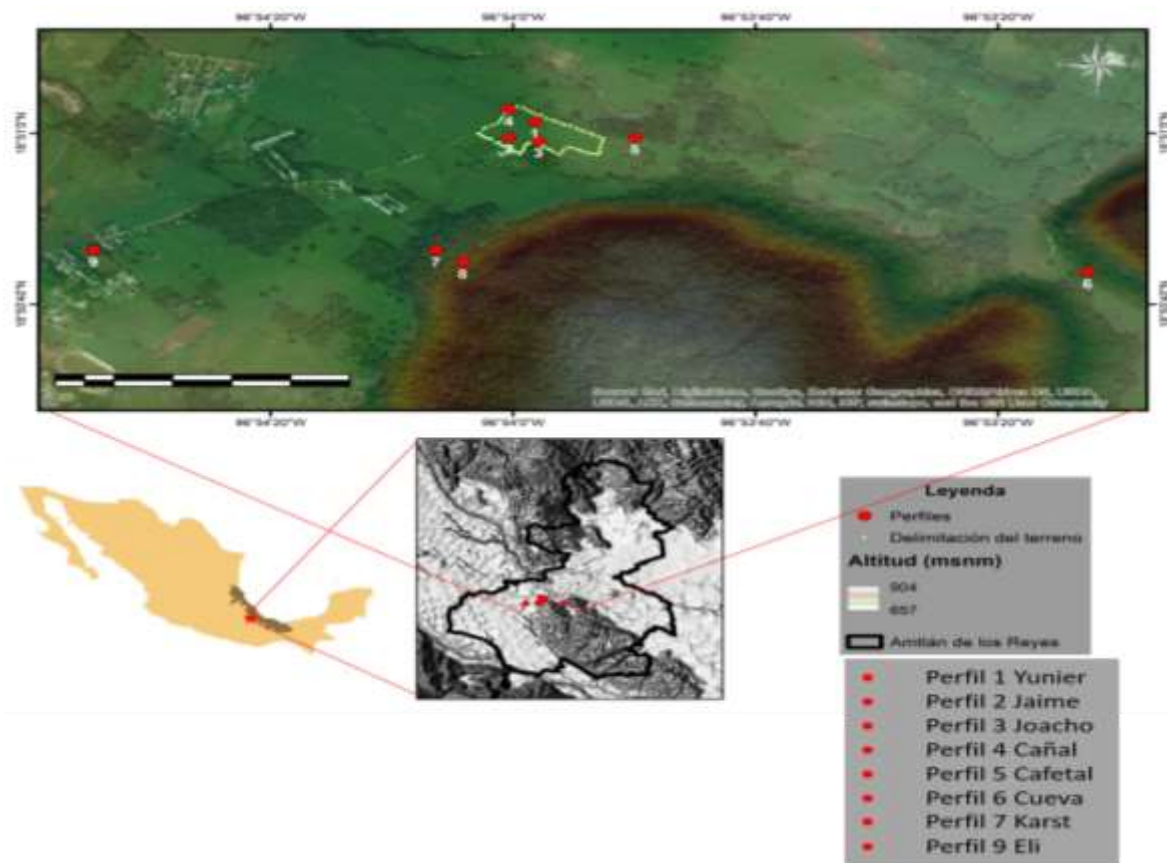


Figura 2. Mapa de distribución de los perfiles en la zona de estudio: Amatlán de los Reyes

La toma de muestras se realizó de forma general y particular, para los diferentes análisis de suelo realizados. Su colecta y posterior preparación previa al análisis de laboratorio se describe a continuación:

4.1.1. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (86 muestras)

Se tomaron muestras cada 10 cm comenzando desde la parte inferior y terminando en la más superficial, posteriormente se secaron en la estufa y molieron en el laboratorio y tamizaron a malla 2 mm.

4.1.2. MICROMORFOLOGÍA (30 muestras)

Se tomaron bloques del suelo sin alteración en cada perfil, por horizontes, se envolvieron en papel aluminio y se señaló su orientación. Posteriormente en el laboratorio se secaron a temperatura ambiente para iniciar la preparación de las láminas delgadas.

4.1.3. MUESTRAS PARA ANÁLISIS GENERALES

Se tomaron cerca de 2 kg de suelo por horizonte para realizar los restantes análisis en el laboratorio; estas muestras fueron secadas en la estufa y posteriormente molidas y tamizadas por un tamiz de malla 2 mm, para posteriormente tomar muestras de este para análisis como textura, color, pH, conductividad, entre otros.

4.2. TRABAJO DE LABORATORIO

4.2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

4.2.1.1. COLOR

El color es una de las propiedades físicas más importantes del suelo. A partir de este indicador se puede realizar inferencias sobre algunos de los procesos pedogenéticos asociados al suelo en cuestión. A menudo el color oscuro en los suelos se atribuye a contenidos de materia orgánica humificada, mientras que colores rojizos se relacionan con presencia de óxidos de hierro como producto del intemperismo, así como el color blanco se asocia a la presencia de sales, fundamentalmente carbonato de calcio.

La determinación del color se realizó bajo luz natural en cada uno de los horizontes con el empleo de la Tabla de colores Munsell (2000) tanto en húmedo como en seco, para lo cual fueron colocadas las muestras en una placa de porcelana y posteriormente determinado el color con las tablas.

4.2.1.2. TEXTURA (análisis granulométrico)

La textura del suelo constituye una de las características físicas más importantes, pues es a partir de ésta que se puede predecir el comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes (Flores y Alcalá, 2010). La textura indica la proporción de partículas fundamentales en el suelo: arcilla, limo y arena, que se agrupan en suelos de textura fina, media y gruesa. Además de ser un indicador del grado de desarrollo del suelo.

La determinación de la textura se llevó a cabo por el método combinado de tamices y de la pipeta. Para lo cual fueron tomados 20 g de suelo por muestra de suelo inalterado secos a temperatura ambiente, previamente molidos y tamizados (2 mm). Se aplicaron 10 ml de acetato de sodio (AcNa) para eliminar los carbonatos presentes. Asimismo, se puso peróxido de oxígeno al 30% para la destrucción de la materia orgánica, poniendo las muestras en baño María a 70 °C, hasta lograr un cambio de coloración que indica la destrucción de la materia orgánica. Posteriormente se eliminó los restos del peróxido, por medio de calentamiento a 300 °C en agua. Una vez destruidos la materia orgánica y los carbonatos, se separaron la fracción arena del limo y arcilla a través de un tamiz 0.02 micras; la fracción de arena se lavó y secó a 105 °C por 24 h, para posteriormente registrar su peso. La fracción limo y arcilla se determinó utilizando una pipeta. La muestra se colocó en una probeta, aforando a 1 l. Se agitó y dejó reposar durante 4 h. Al cabo de ese tiempo se tomó una muestra de los primeros 5 cm que es donde se tenían solo las arcillas, la cual se puso a secar a 105 °C y tras 24 h se pesó obteniéndose el contenido de arcilla presente en la muestra de suelo. Con el valor de la arena y la arcilla, se obtuvo el contenido de limo, por diferencia.

4.2.1.3. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

Para realizar este análisis, se tomaron las muestras de suelo previamente molidas y tamizadas (2 mm), llenando unos cubos de acrílico de 8 cm³ de volumen, pesándolos antes y después del llenado. Posteriormente se midió la susceptibilidad de cada una de las muestras, en el susceptibilímetro Bartington modelo MS2 y un sensor dual MS2B, aplicando un campo magnético alterno de baja intensidad (0.1 mT), midiendo la susceptibilidad magnética en baja

y alta frecuencia (0.47 kHz y 4.7 kHz respectivamente). Esto permitió calcular la susceptibilidad dependiente de la frecuencia X_{FD} en la que se estimó la concentración de partículas magnéticas de tamaño ultrafino cuya formación se relacionó con procesos pedogenéticos (Worm, 1998).

4.2.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

4.2.2.1. DETERMINACIÓN DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

El potencial de hidrógeno del suelo (pH) se refiere a la concentración de iones hidrógeno (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo, y constituye una propiedad química muy importante para la ocurrencia de procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Para determinar el pH, se tomaron 20 g de cada muestra de suelo, por duplicado (58 muestras en total), previamente molida y tamizada (2 mm); a cada una se le aplicaron 100 ml de agua destilada. Se puso en agitación en zaranda por 18-24 h y se dejó reposar por 1 h. Posteriormente se procedió a realizar la lectura del pH y la conductividad eléctrica de forma triplicada por cada muestra, con el objetivo de minimizar los errores en la medición, utilizando para ello un potenciómetro y un conductímetro, en el Laboratorio de Física del Suelo del Instituto de Geología.

4.2.2.2. CUANTIFICACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO (CO Y CI)

Este análisis se realizó mediante la determinación del TOC (*Total Organic Carbon*) en el suelo, el cual es una prueba no específica, es decir, no determina qué compuestos hay presentes (ya que la mayoría de las muestras en el suelo son mezclas complejas que pueden contener miles de compuestos de carbono orgánico diferentes). Por lo que, el TOC solo registra la suma de todo el carbono orgánico presente en estos compuestos. En la presente investigación, buscamos el valor total de CO y CI.

Para ello se tomaron muestras de los horizontes superficiales y medios de cada perfil. Las muestras fueron secadas a 70 °C por 72 h y se eliminaron todos los residuos vegetales

y animales reconocibles posteriormente se molieron y tamizaron por malla 100 mesh de abertura. La cuantificación de la concentración de carbono se realizó en el equipo Total Carbon Analyzer marca UIC mod CM 5012 (Chicago, EUA) mediante detección coulométrica de CO₂ generado (Huffman, 1977). En el caso del carbono total se sometió la muestra a oxidación térmica a 950 °C en un ambiente rico en O₂ (Huffman, 1977) y, para el carbono inorgánico se expuso la muestra a una solución de 10 mL de H₂SO₄ 2N a 45 °C para liberar el CO₂ asociado a iones carbonatos y bicarbonatos. La concentración de carbono orgánico es tomada como la diferencia del carbono total menos el carbono inorgánico.

4.2.2.3. MICROMORFOLOGÍA

Las muestras de suelo para este fin se tomaron inalteradas en campo, conservando la estructura y orientación. El proceso de preparación de las muestras se realizó en el Taller de Laminación del área del grupo de Paleosuelos en el Instituto de Geología, UNAM. La metodología seguida fue la siguiente: primeramente, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, posteriormente fueron impregnadas con resina de tipo MC-40 con monómero de estireno, agregándole peróxido de metil etil cetona (K-200) como catalizador; seguidamente las muestras fueron colocadas en cámara de vacío a presión de 22 atmósferas con el objetivo de que el espacio poroso quedara ocupado por la resina, logrando así una mayor consolidación de la muestra. Finalizado este proceso se expusieron a la luz solar hasta lograr una solidificación total, para lo cual se requirió al menos tres días.

Transcurrido el tiempo necesario, los bloques fueron cortados con el disco de diamante lubricado con agua, donde se obtuvo una muestra de menor tamaño, la cual se pulió a diferentes tamaños de granos para obtener una superficie suficientemente lisa y limpia. Posteriormente, se colocaron sobre portaobjetos de vidrio con una capa de resina como adhesivo para ser cortada una lámina a 2 mm en una microcortadora Buheler. Dicha lámina se desgasta hasta obtener un grosor de 30 micras, necesarias para observar la composición mineralógica, así como los rasgos pedogenéticos, como contenido de materia orgánica, concreciones/nódulos de hierro, carbonatos primarios y secundarios, así como rasgos de intemperismo, entre otros, utilizando para ello un microscopio petrográfico Olympus BX 51.

4.2.2.4. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

El conocimiento de la mineralogía presente en el suelo puede ser indicativo del material parental presente, las posibles fuentes primarias de aporte de los elementos, así como de la presencia de discontinuidades en los perfiles. La identificación de las diferentes fases minerales presentes en los suelos, empleando para ello la difracción de rayos X (DRX) es una herramienta más para identificar y clasificar el posible origen de los suelos en estudio.

La determinación de la mineralogía se realizó en un analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus, en muestras selectas (1 por perfil, correspondientes al horizonte superficial para cada uno) En el caso de DRX, la medición se realizó en un intervalo angular de 5° a 55° con un escaneo mínimo de 50 exposiciones con una fuente de radiación de cobalto. La identificación se llevó a cabo con ayuda del software X Powder Ver. 2010.01.35 PRO con una base de datos PDF2, en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM.

5. RESULTADOS

5.1. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PERFILES EN EL CAMPO

Los perfiles estudiados en este trabajo se localizan en diferentes geoformas, tanto en las laderas de los cerros, como en áreas acumulativas (aluviales y coluviales). Los perfiles enumerados del 1 al 4, se encuentran en una parcela cultivada con caña de azúcar desde hace más de 50 años; El perfil 5 se localiza en un cafetal, que no ha sido cultivado con caña; el perfil 6 está en el piedemonte de una sierra de caliza; los perfiles 7 y 8 se tienen en el piedemonte de otra serranía de caliza, en tanto que el perfil 9 está en una región con relieve más plano y bajo (Figura 2).

Los perfiles 1, 2 y 3, dentro de la parcela cultivada con caña de azúcar, tienen un espesor de 80 a 100 cm. La superficie del terreno tiene abundantes fragmentos de roca de diversos tamaños desde pequeñas hasta muy grandes. Otro hallazgo interesante es la abundancia de material arqueológico (cerámica, obsidiana) a lo largo del perfil.

Los perfiles son pedregosos a profundidad. Prácticamente todas las rocas son de tipo volcánico, con abundancia en minerales ferromagnesianos. El perfil 1 se encuentra en una ladera con pendiente de 5%. Se trata de un perfil policíclico con horizontes Ap-A-2A-3A-3Bt cuya descripción se presenta en la Figura 3.

			
	cm	Horizonte	Descripción
	0-3/5	Ap	Horizonte con un color en seco de 10YR4/2, marrón grisáceo oscuro y en húmedo 10YR2/1 negro, producto de la quema de la caña; presenta una estructura en bloques subangulares muy frágil, con algunos agregados pequeños y duros, también con muchos fragmentos de roca de diferente tamaño, con presencia de raíces y carbón. Sin reacción al HCl.
	3/5-30	A	Horizonte con un color en seco de 10YR4/2, marrón grisáceo oscuro y húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura en bloques subangulares que rompen en granular, más duros, con presencia de raíces, carbón, cerámica y rocas medianas. Sin reacción al HCl.
	30-55	2A	Horizonte con mayor contenido de arcilla y más compacto que el A, de color en seco de 10YR4/2, marrón grisáceo oscuro y húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura en bloques subangulares pequeños y duros, pedregoso con presencia de raíces; se tiene cerámica, rocas y carbón. Sin reacción al HCl.
	55-70	3A	Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro con estructura en bloques subangulares, con presencia de raíces, cerámica, carbón y fragmentos de roca. Sin reacción al HCl.
	70-80	3Bt	Horizonte delimitado por un nivel de rocas de mayor tamaño. Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y en húmedo 7.5YR3/4 marrón oscuro; estructura en bloques subangulares duros; los fragmentos de roca de tipo volcánico muestran un marcado intemperismo (son más rojizas). Sin reacción al HCl.

