



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

BIOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO
GRANDE, COMO SOPORTE PARA ENTENDER LA DINÁMICA
DE CONTAMINANTES QUE LLEGAN AL SISTEMA LAGUNAR
DE MONTEBELLO, CHIAPAS.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

MONTERRAT MARTÍNEZ ANGELES



**DIRECTORA DE TESIS: DRA. LUCY N. MORA
PALOMINO
ASESOR INTERNO: M. EN C. JUAN MANUEL
VALDERRÁBANO GÓMEZ**

MÉXICO, D.F. 2015



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

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por haber recibido de ella mi formación profesional y por los excelentes profesores de los que tuve la oportunidad de aprender académica y personalmente, en especial al Dr. Gerardo Cruz Flores y al Dr. Efraín Angeles Cervantes.

A mi directora de tesis, la Dra. Lucy Mora Palomino por todo el apoyo, paciencia y dedicación para la realización de este proyecto.

A mi asesor interno, el Maestro en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez por su interés en mi formación profesional, su tiempo y valiosas aportaciones para este trabajo.

A mis sinodales el Dr. Gerardo Cruz Flores, el M. en C. José Luis Miguel Castillo González y Biol. Leticia López Vicente por sus comentarios que me ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al Instituto de Geología de la UNAM, por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

Al Biol. Jorge René Alcalá Martínez por el apoyo brindado en la asesoría y procesamiento de muestras de suelo en laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología.

A Mario Cayetano por su amistad y por compartir en todo momento sus conocimientos conmigo, que fueron base para poder entender y escribir este trabajo.

A todos los compañeros que se encuentran en el laboratorio de Edafología Ambiental por el apoyo brindado de una u otra forma en este proyecto: Daniel Pinales Bravo, Carolina Aviles Junco, Sara López y Arturo Atilano.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a todas aquellas personas que me han brindado su apoyo a lo largo de mi vida y mi carrera:

A mis padres Antonio Martínez Licona y Marcelina Angeles Quintero por darme la vida y dedicar gran parte de su vida a mi educación y formación, gracias a su apoyo y esfuerzo he llegado a realizar este sueño, ustedes son mi motivación principal.

A mis hermanos Pilar, Claudia y David por ser mis compañeros de infancia, porque a pesar de nuestras diferencias de carácter siempre los voy a querer y les debo lo mejor en la vida.

A mi sobrina Samaí que desde el día en que nació me ha llenado de alegrías y sorpresas y siempre ocupara un lugar especial en mi corazón.

A mi mejor amiga, Ariana, por su invaluable amistad, por esa chispa e ingenio que la caracterizan y que me agrada tanto de ella, sé que por algo nos encontramos en el camino.

A mis amigos de la Facultad por las historias que vivimos y porque gracias a ellos mi experiencia de estudiante fue mucho más placentera, gracias Bety, Marisol, Norma, Cory, Olivio, Toño, Ivan y Edgardo por ser mis compañeros en este viaje.

A Claudio que me inspira admiración por su grandiosa imaginación y por su amor por la vida y las cosas bellas.

CONTENIDO

I. RESUMEN	7
II. INTRODUCCIÓN	8
2.1 Justificación	10
III. OBJETIVOS	11
3.1 Objetivo General:	11
3.2 Objetivos Particulares:	11
IV. HIPÓTESIS.....	12
V. ANTECEDENTES	12
5.1 MARCO TEÓRICO.....	12
5.1.1 Definición de Cuenca, sus componentes e importancia.	12
5.1.2 Que es una caracterización de suelos	14
5.1.3 Definición de suelo	14
5.1.4 Influencia de los factores de formación en las características del suelo	15
5.1.5 Procesos de disolución en paisajes kársticos	17
5.1.6 Importancia ecológica del suelo de acuerdo a sus funciones.....	20
VI. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
6.1 Geología	23
6.2 Clima.....	25
6.3 Unidades de Suelos	27
6.4 Vegetación y uso de suelo.....	29
6.5 Importancia ecológica de la zona de estudio.....	30
VII. METODOLOGÍA	31
7.1 Recopilación de Información.....	31
7.2 Recopilación de información en campo: muestreo	31
7.3 Trabajo de laboratorio	32
7.3.1 Inventario y preparación de las muestras.....	32
7.3.2 Análisis de parámetros físicos y químicos del suelo	32
7.4 Interpretación de la información	33
VIII. RESULTADOS	35
8.1 Caracterización de las Unidades Geomorfológicas	35
8.2 Características, procesos pedogenéticos dominantes y propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo.	38

8.3 Suelos y geomorfología como bases para entender la evolución del paisaje.....	51
8.4 Evaluación edafocológica de los perfiles de suelo y potenciales de uso	60
IX. DISCUSIÓN.....	70
X. CONCLUSIONES	92
XI REFERENCIAS.....	94
XII. ANEXOS	100

Índice de figuras

Figura 1. Síntesis de las reacciones de disolución del carbonato cálcico en agua.....	18
Figura 2. Fases de evolución del paisaje kárstico.....	20
Figura 3. Esquema de ubicación de la zona de estudio.	23
Figura 4. Geología de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello.	24
Figura 5. Temperatura media de estaciones meteorológicas analizadas por CFE.....	26
Figura 6. Precipitación media de las estaciones climatológicas analizadas por CFE.....	26
Figura 7. Esquema de metodología.....	34
Figura 8. Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca Río Grande-Lagunas Montebello.	37
Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo de perfiles de suelo a lo largo de la Cuenca	39
Figura 10. Foto perfil Santa Rita, El Lavadero (Planosol háplico).....	72
Figura 11. Secuencia de horizontes de los perfiles descritos en cada una de las unidades geomorfológicas.....	74
Figura 12. Foto de localidad Los Higos.....	77
Figura 13. Disponibilidad de nutrientes con respecto al pH del suelo.	85
Figura 14. Mapa preliminar de asociaciones de suelo de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello.....	91

Índice de cuadros.

Cuadro 1. Propiedades edáficas que afectan la calidad de sitio.....	21
Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo.....	40
Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo.....	47
Cuadro 4. Geomorfología asociada a suelos.	52
Cuadro 5. Resumen de evaluación edafocológica de perfiles de suelo	61

Cuadro 6. Potenciales de uso para cada tipo de suelo asociado a geomorfología de la cuenca	63
Cuadro 7. Estructura y estabilidad de agregados de los perfiles de suelo para los horizontes superficiales o de acumulación de materia orgánica.	81
Cuadro 8. Características de los suelos como factores de riesgo para la modificación de la calidad sistema lagunar de Montebello.	89
Cuadro 9. Descripción y evaluación de perfil Carrizal-parte alta	101
Cuadro 10. Descripción y evaluación de perfil San Antonio, La Patria	103
Cuadro 11. Descripción y evaluación de perfil Parcela Venustiano Carranza.....	105
Cuadro 12. Descripción y evaluación de perfil San Miguel Tinajab	107
Cuadro 13. Descripción y evaluación de perfil Los Higos.....	109
Cuadro 14. Descripción y evaluación de perfil La Esperanza, San Martín-El Encierro.....	111
Cuadro 15. Descripción y evaluación de perfil Carrizal-Bambus.....	113
Cuadro 16. Descripción y evaluación de perfil El Potrero-ojo de agua.....	114
Cuadro 17. Descripción y evaluación de perfil El Sociego.....	117
Cuadro 18. Descripción y evaluación de perfil Cuajilote.....	119
Cuadro 19. Descripción y evaluación de perfil Juznajal.	121
Cuadro 20. Descripción y evaluación de perfil Carrizal.....	123
Cuadro 21. Descripción y evaluación de perfil Prado Zapata	125
Cuadro 22. Descripción y evaluación de perfil Llanura grande, Venustiano Carranza	127
Cuadro 23. Descripción y evaluación de perfil El Triunfo 1.	129
Cuadro 24. Descripción y evaluación de perfil El Triunfo 2.	132
Cuadro 25. Descripción y evaluación de perfil Santa Rita, El Lavadero	134
Cuadro 26. Descripción y evaluación de perfil Santa Rita, Antonio López.	136
Cuadro 27. Descripción y evaluación de perfil Jobala.....	138

I. RESUMEN

En este estudio se realizó una caracterización de los suelos de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello, Chiapas, con el objetivo de conocer la composición, distribución y comportamiento de los suelos en dicha región. A partir de esta información se estimaron los potenciales edafocológicos de los suelos; entre ellos, el potencial de amortiguamiento ante el riesgo de contaminación del sistema lagunar de Montebello.