Figura 3. Descripción del perfil 1 (Yunier), parte alta de la ladera de la parcela de caña

El perfil 2 está en la parte media de la ladera, con una pendiente de 8% y también se integra por un perfil policíclico con horizontes Ap-A-2AB-2Bt (Figura 4).



			
	Prof. cm	Horizonte	Descripción
	0-15/20	Ap	Horizonte con un color en seco de 10YR4/3 marrón y húmedo 10YR2/1 negro, con agregados muy duros y compactos, con fragmentos de roca pequeños y algo de carbón; estructura en bloques subangulares que rompen a granular Sin reacción al HCl.
	15/20-60	A	Horizonte con un color en seco de 10YR4/3 marrón y húmedo 10YR2/1 negro, estructura en bloques subangulares duros y más grandes que en el perfil 1, con manchas oscuras sobre los agregados (posiblemente asociado a la materia orgánica) abundantes fragmentos de rocas y carbón. Sin reacción al HCl.
	60-90	2AB	Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura en bloques subangulares, más frágiles, con abundante carbón, recubrimientos de materia orgánica en la superficie de los agregados, con más contenido de rocas. Sin reacción al HCl.
	90-100	2Bt	Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro Estructura en bloques angulares de mayor tamaño con tendencia vértica. Sin reacción al HCl.

Figura 4. Perfil 2 (Jaime) en la parte media de la ladera de la parcela de caña

El perfil 3 posee un perfil policíclico con horizontes Ap-A-2A-2Bt, se localiza en la parte inferior de la parcela de caña, sobre la terraza baja del río (Figura 5) en una pendiente de 5%.


	Prof. cm	Horizonte	Descripción
	0-15/20	Ap	Horizonte con un color en seco de 10YR5/2 marrón grisáceo y en húmedo 10YR2/1 negro con estructura en bloques subangulares que rompen a granular, duros, muy pedregoso. Sin reacción al HCl.
	15/20-45	A	Horizonte con un color en seco de 10YR4/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura en bloques subangulares que rompe a granular; los agregados son de diferente tamaño, gruesos y finos, con recubrimientos oscuros en los agregados, muy compactos. Sin reacción con HCl
	45-60	2A	Horizonte con un color en seco de 10YR4/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro con estructura en bloques subangulares pequeños que rompen a granular, más frágil que el anterior, con una marcada presencia de fragmentos de rocas pequeños y presenta un límite de rocas grandes a los 60 cm, separándolo del horizonte inferior. Sin reacción al HCl.
	60-80	2Bt	Horizonte con un color en seco de 10YR4/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro con agregados más estables, prismáticos, arcillosos, con características vérticas. Sin reacción al HCl.

Figura 5. Perfil 3 (Joacho) parte baja de la parcela cañera, en la terraza del río

El perfil 4, localizado en la orilla de la parcela de caña, en su porción más elevada, a un lado del camino, representa una imagen más completa de su tipo de horizontes, debido a que se puede observar su parte más profunda, alcanzando 200 cm (Figura 6). El perfil se integra con los horizontes Ap-AB-Bt-2BtC-3BtC.



Prof. Cm	Horizonte	Descripción
0-50	Ap	Horizonte con un color en seco de 10YR4/2 marrón grisáceo oscuro y en húmedo 10YR2/1 negro, con estructura granular muy bien desarrollada, muy estable, abundantes rocas de diferentes tamaños, con una textura franca, abundantes raíces. Sin reacción al HCl.
50-70	AB	Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura en bloques subangulares medianos y grandes, que rompen en granular, muy frágil, arcilloso. Sin reacción al HCl.
70-130	Bt	Horizonte con un color en seco de 10YR6/3 marrón claro y en húmedo 10YR3/3 marrón oscuro, estructura en bloques sub angulares, medianos y frágiles en húmedo, arcilloso, abundantes fragmentos de roca, con evidencia de cutanes de arcilla; en el límite inferior hay rocas muy grandes. Sin reacción al HCl.
130-160	2BtC	Horizonte con un color en seco de 10YR6/3 marrón claro y en húmedo 10YR3/3 marrón oscuro, con abundantes fragmentos de roca, la matriz es arcillosa, con estructura en bloques sub angulares muy frágil. Presenta rasgos redox, con moteados rojizos, presenta cutanes de arcillas. Sin reacción al HCl.

	160-200	3BtC	Horizonte con un color en seco de 10YR6/4 marrón amarillento claro y en húmedo 10YR3/6 marrón amarillento oscuro, con estructura en bloques sub angulares, pequeños, muy frágiles en húmedo, arcilloso, con abundantes fragmentos de rocas pequeñas, intemperizadas, rasgos redox abundantes, con cutanes de arcilla y de Mn. Sin reacción al HCl.
--	---------	------	--

Figura 6. Perfil 4 (Cañal), parte alta de la parcela de caña, en un corte del camino

El perfil 5 (Figura 7), se encuentra en una parcela cultivada con café, justo enfrente (al otro lado del camino) que, de acuerdo con los productores, nunca se cultivó con caña. Es un perfil profundo, de 170 cm de espesor. El perfil se tomó en una cárcava de erosión, los horizontes superficiales se describieron en la zona menos perturbada, en tanto que la porción inferior se colectó en la cárcava, haciéndose un perfil compuesto, que tiene los horizontes A-AB-Bt-2Bt-3Bt. En este suelo, es interesante la ausencia de rocas, en ninguna parte del perfil, a pesar de que se encuentra muy cerca de la parcela de caña.

El perfil 6 que se muestra en (Figura 8) se localiza al pie de una sierra de caliza, afectada por procesos kársticos. Además de las rocas calcáreas que afloran en los alrededores, hay una gran cantidad de fragmentos de roca de gran tamaño (>50 cm de diámetro).

Los perfiles 7 y 8 se describieron al pie de otro cerro de caliza, que ha sido afectado por procesos de karstificación. Ambos son similares, por lo que únicamente se presenta la descripción del perfil 7, el cual se encontraba en una dolina. Los horizontes que se observan son A-AB-BtC (Figura 9).


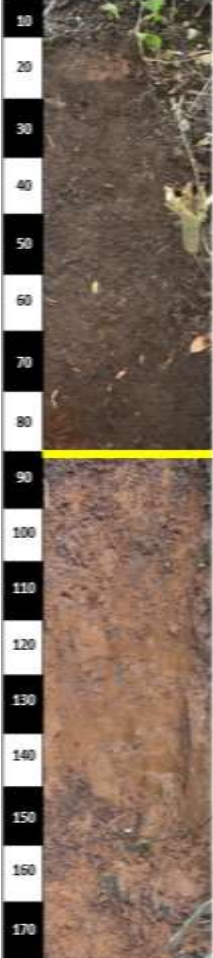
			
	Prof. Cm	Horizonte	Descripción
	0-50	A	Horizonte con un color en seco de 7.5YR5/2 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, estructura granular muy bien desarrollada, muy poroso y arcilloso con cutanes de arcillas, muchas raíces finas, sin rocas. Sin reacción al HCl.
	50-80	AB	Horizonte con un color en seco de 10YR4/6 marrón amarillento oscuro y en húmedo 5YR3/4 marrón oscuro, arcilloso, estructura granular, con raíces finas y poros, sin rocas. Sin reacción al HCl.
	80-110	Bt	Horizonte con un color en seco de 10YR5/8 marrón amarillento oscuro y en húmedo 5YR4/4 marrón, con estructura en bloques sub angulares que rompe en granular, frágil en húmedo, con cutanes de coloración oscura, sin rocas.
	110-130	Bt2	Horizonte con un color en seco de 10YR5/6 marrón amarillento oscuro y en húmedo 5YR3/4 marrón oscuro, algo más compacto, con estructura prismática que rompe en bloques sub angulares gruesos, arcilloso y con cutanes abundantes. Sin reacción al HCl.
	130-170	Bt3	Horizonte con un color en seco de 10YR5/6 marrón amarillento oscuro y en húmedo 5YR3/4 marrón oscuro, mucho más compacto, con estructura prismática que rompe en bloques sub angulares muy gruesos, muy arcilloso. Se encontraron fragmentos de rocas pequeñas muy intemperizada. Sin reacción al HCl.

Figura 7. Perfil 5 (Cafetal) parcela cafetalera, a un lado del cañaveral




Cm	Horizonte	Descripción	
	0-5	A	Horizonte con un color en seco de 10YR4/2 marrón grisáceo oscuro y en húmedo 10YR2/1 negro, con abundantes raíces, estructura granular bien poroso, rocas pequeñas y de origen volcánico. Sin reacción al HCl.
	5-30	AB	Horizonte con un color en seco de 10YR4/2 marrón grisáceo oscuro y en húmedo 10YR2/1 negro, con abundantes raíces. Presenta estructura granular, bloques sub angulares, textura arcillosa, con fragmentos de rocas grandes de tipo caliza y volcánicas. Sin reacción al HCl.
	30-60	Bt	Horizonte con un color en seco de 10YR5/4 marrón amarillento y en húmedo 10YR3/6 marrón amarillento oscuro, muy arcilloso, con presencia de concreciones de Fe, Mn y carbonatos que muestran disolución. A pesar de ello, la matriz no mostró reacción al HCl.

Figura 8. Perfil 6 (Cueva) ladera de un cerro de caliza en donde se encuentra una cueva



			
	Cm	Horizonte	Descripción
	0-35	A	Horizonte con un color en seco de 10YR5/3 marrón y en húmedo 10YR2/2 marrón muy oscuro, con estructura granular bien desarrollada y en bloques sub angulares pequeños, con superficies brillantes, arcilloso, con fragmentos de roca y matriz sin carbonatos.
	35-70	AB	Horizonte con un color en seco de 10YR5/4 marrón amarillento y en húmedo 10YR3/3 marrón oscuro, arcilloso, con estructura en bloques sub angulares medianos y grandes, cutanes gruesos del mismo color de la matriz, se pueden encontrar algunos fragmentos de roca volcánica. Sin reacción al HCl.
	70-110	BtC	Horizonte con un color en seco de 10YR6/4 marrón amarillento claro y en húmedo 10YR3/6 marrón amarillento oscuro, con estructura en bloques sub angulares gruesos, con superficies brillantes, con fragmentos de roca muy intemperizada y evidencias de rasgos gléyicos. Sin reacción al HCl.

Figura 9. Perfil 7 (Karst) depresión kárstica al pie de la ladera de un cerro

El perfil 9 representa a un suelo en la planicie alta de la zona, el cual también estuvo cultivado por caña (Figura 10). Tiene más de 170 cm de profundidad y cuenta con los horizontes AB-Bt1-Bt2-Bt3.



	cm	Horizonte	Descripción
	0-20	AB	Horizonte con un color en seco de 7.5YR4/4 marrón y en húmedo 5YR3/3 marrón oscuro, con zonas más oscuras con estructura frágil y heterogénea, en bloques subangulares que rompe a granular, presencia de carbones pequeños y raíces. Con características vérticas (grietas verticales en todo el horizonte que llegan a encontrarse en profundidad dentro del perfil), sin presencia de rocas. Con reacción leve al HCl.
	20-70	Bt1	Horizonte con un color en seco de 7.5YR4/6 marrón fuerte y en húmedo 5YR3/4 marrón oscuro, pero con un ligero aumento de la reacción ante la aplicación del HCl, estructura en bloques subangulares pequeños y duros que rompen en angular y granular, también se observan zonas de moteados no homogéneas, sin presencia de rocas y con grietas.
	70-130	Bt2	Horizonte con un color en seco de 7.5YR5/6 marrón fuerte y en húmedo 5YR3/4 marrón oscuro. Con estructura prismática, que rompe a bloques angulares muy duros con evidencias de cutanes. Reacciona al HCl con mayor intensidad que en los anteriores horizontes. Sin presencia de rocas y con grietas algo más pequeñas que los anteriores.
	130-170	Bt3	Horizonte con un color en seco de 7.5YR5/6 marrón fuerte y en húmedo 5YR4/4 marrón, con estructura prismática que rompe en bloques angulares y subangulares chicos y muy chicos, muy frágiles (parece tener más arcillas que los anteriores), sin presencia de rocas y grietas que tienden a ser más delgadas y discontinuas. Sin reacción al HCl.

Figura 10. Perfil 9 (Eli) Suelo rojo en la terraza alta, sobre una planicie

5.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

5.1.1.1. COLOR

El color se determinó mediante la tabla de colores Munsell, cuyos resultados se encuentra registrados dentro de la descripción de los perfiles, los cuales presentan diferentes tonalidades dentro del marrón.

5.1.1.2. TEXTURA Y SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

El perfil 1 tiene una distribución homogénea en arena, limo y arcilla en los horizontes Ap y A, con altos porcentajes de arcilla, la cual se incrementa en 2A, alcanzando el máximo en el horizonte más profundo 3Bt, con 74 %. Es, por lo tanto, un suelo arcilloso, que, sin embargo, tiene un porcentaje considerable de arena, variando de 27 a 20 % en el 3Bt (Figura 10).

Los valores de susceptibilidad magnética X_{LF} son homogéneos, mostrando una ligera disminución a los 80 cm de profundidad, en el horizonte 3Bt, el cual coincide con un pico en la X_{FD} % que demuestra el dominio de partículas magnéticas ultrafinas (Figura 11).

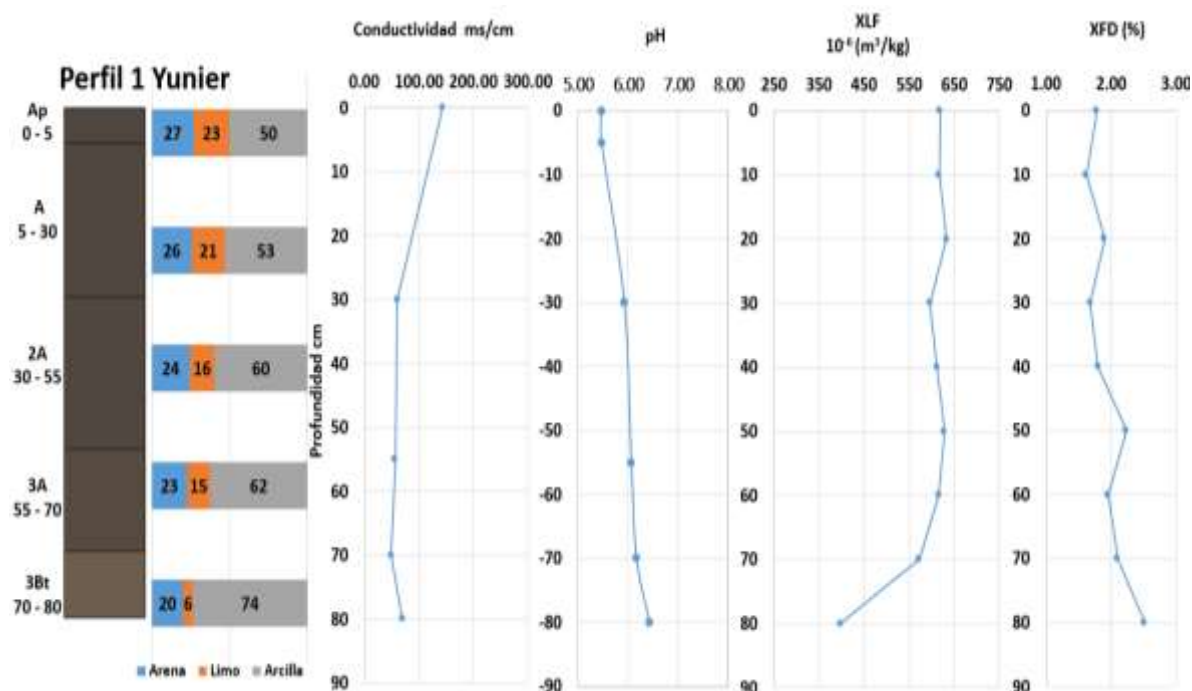


Figura 11. Perfil 1 (Yunier) en la ladera alta de la parcela de caña

En la Figura 12 se muestra la distribución granulométrica de cada horizonte dentro del perfil 2, la cual es prácticamente homogénea en todos los horizontes, con porcentajes similares de arena, limo y arcilla. Sin embargo, se nota un ligero incremento de arcilla en los horizontes debajo del Ap. Dado que el porcentaje de arcilla es mayor que 50 % se clasifica como un suelo arcilloso. Aquí, los valores de susceptibilidad magnética X_{LF} también son homogéneos, mostrando una ligera disminución a los 100 cm de profundidad, en el horizonte 2Bt, el cual coincide con un decremento en la X_{FD} % que demuestra el dominio de partículas magnéticas más gruesas.

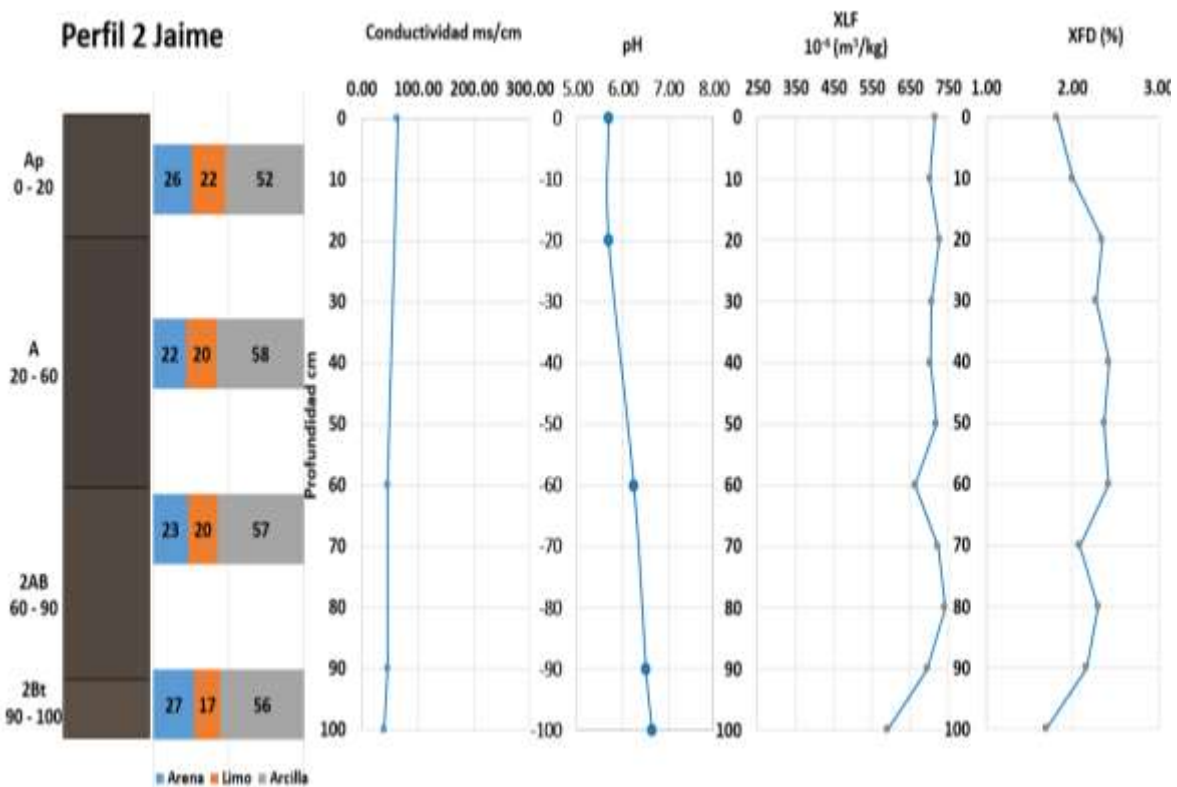


Figura 12. Perfil 2 (Jaime) en la ladera media de la parcela de caña

En la Figura 13 puede apreciarse la granulometría del perfil 3, el cual muestra una distribución similar a los perfiles anteriores, con una dominancia de la fracción arcilla (>50 %) que se incrementa en los horizontes más profundos. En este perfil, la X_{LF} muestra valores menores en la superficie que aumentan gradualmente con la profundidad. Por su parte, la X_{FD}

% tiene un patrón más heterogéneo, con valores bajos en la superficie, aumento a los 10-20 cm de profundidad, disminución a los 30 cm y aumento entre los 40 y 80 cm (Figura 13).

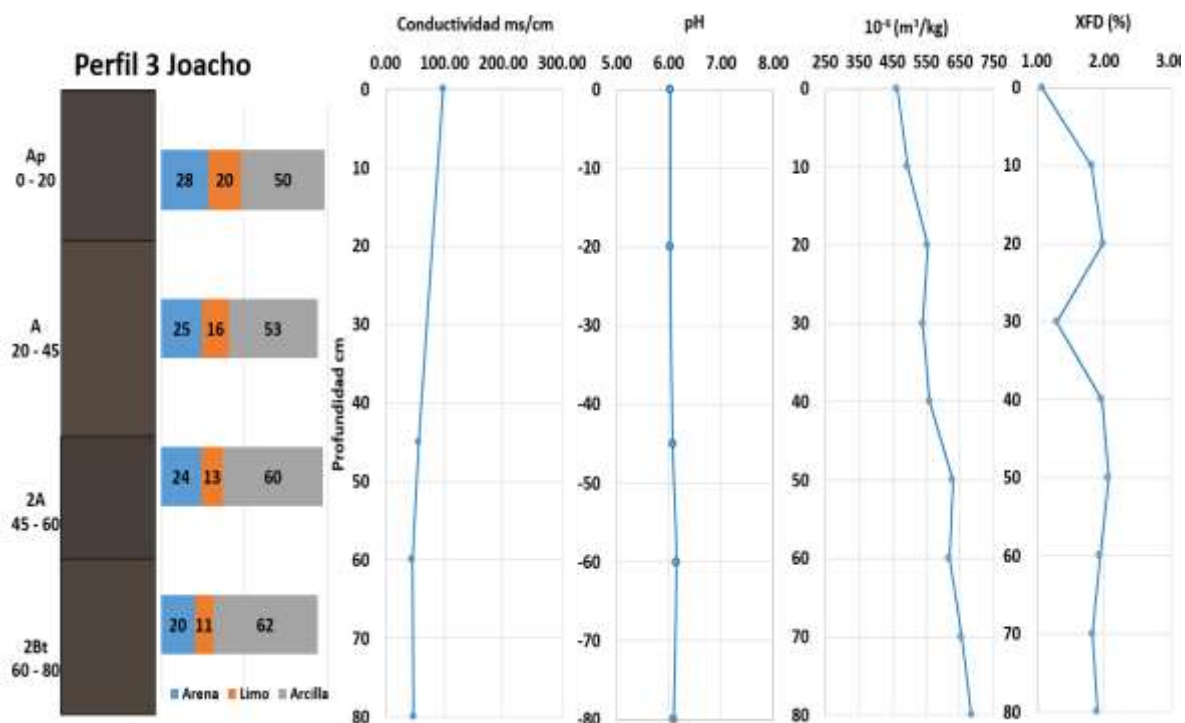


Figura 13. Perfil 3 (Joacho) parte baja de la parcela cañera, en la terraza baja del río

En el perfil 4, que se localiza en la porción más elevada de la parcela de caña, a un costado del camino, hay diferencias claras con los perfiles 1, 2 y 3, ya que se aprecia un mayor contenido en la fracción limo (34 a 41 %), disminuyendo claramente el contenido de arcilla (<50 % en todos los horizontes). Sin embargo, la fracción arena es similar a los perfiles dentro del cañal, variando entre 22 y 24 %, siendo el horizonte superficial el que muestra el contenido más elevado (Figura 14).

En el caso de la X_{LF} los valores son altos en la superficie disminuyendo gradualmente con la profundidad hasta los 70 cm, mostrando un pico hacia los 80-90 cm, para posteriormente decrecer. La X_{FD} % tiene un patrón heterogéneo, con picos a los 30, 70-80, 110-120, 140-150 y 180 cm de profundidad (Figura 14).

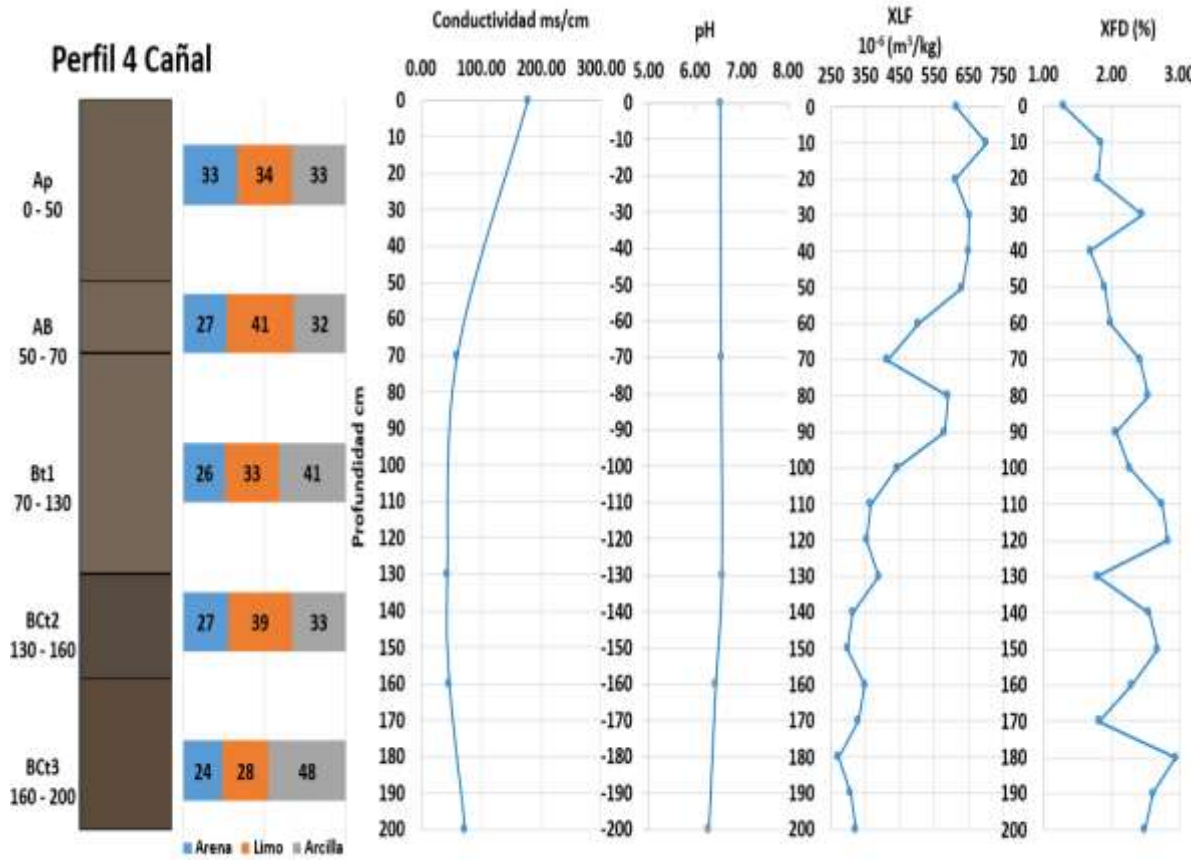


Figura 14. Perfil 4 (Cañal) en la parte alta del cañal en un corte del camino

La Figura 15 muestra el perfil número 5, correspondiente al área cultivada con café. Presenta un alto contenido en la fracción arcilla y una fuerte disminución de las partículas tamaño arena, siendo el horizonte A el que posee el mayor porcentaje de limo (30%).

La X_{LF} muestra dos patrones. El de la parte superficial con un ligero aumento con la profundidad, hasta los 70 cm, disminuyendo a los 80 cm. A partir de aquí los valores son similares. La $X_{FD}\%$ tiene varios picos, entre los 50 y 70 cm, a los 100 cm (en donde se aprecia un máximo $>3\%$ y a los 140 cm (Figura 15).