Se describieron 19 perfiles de suelo asociados a unidades geomorfológicas previamente descritas, los cuales se clasificaron de acuerdo al sistema WRB 2007. Las propiedades físicas y químicas de campo y laboratorio fueron la referencia para la evaluación edafocológica de los perfiles.

En las unidades denominadas "plegamientos de estructuras mesiformes", "mogotes" y "relieve mesiforme", se encontraron asociaciones de suelos poco desarrollados clasificados como Leptosol (réndzico, mólico o lítico) y Cambisol háplico, ambos suelos presentaron pocas aptitudes para la agricultura principalmente por problemas de profundidad efectiva, así mismo, la forma del relieve es un factor que los hace vulnerables a los procesos erosivos, por lo que su aptitud natural es la conservación de vegetación natural. En otra unidad geomorfológica denominada "lomeríos de pendiente continua denudatoria" se asocian suelos tipo Feozem (háplico o lúvico) y Planosol háplico, dadas sus características geológicas en esta unidad se identificó una intensa erosión y degradación de la vegetación. Las geoformas que ofrecen una mayor estabilización del terreno son la "antigua planicie kárstica cubierta con material residual", "valle fluvial alto y bajo", "planicie de acumulación de origen lacustre" y "planicie kárstica" en donde se desarrollan suelos más profundos, diferenciados y con mayores capacidades de resiliencia, encontrándose frecuentemente asociaciones de Feozem (réndzico, stágnico o lúvico), Vertisol stágnico y Fluvisol stágnico. Dada las propiedades químicas de estos suelos, tales como el carbono orgánico medio, pH cercano a la neutralidad y altos porcentajes de arcilla, tienen alto potencial para la nutrición de las plantas, sin embargo la mala aireación y drenaje deficiente limitan la producción agrícola. Por otro lado, la estabilidad de los terrenos ha favorecido la agricultura y con esto, el desmedido consumo de agroquímicos representa un riesgo alto para la calidad del agua. Finalmente en la "planicie kárstica baja" se identifica Gleysol álico, que representa muchas limitaciones a la producción agrícola por mala aireación y drenaje, y dada su cercanía al sistema lagunar, estos suelos pueden contribuir de manera importante a la contaminación del sistema lagunar si son utilizados para la agricultura, como actualmente son utilizados.

II. INTRODUCCIÓN

El suelo o pedósfera es un compartimento del sistema tierra, resultado de la interacción dinámica entre la atmósfera, biósfera, litósfera e hidrósfera y cuyas propiedades dependen de las particularidades regionales o locales y el tiempo (Juma, 1999).

Dependiendo de las características puede cumplir diferentes funciones. Ecológicamente, funciona como soporte a las plantas, hábitat de diversos organismos, regulador del ciclo hidrológico, además de filtrar, desactivar o retener compuestos potencialmente tóxicos que pudieran afectar las redes tróficas de los ecosistemas terrestres y acuáticos o llegar a las aguas subterráneas. También, funciona como soporte físico a la infraestructura y depósito de desechos producto de las diversas actividades humanas (Siebe *et al.*, 2003; MEA, 2005).

De lo anterior se deduce que el suelo es un recurso natural de vital importancia para la humanidad dado que es el sustrato que soporta las actividades agrícolas, pecuarias y forestales así como la infraestructura urbana, de caminos y de depósito. Las características de los suelos en un área específica de la corteza terrestre determinan las funciones que pueden desarrollar, definen sus usos potenciales y son la base para establecer las prácticas de manejo que llevarán a un aprovechamiento óptimo de este recurso natural. El conocimiento de la distribución de los suelos y de sus propiedades es, por lo tanto, un componente crucial para definir el plan de manejo de cualquier territorio (Siebe *et al.*, 2003).