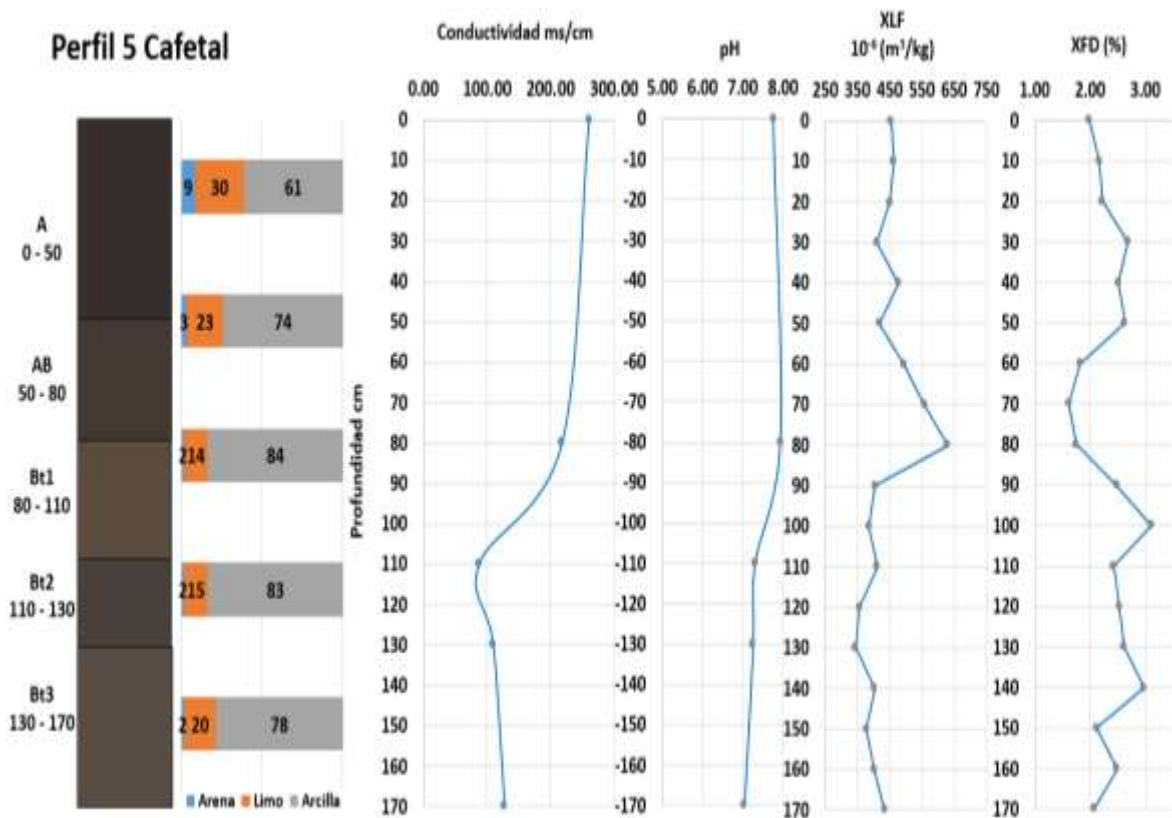


Figura 15. Perfil 5 (Cafetal) cercana al cañaveral

En los perfiles que se encuentran relacionados a las sierras de caliza también se observa un alto contenido de arcilla en todos los horizontes. Sin embargo, el perfil 6 (Figura16), cerca de la cueva, se tienen valores más elevados de esta fracción, en tanto que en el perfil 7 (Figura17), los contenidos son menores.

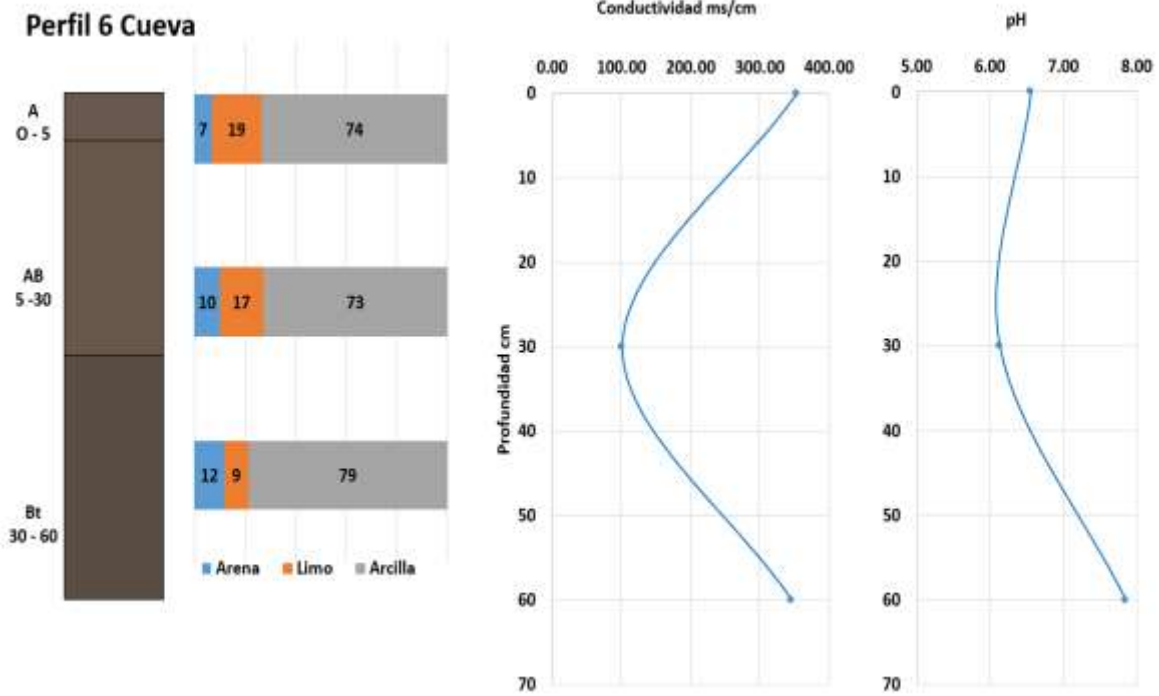


Figura 16. Perfil 6 (Cueva) en ladera de un cerro con cueva y mirador

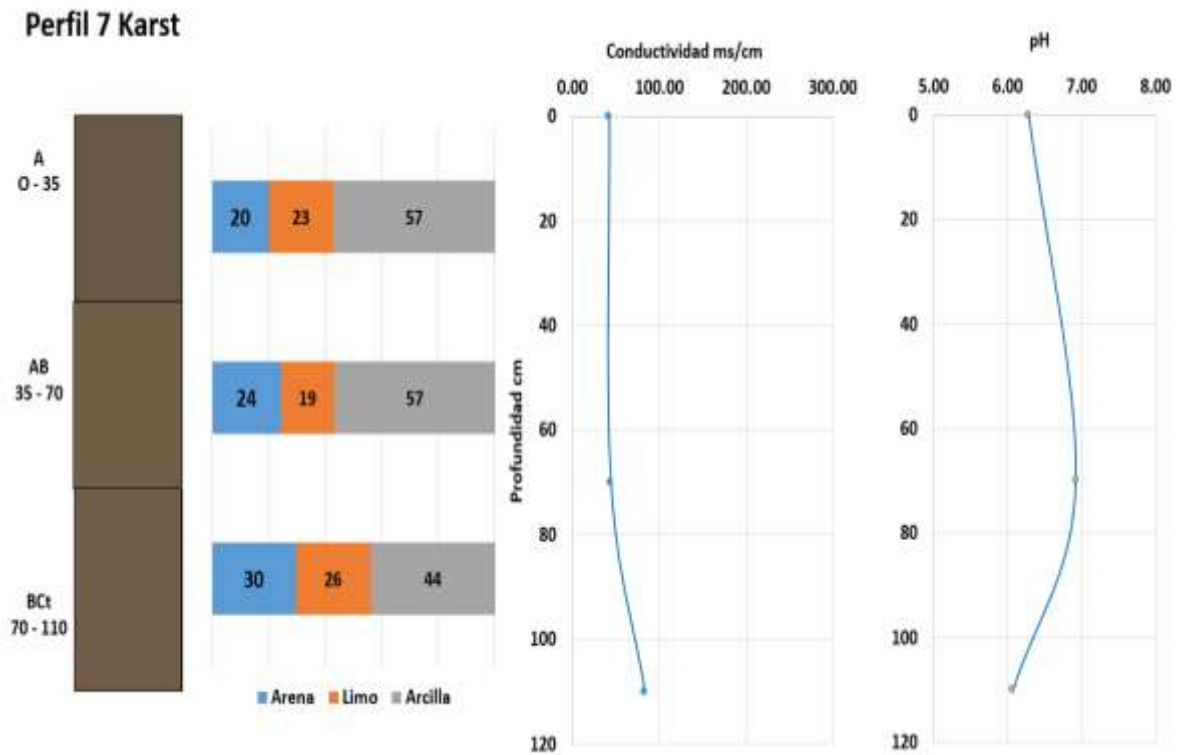


Figura 17. Perfil 7 (Karst) depresión kárstica en pie de ladera de un cerro

El perfil 9 muestra los valores más elevados de la fracción arcilla, los cuales alcanzan hasta el 94 % en el horizonte Bt3, con muy bajos porcentajes de arena y limo (Figura 18).

Los valores de la X_{LF} muestran valores más bajos en la superficie, en el horizonte AB, alcanzando un mínimo a los 30 cm. De esta profundidad y hasta los 180 cm, se observa un incremento gradual. La X_{FD} % tiene una mayor heterogeneidad, de manera que se registran valores elevados en la superficie, disminuyendo y aumentando con la profundidad. El valor más alto se muestra a los 110 cm, en la transición entre los horizontes Bt2 y Bt3.

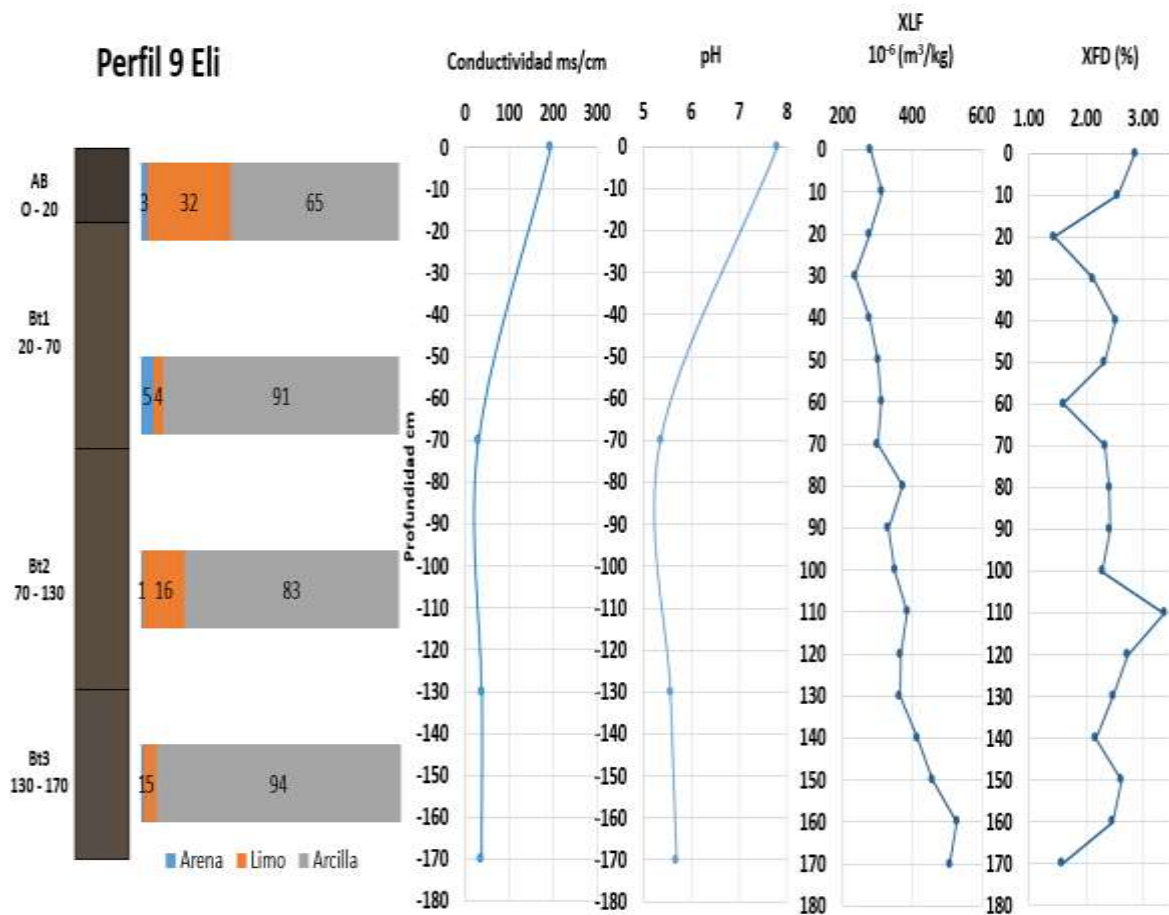


Figura 18. Perfil 9 (Eli) en la planicie elevada de suelo rojo cerca del pueblo

5.1.2. PROPIEDADES QUIMICAS

5.1.2.1. pH y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

Los perfiles 1 y 2, que se muestran en las (Figuras 11 y 12), tienen valores de pH similares, siguiendo un comportamiento similar con la profundidad. Los horizontes superficiales son ácidos con un pH que oscila entre 5.6 y 6, y va volviéndose más neutro en los horizontes inferiores. En el perfil 3 (Figura 13), se observa un pH de 6 en prácticamente todo el perfil. En el perfil 4 (Figura 14), los valores son también homogéneos, ligeramente ácidos (6.5 en la superficie, disminuyendo a 6.3 en la parte inferior). El perfil 5 (Figura 15), del Cafetal, la tendencia es diferente, ya que los horizontes superficiales muestran pHs alcalinos (7.8 y 7.6) que decrecen en la parte inferior, volviéndose más neutrales (7.3). A diferencia, en el perfil 7 (Figura 17), Karst, los valores son ácidos en superficie (6.3), se vuelve neutro en AB y vuelve a disminuir en BtC. El perfil 9 (Figura 18), (Eli) es el que registra los valores de pH más bajos (5.3-5.7) excepto en AB, en donde el valor es casi neutro (7.8).

Con respecto a la CE, ésta oscila entre 50 y 350 $\mu\text{s}/\text{cm}$, siendo el perfil 7 (Figura 17), en donde se registra el menor valor, con un valor cercano a 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Los valores más altos se presentan en los horizontes superficiales de los perfiles 4, 5, 6 y 9 (Figuras 14, 15, 16 y 18) con valores entre 178 y 370 $\mu\text{s}/\text{cm}$, este último registrado en el horizonte A del perfil 6 (Figura 16). Los perfiles 1, 2 y 3 (Figuras 11, 12 y 13) tienen valores cercanos a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

De forma general todos los suelos evaluados presentan características similares, aunque con diferente intensidad en algunos procesos como por ejemplo el grado de pedogénesis. Resaltando la presencia de fragmentos de rocas volcánicas en todos los perfiles y la combinación de materiales que muestran un fuerte grado de intemperismo con otros frescos.

5.1.2.2. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO (CO Y CI)

Los contenidos de carbono orgánico (CO) e inorgánico (CI) en los suelos estudiados no presentan grandes variaciones (Tabla 1). El porcentaje de CO más alto corresponde al horizonte A del perfil 4 (4.31 %) que contrasta con los valores encontrados en el resto de los perfiles dentro de la misma parcela, los cuales son similares y oscilan entre 2.9 y 1.2% para

los horizontes superficiales y profundos, respectivamente. Esta misma tendencia se encuentra en el resto de los suelos estudiados, excepto el perfil 6 (ubicado en una ladera con vegetación “natural”, o al menos la de menor afectación antrópica dentro de la zona estudiada), en donde el porcentaje fue mayor. Con respecto al CI, todos los horizontes mostraron porcentajes muy bajos. El mayor corresponde al horizonte más profundo de la Cueva.