Sin embargo, las funciones ecológicas del suelo se ven afectadas por actividades antrópicas como el cambio de uso de suelo y deforestación, que modifican sus propiedades físicas, químicas, biológicas y bioquímicas, lo que lleva a procesos de degradación que impactan los componentes del paisaje. Estos procesos se asocian a impactos ecológicos en prácticamente todas las escalas. Localmente inducen la pérdida y degradación de suelos, que pueden favorecer la movilidad y concentración de material y nutrientes en las partes bajas de las cuencas, en muchos casos representados por cuerpos de agua, que se ven afectados por el aumento en la cantidad de nutrientes induciendo a procesos de eutrofización.

Este trabajo abordó la caracterización edafoecológica de los suelos de la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello, que rodean y alimentan de sedimentos al sistema Lagunar de Montebello, ubicado entre las coordenadas 90° 10' 7.6" y 91° 39' 41.2" de longitud Oeste y 16° 04' 17.1" y 16° 25' 30.8" de latitud Norte (CONAGUA, 2009). Desde una perspectiva sistémica se pretende

relacionar las características de los suelos con su potencial de uso, así como su potencial para movilizar ya sea material particulado o nutrientes en solución que favorezcan el deterioro del sistema lagunar.

Desde hace 11 años, la Red Nacional de Medición de Calidad de Agua (RENAMECA, 2008) ha reportado incidentes en las Lagunas de Montebello, tales como muerte de peces y cambio en la calidad del agua, que evidencian el deterioro de la calidad del agua.

Estos eventos se relacionan con el manejo de los recursos naturales en la zona, cabe mencionar que en un lapso de 25 años (1975-2000) ha habido una alta tasa de pérdida de los bosques tropicales. En 1975, se contaba con bosques templados en buen estado de conservación que representaban 14%, en tanto que los bosques templados que presentaban algún grado de alteración se encontraba en 4.5%. Sin embargo, para el año 2000, los bosques templados disminuyeron con respecto a 1975 representando ahora sólo el 9.9% y los templados perturbados se incrementaron ligeramente a 6.14% (Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de Chiapas, 2003. Tomado de Plan de Gestión de la Cuenca del Río Grande, 2009).

El destino principal de estas áreas deforestadas ha sido para producción agrícola. Para agricultura de temporal se siembra principalmente maíz y para la agricultura de riego jitomate y hortalizas (CONAGUA, 2009). Esta última práctica ha aumentado en los últimos años y está asociada a prácticas de fertilización y uso de pesticidas, así como aumento en la demanda de agua de riego.

En este sentido, se plantea el estudio de la caracterización de los suelos de la cuenca para contar con información estructurada en bases de datos georreferenciadas que permitan entender la relación entre las propiedades de la dinámica de cambio de uso de suelo y los efectos sobre el ecosistema acuático.

Para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, se llevó a cabo un análisis de las unidades geomorfológicas de la cuenca con apoyo de herramientas de información geográfica, levantamiento en campo y trabajo de laboratorio de los suelos asociados a estas unidades. A partir de la caracterización de los suelos asociados a unidades geomorfológicas se llevó a cabo la evaluación de los potenciales de uso de suelos y con base en éstas se abordó la discusión de las unidades que representan mayor amenaza hacia sistema Lagunar de Montebello.

2.1 Justificación

De acuerdo al informe anual de la Red Nacional de Medición de Calidad de Agua (RENAMECA-CONAGUA), en enero del 2003 se reportó mortandad de peces tanto en el cauce del río Grande como en las lagunas Paso del Soldado, Vuelta de Agua y Comunijá, así como un olor fétido a compuestos azufrados y cambios en la coloración del agua de cristalino a amarillo-verdoso y la presencia de natas blancas-amarillentas en las orillas de las lagunas Vuelta de Agua y Comunijá (CONAGUA, 2009). Posteriormente, cada año entre los meses de diciembre a febrero, se ha venido presentando el fenómeno de cambio de coloración de las lagunas extendiéndose a otra denominada Bosque Azul. Se han realizado muestreos aislados en las lagunas para determinar la calidad del agua por diferentes dependencias de gobierno, encontrándose por lo general sulfatos y sulfuros en concentraciones elevadas en comparación con otras lagunas del mismo sistema que no se encuentran afectadas por este fenómeno (SEMARNAT-CONANP, 2007).

Sin embargo, es importante resaltar que dentro del Parque Nacional el sistema lagunar está compuesto por muchas lagunas interconectadas, así, el sistema de lagunas más importante por sus dimensiones, conocido como Tepancoapan es considerado como un sistema de agua continuo que reúne los lagos San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, Encantada, Esmeralda, Bartolo y Peñasquito, los cuales se extienden a lo largo de 13 km. Las lagunas se intercomunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la temporada de lluvias por lo que la contaminación de una laguna genera un alto riesgo potencial de contaminación para todo el sistema lagunar (CONAGUA, 2009).

Se tienen registros de la calidad del agua de los afluentes que alimentan las lagunas. Entre ellos, el Río Grande de Comitán constituye el principal río de la cuenca, el cual recibe aguas residuales de la ciudad de Comitán de Domínguez y las deposita en el sistema lacustre conformando una seria amenaza de contaminación al sistema hidrológico de Montebello (Vásquez y Méndez, 1994).

Asimismo, en los últimos 20 años la cuenca ha presentado un fuerte cambio de uso de suelo año tras año, aumentando el área utilizada para la siembra de jitomate que va acompañado del uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, estos y las sustancias derivadas de su transformación pueden potencialmente filtrarse a las aguas freáticas y subterráneas, así como movilizarse hacia las lagunas a través de los escurrimientos superficiales. Adicionalmente, los contaminantes químicos tienen efectos sobre la fauna del suelo y los procesos de descomposición natural de éste.

En particular el uso de detergentes puede afectar las condiciones limnológicas de los cuerpos de agua (CONAGUA, 2009).

Sin embargo, a la fecha no se ha podido identificar cual es la fuente de aporte de los compuestos que hacen que el sistema de lagunas mencionadas cambie sus características físicas y químicas (CONAGUA, 2009).

Por lo anterior, se considera de suma importancia un análisis con enfoque ecosistémico de la cuenca del Río Grande de Comitán para establecer el estado del sistema lacustre y entender la dinámica de los diversos procesos físicos y químicos que lo conforman. Dentro de este enfoque ecosistémico, el suelo representa uno de los muchos compartimentos que aporta y filtra material orgánico e inorgánico a la base de la cuenca y cuya dinámica se asocia a cambios en el sistema como es el uso del suelo.

Por lo tanto, la caracterización de los suelos y el conocimiento de su distribución en el paisaje resultan fundamentales para entender el transporte de material a la base de la cuenca, así como el impacto que puedan generar las actividades agrícolas y el uso de agroquímicos que potencialmente puedan filtrarse a las aguas freáticas y subterráneas (SEMARNAT-CONANP, 2007).

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Evaluar el potencial de amortiguamiento de los suelos de la cuenca de Comitán, Chiapas ante el riesgo de contaminación del sistema lagunar de Montebello, a partir de la caracterización edafocológica de la zona de estudio.

3.2 Objetivos Particulares:

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello para establecer unidades de suelo asociadas a patrones de distribución geomorfológica.
- Entender los procesos de formación de suelos dominantes en la región y su relación con la evolución del paisaje kárstico.
- Estimar los potenciales edafocológicos de los suelos y establecer su relación con los riesgos de modificación del sistema lagunar de Montebello.

- Generar información base para la elaboración del mapa de distribución de suelos a escala de la cuenca: 1:50,000.

IV. HIPÓTESIS

Los suelos de la cuenca de Comitán, Montebello, se formaron a partir de materiales carbonatados dando como principal producto un alto contenido de arcilla, esta propiedad limita la infiltración de compuestos solubles, pero favorece la escorrentía superficial y el transporte de material superficial a la base de la cuenca donde desemboca el sistema Lagunar de Montebello, el cambio de uso de suelo y la pérdida de cobertura vegetal incrementan esta condición alterando sus capacidades de resiliencia como son la estabilidad y agregación del suelo favoreciendo así la escorrentía y el transporte de material hacia el sistema lacustre.