Tabla 1. Resultados del TOC expresado en % de Carbono Orgánico e Inorgánico en los diferentes horizontes y perfiles estudiados

Horizontes/Perfiles	Prof.	CO	CI
	cm	%	%
P1 (A)	5-30	2.18	0.010
P1 (3A)	55-70	1.35	0.011
P2 (Ap)	0-20	2.70	0.008
P2 (2AB)	60-90	1.18	0.008
P3 (Ap)	0-20	2.92	0.016
P3 (2A)	45-60	1.70	0.014
P4 (Ap)	0-50	4.31	0.012
P4 (Bt)	70-1.30	0.54	0.010
P5 (A)	0-50	2.03	0.047
P5 (AB)	50-80	1.30	0.066
P6 (AB)	5-30	3.96	0.011
P6 (Bt)	30-60	1.05	0.219
P7 (A)	0-35	1.60	0.032
P7 (ABt)	35-70	0.79	0.005

5.1.2.3. MICROMORFOLOGÍA

Los suelos que se encuentran dentro de la parcela de caña, perfiles 1, 2 y 3, presentan características micromorfológicas similares: en el horizonte Ap, se tienen fragmentos de carbón, restos vegetales frescos, fragmentos de roca (Figura 19 y Cuadro 1). Los minerales primarios muestran fuerte intemperismo, de manera que están reemplazados por óxidos de

hierro, lo cual es muy notorio en los horizontes 2A y 2Bt que, sin embargo, están en contacto con minerales no alterados. En los horizontes más profundos, destaca la presencia de gruesos cutanes de arcilla, con fragmentos de carbón.

Cuadro 1. Resumen de las características micromorfológicas de las láminas delgadas de los perfiles dentro del área con caña de azúcar

Perfil 1, 2 y 3

Horizonte	MICROESTRUCTURA		ILUVIACIÓN		RASGOS REDOX		INTEMPERISMO		SUELO RE-TRABAJADO	RESTOS ORGÁNICOS		
	Granular	Bloques	In situ	Re-trabajada (péculas)	nódulos	impregnaciones	rocas	Mine. arena		Restos de plantas	Impreg.	excrementos
Ap 0-5												
A 5-30												
2A 30-55												
3A 55-70												
3Bt 70-80												

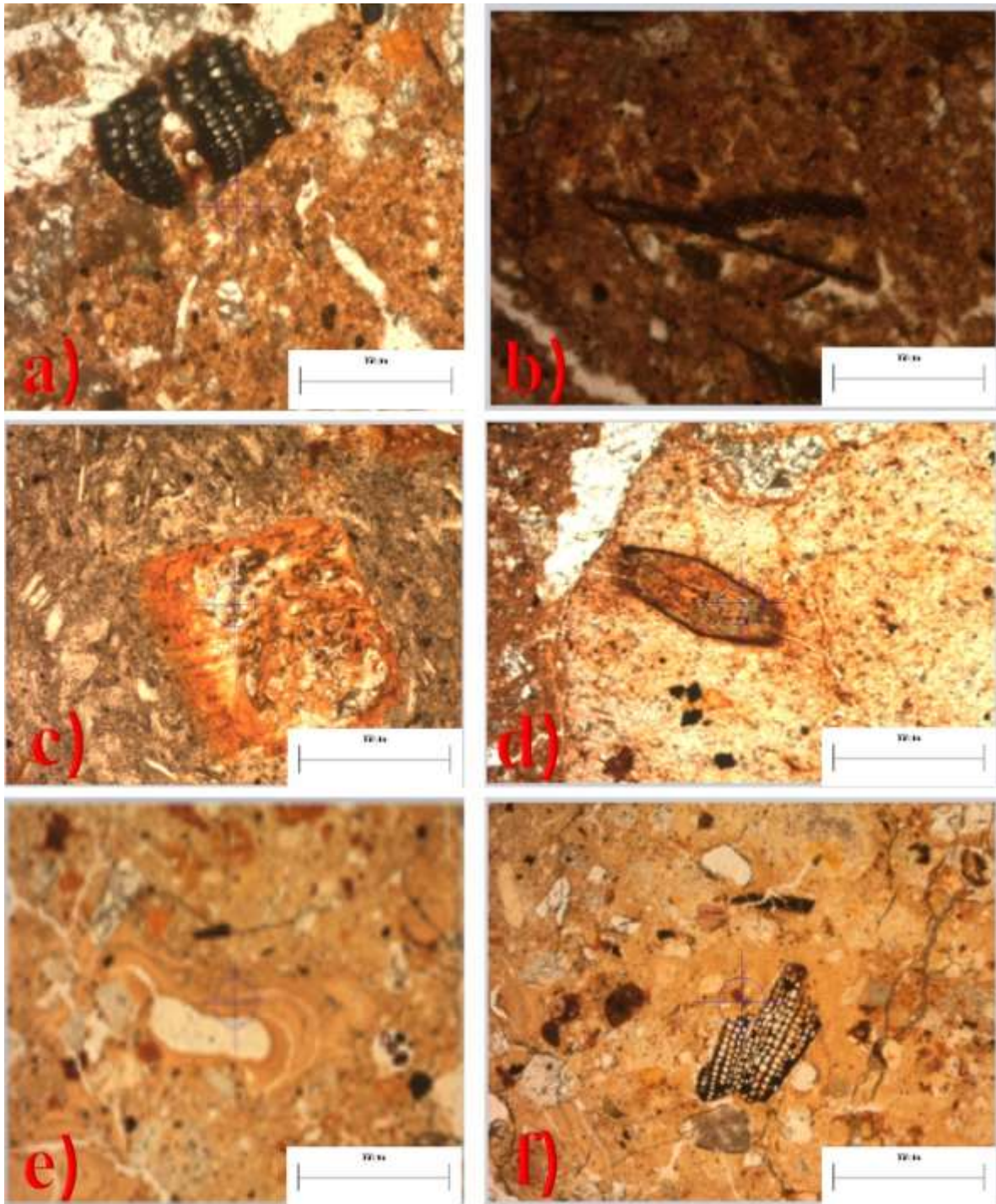


Figura 19. Fotomicrografías de secciones delgadas de los perfiles 1, 2 y 3 del área cañera. a) Resto de carbón en el horizonte Ap mediante lpp_10x, b) carbón vegetal en el horizonte 2AB con lpp_10x, c) roca con piroxeno reemplazados por goethita en el horizonte 2A con lpp_5x, d) mineral reemplazado por goethita en horizonte A con lpp_10x, e) se pueden apreciar los cutanes de arcilla en el horizonte 3A con lpp_10x y f) presencia de carbón en el horizonte 3Bt con lpp_10x.

En los horizontes superficiales del perfil 4, se observan características similares a las encontradas en los suelos de la parcela. Abundantes carbón y fragmentos de roca frescos, que contrastan con otros más alterados. En los horizontes inferiores (Bt1 y BtC2), se aprecia la presencia de carbón y gruesos cutanes de arcilla (Figura 20 y Cuadro 2). En el horizonte BtC3 se tiene cutanes de arcilla, pápulas y fragmentos de roca con poca alteración. En ningún horizonte se documentan carbonatos en la matriz del suelo, ni fragmentos de calizas.

Cuadro 2. Resumen de las características micromorfológicas de las láminas delgadas del perfil 4 en el límite del área cañera y camino de acceso.

Perfil 4 Cañal

Horizonte	MICROESTRUCTURA		ILUVIACIÓN		RASGOS REDOX		INTEMPERISMO		SUELO RE-TRABAJADO	RESTOS ORGÁNICOS		
	Granular	Bloques	In situ	Re-trabajada (pápulas)	nódulo	impregnaciones	rocas	Mine. arena		Restos de plantas	Impreg.	excrementos
A ₀ 0-50	■			■		■	■	■		■	■	
AB 50-70	■		■	■			■			■		
B _t 70-130		■	■	■			■	■	■	■	■	
2B _t C 130-160		■	■	■			■	■		■	■	
3B _t C 160-200		■										

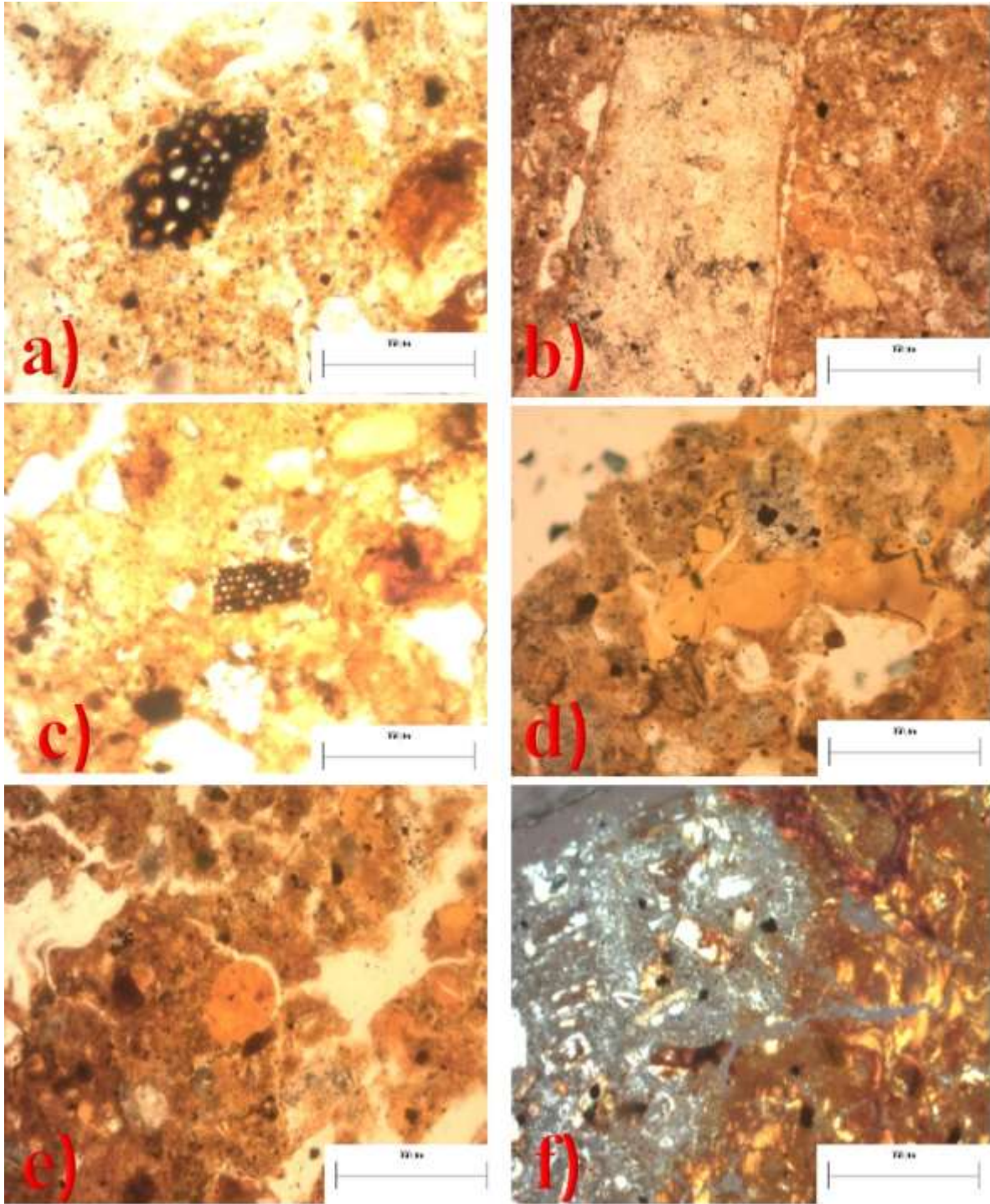


Figura 20. Fotomicrografías de secciones delgadas del Perfil 4 Cañaveral. a) Resto de carbón en el horizonte superficial Ap visto con lpp_10x, **b)** roca ligeramente intemperizada en el horizonte AB con lpp_5x, **c)** restos de carbón en el horizonte Bt observado con lpp_10x, **d)** iluviación de arcilla y Fe en el horizonte 2Bt con lpp_10x, **e)** se observan pápulas en el horizonte profundo 2BtC con lpp_5x y **f)** evidencias de roca intemperizada en el horizonte 2BtC observado mediante nx_10x.

El perfil 5, en el Cafetal, se tienen rasgos similares. Destaca en los horizontes Bt, la abundancia de cutanes de arcilla gruesos y nódulos pequeños de hierro-manganeso y el fuerte intemperismo de los minerales primarios. También se observan fragmentos de roca volcánica fresca y pápulas en el horizonte Bt3 (Figura 21 y Cuadro 3). En el suelo relacionado a zona kárstica, se destacan los rasgos de intemperismo, aunque de menor intensidad que en los suelos anteriores. Los minerales primarios están sustituidos por óxidos de Fe (Figura 22 y Cuadro 4), con nódulos de Fe y cutanes de arcilla delgados. La matriz no presenta carbonatos.

Cuadro 3. Resumen de las características micromorfológicas de las láminas delgadas del perfil 5, campo de café al lado el área con caña de azúcar.

Perfil 5 Cafetal

Horizonte	MICROESTRUCTURA		ILUVIACIÓN		RASGOS REDOX		INTEMPERISMO		SUELO RE-TRABAJADO	RESTOS ORGÁNICOS		
	Granular	Bloques	In situ	Re-trabajada (pápulas)	nódulos	Impregnaciones	rocas	Mine. arena		Restos de plantas	Impreg.	excrementos
A 0-50	■			Carbonato □		■				■		
AB 50-80	■			Carbonato □						■		■
Bt 80-110		■	■					■				
2Bt 110-130		■	■					■				
3Bt 130-170		■	■	■				■		■		

Cuadro 4. Resumen de las características micromorfológicas de las láminas delgadas de los perfiles 6 y 7 (Cueva y Karst) en laderas de cerros kársticos.

Horizonte	MICROESTRUCTURA		ILUVIACIÓN		RASGOS REDOX		INTEMPERISMO		SUELO RE-TRABAJADO	RESTOS ORGÁNICOS		
	Granular	Bloques	In situ	Re-trabajada (pápulas)	nódulos	Impregnaciones	rocas	Mine. arena		Restos de plantas	Impreg.	excrementos
A 0-35	■	■								■	■	
AB 35-70	■	■		■	■		■	■	■	■	■	■
BtC 70-110			■			■						

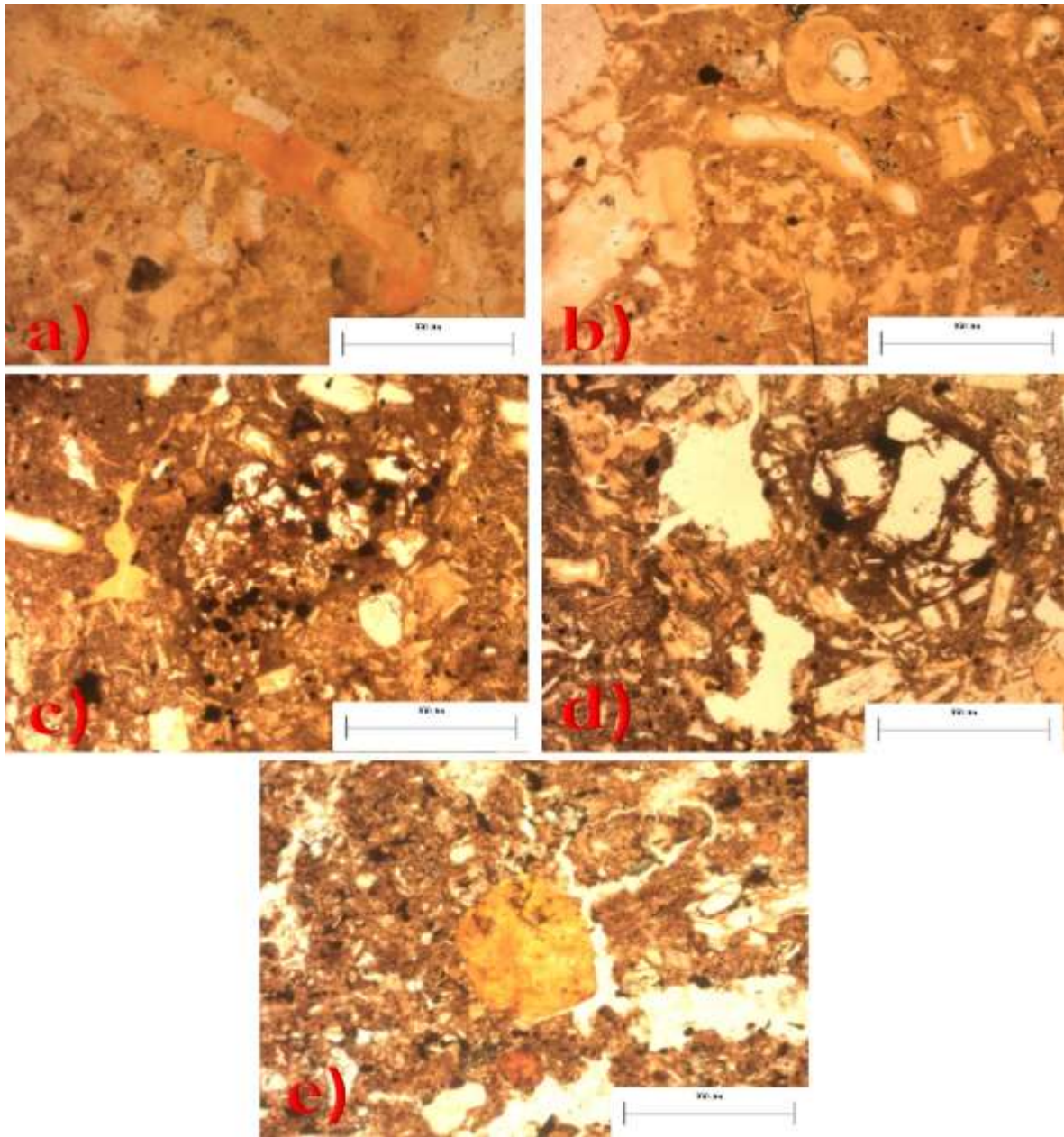


Figura 21. Fotomicrografías de secciones delgadas del Perfil 5 Cafetal. a) iluviación de arcilla y Fe en el Perfil 5, horizonte Bt visto con lpp_10x, **b)** se observa pura arcilla en el Perfil 5, horizonte 2Bt con lpp_10x, **c)** evidentes rasgos de intemperismo de Fe y Mn en el Perfil 5, horizonte 2Bt con lpp_10x, **d)** se observa el intemperismo de minerales 1^{rios} en el horizonte 2Bt del Perfil 5 con lpp_5x y **e)** presencia de pápulas en el Perfil 5 horizonte profundo 3Bt con lpp_10x.

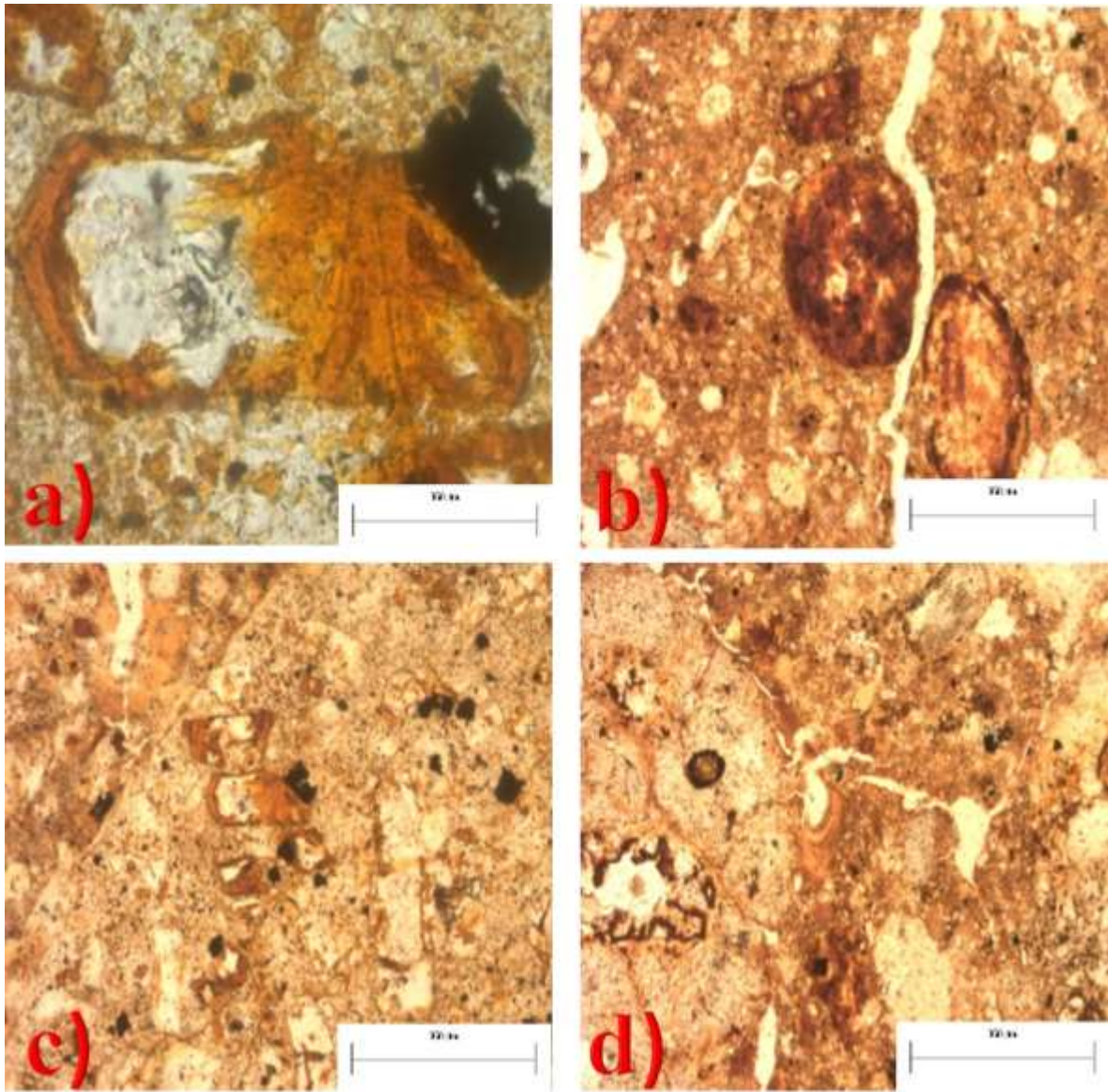


Figura 22. Fotomicrografías de secciones delgadas de los perfiles en laderas de cerros kársticos. a) piroxeno intemperizado y reemplazado por goethita en el horizonte AB visto con lpp_50x, **b)** presencias de nódulos de Fe en el horizonte profundo BtC, con lpp_5x, **c)** minerales de piroxeno reemplazados por goethita en el horizonte AB con lpp_50x, **d)** iluviación de arcilla en el horizonte AB con lpp_5x.

Mientras que en el suelo del perfil 9 (Cuadro 5 y Figura 23), se muestran los mayores rasgos de intemperismo de todos los suelos, prácticamente todo es arcilla, lo cual se puede evidenciar en campo, por la coloración rojiza de todo el perfil, y las grietas que predominan, además en las láminas delgadas se pueden observar muchos nódulos de Fe y zonas con Mn, y mucha iluviación de arcilla en todo el perfil. De forma general un intemperismo muy fuerte y avanzado, con restos vegetales (carbón en superficie) y pedosedimentos.

Cuadro 5. Resumen de las características micromorfológicas de las láminas delgadas del perfil 9 suelo rojo que en el pasado fue cultivado con caña de azúcar en llanura cerca del pueblo.

Perfil 9 Eli

Horizonte	MICROESTRUCTURA		ILUVIACIÓN		RASGOS REDOX		INTEMPERISMO		SUELO RE-TRABAJADO	RESTOS ORGÁNICOS		
	Granular	Bloques	In situ	Re-trabajada (péculas)	nódulos	impregnaciones	rocas	Mine. arena		Restos de plantas	Impreg.	excrementos
A8 0-20	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	
Bt 20-70	■	■	■		■			■		■	■	
2Bt 70-130		■	■		■	■		■				
3Bt 130-170		■	■		■	■		■				

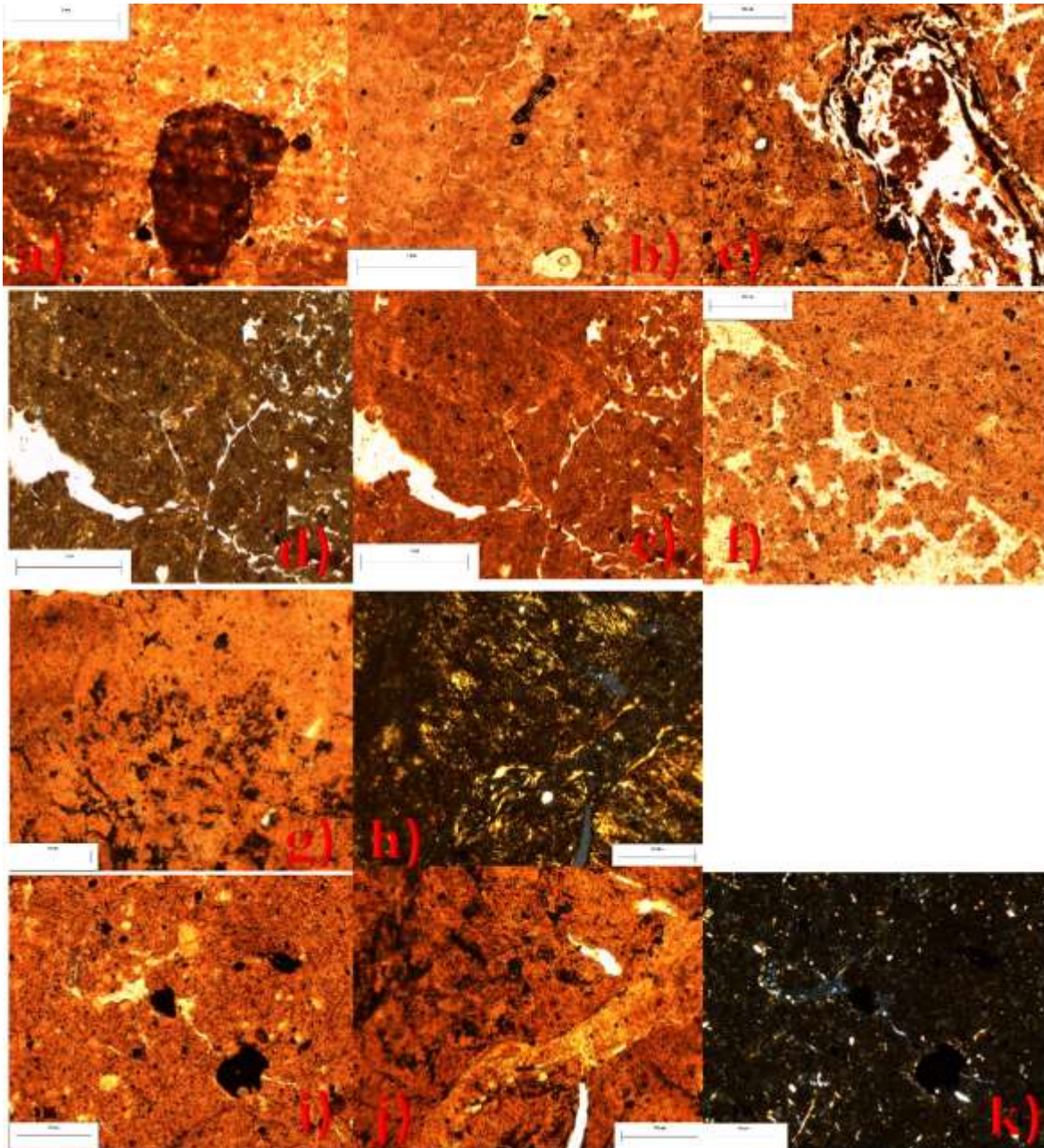


Figura 23. Fotomicrografías de secciones delgadas del Perfil 9 Eli. a) evidencia de pedosedimento en el Perfil 9 horizonte AB visto con lpp_5x, **b)** se observan restos de carbón en el Perfil 9 horizonte AB con lpp_5x, **c)** presencia de resto vegetal recubierto por Fe en el horizonte AB del Perfil 9 con lpp_10x, **d)** y **e)** presencia de cutanes y nódulos de Fe en el Perfil 9 horizonte Bt observado mediante nx_5x y lpp_5x respectivamente, **f)** se observa la estructura granular en el Perfil 9 horizonte Bt con lpp_10x, **g)** presencia de Mn en el Perfil 9, horizonte 2Bt con lpp_5x, **h)** observación de cutanes en el Perfil 9, horizonte 2 Bt mediante nx_5x, **i)** y **k)** muestran cutanes y nódulos de Fe en P9, 3Bt con lpp_10x y nx_10x respectivamente y **j)** cutanes en P9, 3Bt con lpp_10x.

5.1.2.4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

El Cuadro 6 muestra la mineralogía encontrada en los perfiles estudiados, en la parcela de caña consiste de plagioclasas, como el mineral dominante (47 – 51%), filosilicatos (15.9-17.2%), cuarzo (6-7.4%), cristobalita (10.5-12.2%), tridimita (8.8-9.6%) y goethita (5.2-6.1%). Dentro del grupo de los filosilicatos, se detectó caolinita-montmorillonita y caolinita – nacrita. En el Cafetal, se presentan estos mismos minerales, pero en proporciones diferentes. Destaca que la cantidad de plagioclasas se reduce a 30.4% incrementándose el contenido de filosilicatos (26.9%), de goethita (9.5%) y de cuarzo, tridimita y cristobalita. En los suelos kársticos, se aprecian diferencias considerables. El perfil 6 de la Cueva, registra 19% de plagioclasas, en tanto que, en el 7, Karst, tiene 34%. Los filosilicatos en ambos son abundantes. El perfil 9, Eli, posee el contenido más bajo de plagioclasas y el más alto de filosilicatos y goethita, por lo que puede ser considerado como el más intemperizado de todos los estudiados

Cuadro 6. Análisis mineralógico en los horizontes superficiales de cada perfil obtenido mediante Difracción de Rayos X.

Fase Mineral identificada	Muestra	P1 Yunier	P2 Jaime	P3 Joacho	P5 Cafetal	P6 Cueva	P7 Karst	P9 Eli
	Fórmula							
Cristobalita	SiO ₂	11.4	12.2	10.5	11	2.8	13.3	4.5
Tridimita	SiO ₂	8.8	9.4	9.6	14	11.8	12.1	20.8
Plagioclasas (Albita)	(Na,Ca)[Al(Si,Al)Si ₂ O ₆]	50.5	46.9	50.9	30.4	19.1	34.4	9.8
Cuarzo	SiO ₂	6	7.4	6.4	8.9	16.8	8.8	8.5
Goethita	α-Fe ²⁺ O(OH)	7.3	6.9	6.7	9.5	7.9	8.8	12
Filosilicatos (Caolinita-Nacrita-montmorillonita)	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	16.1	17.2	15.9	26.2	25.2	22.4	44.4

De manera general, las propiedades detectadas en los perfiles estudiados, se puede resumir en el Cuadro 7. Destaca que todos los suelos, independientemente de su uso, son arcillosos (excepto el perfil 4, que es más limoso). Los perfiles de la parcela de caña son sumamente pedregosos, lo cual es una diferencia importante, ya que en el resto de los suelos, los fragmentos de roca son escasos.

Cuadro 7. Resumen de las características generales de cada perfil

Perfiles	Horizontes	Prof. cm	Uso	Características generales
P1 Yunier	5 (Ap, A, 2A, 3A, 3B)	80	Cañero	<ul style="list-style-type: none"> Suelos arcillosos con alto grado de pedregosidad variando desde muy chicas hasta mayores de 200 mm y ocupando alrededor del 50 % del área de forma general. Con pH ligeramente ácidos en superficie y acercándose más a la neutralidad en profundidad, oscilando entre 5.6 y 6. Fragmentos de carbón, restos vegetales y rocas, minerales primarios con fuerte intemperismo, reemplazados por óxidos de Fe sobre todo en los horizontes más profundos aunque también presentan minerales no alterados y gruesos cutanes de arcilla y carbón.
P2 Juine	4 (Ap, A, 2AB, 2B)	100	Cañero	<ul style="list-style-type: none"> Suelos arcillosos mediano grado de pedregosidad, de diferentes tamaños y menores a los 200 mm, ocupando menos del 50 % del área. Con pH ligeramente ácidos en superficie y acercándose más a la neutralidad en profundidad, oscilando entre 5.6 y 6. Fragmentos de carbón, restos vegetales y rocas, minerales primarios con fuerte intemperismo, reemplazados por óxidos de Fe sobre todo en los horizontes más profundos aunque también presentan minerales no alterados y gruesos cutanes de arcilla y carbón.
P3 Juchío	4 (Ap, A, 2A, 2B)	80	Cañero	<ul style="list-style-type: none"> Suelo arcilloso con una pedregosidad entre ligera y media, con tamaños más chicos en superficie y aumentando hasta los 200 mm en los horizontes profundos. Con pH alrededor de 6 en todo el perfil. Fragmentos de carbón, restos vegetales y rocas, minerales primarios con fuerte intemperismo, reemplazados por óxidos de Fe sobre todo en los horizontes más profundos aunque también presentan minerales no alterados y gruesos cutanes de arcilla y carbón.
P4 Cañal	5 (Ap, AB, Bt, 2BC, 3BC)	200	Cañero	<ul style="list-style-type: none"> Suelo franco arcilloso incrementando el contenido de arcilla en profundidad. muy profundo y con alto contenido de rocas en todo el perfil de diversos tamaños, ocupando más del 50 % del volumen, muy intemperizadas en profundidad. pH homogéneo en todo el perfil desde 6.5 en superficie hasta 6.3 en profundidad. También hay evidencias de abundante carbón y mezcla de fragmentos de rocas y minerales muy intemperizados y frescos, cutanes de arcilla, púlpas.
P5 Cafetal	5 (A, AB, Bt, 2Bt, 3Bt)	170	Cafetalero	<ul style="list-style-type: none"> Suelo arcilloso, profundo. sin rocas, solo algunos fragmentos muy pequeños y con alto grado de intemperismo en la parte más baja del perfil. pH con tendencia diferente, son más alcalinos en superficie 7.8 y 7.6, acercándose a la neutralidad, 7.3 en profundidad. Gran intemperismo de los minerales primarios, abundante s cutanes de arcilla gruesos y nodulos pequeños de Fe-Mn, fragmentos de rocas frescas y púlpas en horizontes profundos.
P6 Cueva	3 (A, AB, Bt)	60	Bosque natio	<ul style="list-style-type: none"> Suelo arcilloso, poco profundo. con presencia de rocas ligera aunque en el horizonte medio de gran tamaño. pH ligeramente ácido en superficie 6.6, aumentando su acidez en AB a 6.1 y volviéndose alcalino en profundidad 7.8. Destaca gran intemperismo aunque menor intensidad que en los restantes suelos, minerales primarios sustituidos por óxidos de Fe y cutanes delgados.
P7 Kast	3 (A, AB, BtC)	110	Bosque natio	<ul style="list-style-type: none"> Suelo arcilloso con ligero grado de pedregosidad aunque muy intemperizadas en lo más profundo. El pH es ácido en superficie 6.3, se vuelven casi neutros en AB 6.8 y disminuyen en BtC 6.1. estaca gran intemperismo aunque menor intensidad que en los restantes suelos, minerales primarios sustituidos por óxidos de Fe y cutanes delgados.
P9 Eli	4 (AB, Bt, 2Bt, 3Bt)	170	Cañero en Barbecho	<ul style="list-style-type: none"> Es el suelo más profundo y arcilloso de todos, con una coloración roja y características verticales sin pedregosidad, visiblemente el más evolucionado desde el punto de vista pedogenético. Su pH es el más bajo de todos los perfiles entre 5.3 y 5.7, menos en el horizonte superficial AB con 7.8. Muestra los mayores rasgos de intemperismo de todos lo suelos, con restos de carbón en superficie, práticamente todo es arcilla, mucha lixiviación, abundantes nodulos de Fe y manchas de Mn.

6. DISCUSIÓN

6.1. HETEROGENEIDAD DE LOS PERFILES ESTUDIADOS

Los nueve perfiles estudiados poseen características comunes, pero también diferencias, a consecuencia de las variaciones en los factores de formación y el uso de suelo (Cuadro 7). Para determinar cuál de los factores es el responsable de la diferenciación de los suelos, se hizo un análisis cualitativo de las similitudes encontradas. Bajo este criterio, los suelos se pueden agrupar en tres: el primer grupo en el que se encuentran los perfiles 1, 2, 3 y 4, localizados dentro del cultivo de caña; el segundo, en el que están los perfiles 5 y 9; el tercero, en el que se ubican los perfiles 6 y 7, cercanos a los lomeríos de calizas.

Excepto el perfil 4, las características similares que tiene el primer grupo son: la profundidad, ya que todos fueron excavados entre 80 y 100 cm; presentan el mismo tipo de horizontes, color, proporciones similares de arcilla (>50%), valores de pH ácidos, artefactos antrópicos (cerámica, obsidiana, carbón), porcentajes de CO y CI (Tabla 1), gran cantidad de rocas distribuidas en todo el perfil e intemperismo avanzado en los minerales primarios. Es de resaltar, además, que en estos perfiles se encuentran cutanes *in situ* y otros retrabajados lo cual puede ser posible por su posición en el relieve y por el impacto antrópico que han recibido desde épocas pre-hispánica (detectable por la presencia de cerámica y obsidiana en todos los horizontes). Tanto la actividad antrópica como la pendiente, pudo influir al retrabajamiento de los suelos. Una de las propiedades que claramente se diferencia en el perfil 3, es la susceptibilidad magnética (X) ya que presenta valores menores. Esta diferencia puede ser atribuible a la posición del perfil en el relieve, ya que se encuentra en la parte baja, en la terraza y planicie de inundación del río, condición que puede transformar los minerales ferrimagnéticos por los procesos redox (Grimley *et al.*, 2004). El perfil 4 sale de este patrón, a pesar de encontrarse en la misma parcela, ya que se encuentra en la porción más elevada del sitio, por lo que alcanza una mayor profundidad. La diferencia más notable es su textura, ya que es más limoso, tiene valores de pH más neutrales (Figura 14). La pregunta es qué hace diferente este perfil. La respuesta parece relacionarse en su profundidad, precisamente, ya que se está observando la parte baja, la cual no se alcanza en el interior de la parcela. El mayor contenido de limo demuestra que se está en un nivel con menor intemperismo o que

está presentando un rejuvenecimiento por el contenido tan elevado de rocas, lo que puede estar incidiendo en su valor textural, el cual no ha tenido tiempo suficiente en transformarlo a arcilla, es decir estamos más cerca al material parental.

En un segundo grupo se tienen los suelos cuyos perfiles son profundos (perfiles 5 y 9) y arcillosos, con coloraciones rojizas y presencia de horizontes Bt. Son suelos que prácticamente no tienen fragmentos de roca y sus minerales primarios están fuertemente intemperizados (Figuras 21 y 22). Los valores de pH son alcalinos en la superficie disminuyendo con la profundidad, tendencia que es contraria al del resto de los perfiles (Figuras 15 y 18). Uno de los rasgos que claramente diferencian estos dos perfiles es la presencia del horizonte A de color oscuro en el cafetal perfil 5 (Figura 7), que puede, entonces, ser relacionado con el uso de suelo, presentando una acumulación de la materia orgánica en este horizonte; mientras que el perfil 9, el cual estuvo cientos de años bajo cultivo de caña, se encuentra decapitado y su horizonte superficial, el AB aunque es pardo, ya tiene tonalidades rojizas. Otra de las diferencias se refiere a la X, la cual tiene valores más homogéneos en el perfil del cafetal, con un pico en el Bt1; en contraste, en el perfil 9 se observa que los valores mínimos se encuentran en la superficie, aumentando a profundidad. Es precisamente este suelo el que tiene los porcentajes de arcilla más altos (>60%). Es interesante que estos dos perfiles, a pesar de sus similitudes, se encuentran bajo diferente uso de suelo, ya que el 5 corresponde a un cafetal en tanto que el 9, era un cañal, hasta hace poco tiempo (alrededor de 8 años). Es de suponer la presencia del horizonte A oscuro, del cafetal se debe a una mayor estabilización de su materia orgánica producto del manejo, lo cual hace que se impregne de partículas orgánicas y sea visiblemente más oscuro, aun cuando, los porcentajes de CO no son los más altos dentro de los perfiles analizados.

En el caso de los perfiles 6 y 7 que se localizan en laderas de elevaciones de caliza (Figura 2), mantienen vegetación arbórea que, aunque presentan cierta perturbación, no han sido cultivados. Además, su ubicación se relaciona con un relieve kárstico, con presencia de dolinas y depresiones kársticas. Dada la condición natural, los horizontes superficiales tienen altos contenidos de materia orgánica con una coloración más oscura, que se detecta en la

Cueva (perfil 6), elemento que respalda los estudios donde se plantea que los suelos que mantienen una cobertura natural contienen un mayor almacén de carbono (Vela *et al.*, 2011). A pesar de que se han agrupado por dichas condiciones, se observan claras diferencias como son, porcentajes de arcilla muy elevados en la Cueva (>70%), así como de CE de alrededor de 400 mS/cm. Llama la atención la presencia de cutanes de arcilla en ambos suelos (Figura 22), de manera que se puede determinar que esta propiedad (la iluviación de arcilla) está relacionada con la pedogénesis natural.

A pesar de las diferencias encontradas, es posible proponer una correlación entre los perfiles, ya que todos ellos comparten ciertas propiedades como por ejemplo la presencia de fuerte intemperismo de los minerales primarios, sobre todo en los horizontes profundos, tipo Bt, detectable en todos los perfiles, aunque se manifiesta de forma similar en otros horizontes cercanos a los Bt. Esto lleva a pensar que la cubierta edáfica tiene un patrón homogéneo en la zona, controlada por los factores de formación. Ésta cubierta evidencia procesos de intemperismo e iluviación intensos que han actuado por periodos largos. Las actividades antropogénicas han impreso su huella, modificando las propiedades originales, como se explicará más adelante.

6.2. LOS FACTORES DE FORMACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA PEDOGÉNESIS

6.2.1. RELIEVE VS MATERIAL PARENTAL

Existe una gran relación entre los factores formadores, pues aunque actúan independientemente, no lo hacen de forma aislada, ya que se presentan en un mismo tiempo y espacio sobre un objeto dado (Birkeland, 1999; Chadwick y Graham, 2000). La acción de los procesos dinámicos de cada uno de los factores formadores de suelo origina características bien definidas, las cuales son observables en la morfología del perfil. Es así como los suelos se diferencian según sus propiedades, siendo estas cuantificadas y calificadas en sus horizontes (Díaz, 2006).

Existen estudios que plantean que dentro de los factores que rigen la pedogénesis, en primera instancia, está el relieve; en segunda, el material parental, y en tercera, el clima y la acción de los organismos a través del tiempo (Castellanos *et al.*, 2017).

En la zona estudio, el relieve y el material parental tienen una gran importancia en el grado de pedogénesis encontrado y se encuentran muy relacionados entre sí, lo cual coincide con lo planteado en relación con estos dos factores formadores y su influencia en la pedogénesis por (Peraryra, 1994). La geoforma ondulada de la región desempeña un papel fundamental en la formación del suelo, ya que influye en el transporte de sedimentos por erosión hídrica de las partes elevadas a las bajas, formándose suelos más profundos o policíclicos como los que se encuentran en el área cañera. Es decir, se puede apreciar el conjunto de horizontes que representan diferentes ciclos pedogenéticos. Esto se interpreta por la gran cantidad de rocas que hay a lo largo del perfil junto con la abundancia de carbón, cerámica y obsidiana. Ahora la pregunta que surge es si esta distribución de rocas se debe al efecto particular del relieve. La respuesta más probable es que no, ya que los perfiles que se encuentran por fuera de la parcela cañera no tienen rocas, a pesar de encontrarse en zonas contiguas y en posiciones similares del relieve (Figura 2). Además de las rocas, se tiene en estos perfiles restos de cerámica y obsidiana, que lleva a pensar que la influencia antrópica no se restringe al cultivo de caña sino que hay evidencia de otras actividades más antiguas, que puedan estar ejerciendo un efecto rejuvenecedor de estos suelos, a diferencia del resto.

En estos perfiles, sin embargo, también se observan cierto patrón en las propiedades analizadas, como por ejemplo la susceptibilidad dependiente de la frecuencia (Figuras 15 a 18), en donde se tiene un conjunto de picos que marca la distribución heterogénea de partículas superparamagnéticas, que se interpreta como resultado de diferentes intensidades de la pedogénesis. De hecho, como se ha señalado, en todos los perfiles se observan patrones convergentes en la pedogénesis, de acuerdo con el concepto de Phillips (2005), documentados por la presencia de horizontes Bt.

El material parental también tiene una gran influencia en estos suelos, ya que en la región es la roca caliza la que se plantea como la roca originaria de los suelos, ya que toda la zona está rodeada por lomeríos de caliza pertenecientes a la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, en los perfiles realizados, el material parental encontrado fue de origen volcánico, detectable tanto durante el trabajo de campo como en las láminas delgadas, incluso en los perfiles donde aflora la caliza, lo que se puede justificar por la cercanía del volcán Pico de Orizaba. Estos materiales volcánicos imprimen una huella a todos los suelos estudiados, siendo entonces suelos cuyo desarrollo actual es a partir de dichos materiales volcánicos y no de la caliza que se encuentra aledaña.

6.2.2. INFLUENCIA DEL TIEMPO

El tiempo es un factor que actúa de forma transversal en todo sistema, evidenciándose su efecto en relación con el resultado de los restantes factores formadores. En la zona de estudio se puede observar como hay suelos que, a pesar de tener el mismo material parental, y aunque no se tienen resultados de fechamientos, se puede inferir que el tiempo en el que algunos factores al que puedan haber estado expuestos estos suelos de forma particular, pueden haber generados diferencias en sus características morfopedológicas. Tal es el caso del perfil 9, el cual se considera que tiene la pedogénesis más avanzada, por su alto contenido de arcilla y la casi total destrucción de los minerales primarios. Para lograr este avanzado grado de intemperismo, Targulian y Krasilnikov (2007) sugieren lapsos de varios miles de años, siendo el uso de suelo uno de los factores que pudo haber influido de forma particular a una rápida diferenciación en algunas de las características de los mismos.

6.3. TRANSFORMACIÓN DE LAS TENDENCIAS PEDOGENÉTICAS POR LA INFLUENCIA ANTRÓPICA

6.3.1. CULTIVO DE CAÑA *VERSUS* CAFÉ

Los suelos reciben un impacto mayor o menor por el uso al que se vean sometidos, en el caso del uso agrícola interviene en varios aspectos donde el hombre tiene gran influencia, sobre todo lo referente al tipo de cultivo establecido y el manejo que se le den tanto al suelo como

a la plantación. Generalmente los suelos dedicados a la agricultura, a nivel mundial, se ven sometidos a mayores niveles de erosión (Pérez-Pérez, 2016).

En la zona de estudio existen varios usos del suelo. Los dedicados al cultivo de café y al de caña de azúcar representan los de mayor influencia antrópica, aunque vale destacar que, por las características de ambos cultivos, el dedicado a la caña de azúcar representa el que mayor impacto recibe por la propia naturaleza de las labores que se le realizan durante todo su ciclo (Hernández *et al.*, 2011; 2013). Este efecto que se aprecia en los primeros horizontes de los perfiles estudiados, pues los suelos cañeros muestran coloraciones más pálidas en los horizontes superficiales, debido entre otros factores a la pérdida de materia orgánica y erosión de los suelos (Hernández *et al.*, 2011, 2013; Moreno *et al.*, 2014; Borreli *et al.*, 2017). Asimismo, aunque no se midió en los sitios de estudio, se ha documentado en suelos de Veracruz, que el efecto del cultivo de caña deriva en una disminución de la conductividad hidráulica y de la materia orgánica en relación con sitios cultivados con café y vegetación natural (Pérez-Pérez, 2016).

6.3.2. INFLUENCIA PRE-HISPÁNICA

La parte central del estado de Veracruz, desde épocas muy tempranas, fue escenario tanto de asentamientos permanentes como de tránsito e intercambio comercial de diversos productos. Dentro de estos asentamientos se reporta la región de Amatlán, como uno de los sitios donde existieron estos asentamientos humanos tanto desde épocas muy tempranas y aún, después de la conquista colonial se mantuvieron presentes los moradores de este municipio aunque ya en reducido número (Heredia, 2013).

La zona de estudio presenta variada afectación antrópica, según aspectos y evidencias presentes en los perfiles estudiados, con mayor impacto en los suelos dedicados al cultivo de la caña. En estos suelos se evidencia no solo la afectación directa ocasionada por el establecimiento de este cultivo, sino que existen restos de antropización anterior a este uso del suelo. Ya que fueron encontrados restos de cerámica, obsidiana, y muchos restos de roca que sugieren la presencia de algún asentamiento pre-hispánico en el lugar, elementos que

permanecen dentro de la historia evolutiva de los perfiles 1, 2, 3 y 4. Es precisa y exclusivamente en esta parcela en la que se encuentra evidencias de un promontorio y abundancia de rocas que sugieren la presencia de una “pirámide”. Es quizá por ello que el perfil 4 presenta las propiedades más contrastantes que se pueden relacionar con la ubicación del promontorio, debido a que en la parte más elevada de la parcela es donde hay mayor presencia de estas rocas de gran tamaño, coincidiendo esto con la ubicación del perfil 1 y 4.

7. CONCLUSIONES

Existe una gran heterogeneidad en los perfiles estudiados, aun cuando comparten varios aspectos comunes, pero por la influencia de la geoforma y la acción antrópica predominantemente por el uso, les imprimen características diferentes a estos suelos, lográndose claramente diferenciar por estos aspectos en tres grupos, los suelos que son cultivados con caña, los suelos más profundos y prácticamente sin evidencias de rocas en todo el perfil con marcada pedogénesis y los suelos de laderas en lomeríos de caliza. Esto los hace poseedores de características particulares y generales en cuanto al grado de intemperismo, pedregosidad, profundidad, textura, pH entre algunas otras que resaltaron en unos y otros perfiles.

Los suelos estudiados a pesar de encontrarse en una zona cuyo origen es a partir de roca caliza, elemento que se puede constatar en las partes de mayor elevación, estos no tienen un desarrollo de este material, sino que su ontogenia se deriva de material volcánico, lo que es un elemento que se puede apreciar en todos los perfiles realizados y que su grado de evolución está influenciado entre otros factores por el relieve en el que se encuentran y grado de antropización.

El cambio de uso del suelo en agroecosistemas de caña de azúcar en la región de Córdoba (Amatlán de los Reyes), Veracruz, provoca modificaciones en algunas de las características del suelo como el color, textura, grado de intemperismo y otros rasgos pedogenéticos, si se analiza comparativamente entre estos y otros suelos con menor grado de antropización o bajo otro uso en la zona, como los que presentan café y una cobertura boscosa más “natural”.

La pedogénesis registrada en los suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar presenta un alto grado de avance, sobre todo en el suelo donde se encuentra el perfil 9, infiriendo sea el más evolucionado y de mayor grado de formación de todos, por lo que el factor tiempo es un elemento a considerar y que se puede apreciar relacionado con otros factores, como son el propio evento antrópico mediante el uso de suelo fundamentalmente o la geoforma, los que en su conjunto propician rasgos de mayor intemperismo en algunos de los suelos estudiados o la presencia de cierta ciclicidad en sus horizontes.

De forma general y aunque el grado de intemperismo es alto en todos los perfiles de suelo estudiados, se puede notar como el perfil 9 dedicado al cultivo cañero presenta el nivel más elevado de intemperismo en la zona, relacionado directamente con el impacto antrópico al que estuvo expuesto durante varios siglos. Sin embargo los restantes suelos bajo este tipo de manejo, presentan los índices de intemperismo menos pronunciados, lo que se debe al rejuvenecimiento que están presentando por el propio impacto antrópico particular en el que fueron involucrados, siendo el alto grado de pedregosidad, cerámicas y obsidianas los responsables de tal efecto en este sentido.

BIBLIOGRAFÍA

Amatlán de los Reyes 2016. Sistema de información municipal. Cuadernillos municipales 1 p.

Birkeland, P. W. 1999. Soil and Geomorphology. Oxford University Press, New York, pp. 53-59.

Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C. Alewell, C., and Bagarello, V. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nat. Commun., 8: 1-13.

Medina-Castellano, M. Sánchez-Espinosa, J. A., Cely-Reyes, G. E. 2017. Genesis and evolution of the Valle of Sibundoy Soils – Colombia. Revista Ciencia y Agricultura, 14 (1), 95-105.

Cavalcanti, R.Q., Rolima, M. M., de Lima, R.P., Tavares, U.E., Pedrosa, E.M.R., Gomes, I.F., 2019. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil a Federal Rural University of Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros. Soil and Tillage Research 189: 140-147.

Chadwick, O. A. and Graham, R. C. 2000. Pedogenic Processes. En (Ed.) M. E. Sumner. Hand Book of Soil Science. CRS Press. Boca Raton, E 41 – E 72. Pp. 2000.

Clement S.F.E. 1916. Studies on the movement of soil moisture. USDA Bureau of Soils Bull. 38p.

Crespo, H. y Vega V, E. 1988. Estadísticas históricas del azúcar en México. México, D.F.: Azúcar S.A. 17 p.

Díaz, G, A. P. 2006. Estudio de la homogeneidad del suelo osorno mediante la variabilidad del aluminio extractable utilizando geoestadística. Valdivia – Chile. Tesis de Licenciatura en Agronomía. Universidad Austral de Chile.

Dokuchaev, V.V. 1883. Russkiy chernozem. (en ruso) Russkaya kollektziya, edición 2008. 480 p.

Flores, D, L. y Alcalá, M, J. R. 2010. Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de Física de Suelos. Instituto de Geología de la UNAM.

Garside, A.L., Bell, M., Robotham, B.G., Magarey, R.C. and Stirling G.R., 2005. Managing yield decline in sugarcane cropping systems *Int. Sugar J.*, 107 (1273): 16-26.

Heredia, G, V. F. 2013. El Valle de Río Seco, su desarrollo histórico durante los siglos XVI-XVIII (el caso de Chocamán Veracruz) Tesis de Maestría, UNAM.

Grimley, D.A., Arruda, N.K. and Bramstedt, M.W., 2004, Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA: *Catena*, 58 (2), 183-213.

Hernández, A. Bojórquez, J. I. Ascanio, M. O. García, J. D. Morales, M. y Borges, Y. 2011. “Cambios de la cobertura del suelo por influencia antropogénica: énfasis en las regiones tropicales”. En: eds. Krasilnikov P. Jiménez F. J. Reyna T. y García N. E. *Geografía de Suelos de México*, Ed. UNAM, México, pp. 119-131, ISBN 978-607-02-2704-2.

Hernández, J. A. Cabrera, R. A. Borges, B. Y. Vargas, B. D. Bernal, F. A. Morales, D. M. y García, A, M. O. 2013. “Degradación de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados y sus indicadores de la Llanura Roja de La Habana”. *Cultivos Tropicales*, 34, 3, 45-51, ISSN 0258-5936.

Huffman E. W. D. 1977. Performance of a new carbon dioxide coulometer. *Microchem. Jour.* 22: 567-573.

INTAGRI. 2017. Los Factores de Formación del Suelo. Serie Suelos. Núm. 27. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p.

IUSS Working Group 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.

Jenny, H. 1941. Factors of Soil Formation a System of Quantitative Pedology. Copyright, 1941, by the McGraw-Hill, Book Company, INC. Printed in The United States of America. Pp. 11-15.

Lang-Ovalle, F. P., Pérez-Vázquez, A., Martínez-Dávila, J. P., Platas-Rosado, D. E., Ojeda-Enciso, L. A. y González-Acuña, I. J. 2011. Macrofauna Edáfica Asociada a Plantaciones de Mango y Caña de Azúcar. Terra Latinoamericana, 29: 2, pp. 169-177 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

Lorenz, G. 2015. Soil science in the 21st century: connecting system, functions and planning. Quebracho 23 (1,2):105-116.

Lugo, H. J. 1991. "Procesos exógenos", esc. 1:8 000 000, en Atlas Nacional de México, IV.3.4, "Geomorfología 2", Instituto de Geografía, UNAM, México.

Mollerup, M. 2008. Philip's infiltration equation for variable-head ponded infiltration. Journal of Hydrology 347 (1-2): 173-176.

Moreno, R, H. Blanquer, G, J. M. Ibáñez, A, S. 2014. El Color del Suelo. Universidad Politécnica de Valencia. Pp. 3-4.

Munsell Soil Color Charters. 2000. Revised Washable Edition Year 2000.

Muñoz-Villers, L.E. y McDonell, J.J. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. Hydrology and Earth System Sciences 17: 3543-3552.

Ortiz, H, A. S. 2011. Atlas de Riesgos del Municipio Amatlán de los Reyes.

Peña-Ramírez, V. Vázquez-Selem, L. Siebe, C. 2015. Rates of pedogenic processes in volcanic landscapes of late Pleistocene to Holocene age in Central Mexico. *Quaternary International* 376: 19-33.

Peraryra, F. X. 1994. Relaciones de los factores relieve y material originario con los procesos pedogenéticos, la distribución de los suelos y propiedades seleccionadas en un sector de las Sas. Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis de Doctorado.

Pérez-Pérez, H. 2016. Impacto del cambio de uso de suelo en la conductividad hidráulica del suelo, centro de Veracruz, México.

Phillips, J. 2005. Weathering instability and landscape evolution. *Geomorphology* 67: 255-272.

Phillips, J.D. 1998. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation (with Discussion). *Geoderma* 86: 1-42.

INEGI: 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Amatlán de los Reyes, Veracruz de Ignacio de la Llave INEGI.

Ramírez, H, T. 2000. Recuperación de la Fertilidad de un suelo cañero del Ingenio San Miguelito. Amatlán de los Reyes Veracruz. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana.

Renderos-Duran, J. Harmand, F. Jiménez, Kass, D. 2002. Contaminación del agua con nitratos en microcuencas con sistemas agroforestales de *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica. *Agroforesteria en las Americas* 9: 81-85.

Richter, J. 1987. The soil as a reactor. Modelling processes in the soil. Caterna V. Verlag, 192 p.

Richters, E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central. Hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. San José, IICA. Pp. 62-63.

Sanabria, T, C. and Ricaurte, C, J. A. 2013. Use of amazonian anthropogenic soils: Comparison between Caboclos communities and Tikunas indigenous group. *Revista Gestión y Ambiente* 16. 2. Medellín ISSN 0124.177X. 5-17 pp.

Solleiro-Rebolledo, E. Sedov, S. Cabadas, H. 2015. Use of soils and paleosols on volcanic materials to establish rates of soil formation at different chronological scales. *Quaternary International* 376: 5-18.

Targulian, V.O. Krasilnikov P.V. 2007. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71: 373-381.

Vela, C, G. López, B, J. y Rodríguez, G, M. L. 2011. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. Pp. 19-28.

Worm, H.U. 1998. On the superparamagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility: *Geophys. J. Int.* 133. 201-206.