V. ANTECEDENTES

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Definición de Cuenca, sus componentes e importancia.

Una cuenca hidrográfica es el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de agua, en un pantano o directamente en el mar (Londoño, 2001).

Sus componentes están definidos por el relieve, es decir, por la altitud y los cambios en la altitud: canales o cursos principales y tributarios, laderas, divisoria de aguas y nivel de base (Cotler, 2004).

De acuerdo al sistema drenaje y su conducción final existen diferentes tipos de cuencas:

Exorreicas o abiertas: cuando las vertientes conducen las aguas a un sistema mayor de drenaje como un gran río, mar o al océano.

Endorreicas o cerradas: desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial al mar.

Arreicas: las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje.

Criptorréicas: cuando sus redes de drenaje superficial no tienen un sistema organizado o aparente y corren como ríos subterráneos (caso de zonas kársticas) (Ordoñez, 2011; Faustino y García, s/f).

Por otro lado, las cuencas hidrológicas incluyen toda el área hidrogeológica subterránea que abarca un manto acuífero. Por lo tanto una cuenca hidrológica puede incluir a varias cuencas hidrográficas ya que cuando el relieve y fisiografía, tienen una forma y simetría diferente a la configuración geológica de la cuenca, se puede decir que existe una cuenca subterránea, que cambia la dirección del flujo subsuperficial para alimentar a otra cuenca hidrográfica. Ésta configuración es muy común en las cuencas ubicadas en terrenos kársticos (Jiménez, 2005).

La cuenca, sea en forma independiente o interconectada con otras, es la unidad territorial más aceptada para la gestión integrada de los recursos (Dourojeanni *et al.*, 2002) ya que en la cuenca están contenidos los recursos naturales básicos para múltiples actividades humanas, como: agua, suelo, vegetación y fauna. Todos ellos mantienen una continua y particular interacción con los aprovechamientos y desarrollos productivos del hombre (Londoño, 2001).

La cuenca hidrográfica como sistema está integrado por los subsistemas siguientes:

Biológico, que integran esencialmente la flora y fauna, así como los elementos cultivados por el hombre.

Físico, integrado por el suelo, subsuelo, geología, recursos hídricos y clima (temperatura, radiación, evaporación entre otros).

Económico, integrado por todas las actividades productivas que realiza el hombre, en agricultura, recursos naturales, ganadería, industria, servicios (camino, carreteras, energía, asentamientos y ciudades).

Social, integrado por los elementos demográficos, institucionales, tenencia de la tierra, salud, educación, vivienda, culturales, organizacionales, políticos y legal (Ordoñez, 2011).

La utilización de los recursos fundamentales agua, suelo y vegetación dentro de la cuenca hidrográfica no puede considerarse en forma aislada e independiente, ya que la alteración en la cantidad o calidad de uno de ellos afectará a los demás, tarde o temprano, de manera directa o indirecta (Ordoñez, 2011).

Por esta razón se considera que las cuencas hídricas constituyen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos suelo, agua y vegetación.

En ese sentido, es necesario tener un conocimiento básico de las cuencas hidrológicas, como unidad mínima de gestión, para poder hacer una caracterización y diagnóstico de los recursos, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección y que sirva de base a los usuarios de los recursos y planificadores, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros, así como establecer las posibilidades y limitaciones de sus recursos naturales pero también para identificar los problemas presentes y potenciales (Ordoñez, 2011).

5.1.2 Que es una caracterización de suelos

El proceso de caracterizar un suelo consiste en describir y cuantificar, hasta donde sea posible, sus características (rasgos que pueden medirse o estimarse), de modo que se puedan establecer sus propiedades (rasgos derivados de la interacción de características) y deducir sus cualidades (comportamientos definidos por la interacción de características y propiedades); estos elementos pueden ser evaluados en el campo, mediante el estudio del perfil del suelo o en el laboratorio, mediante análisis más detallados (Jaramillo, 2002).

A partir de la descripción detallada del perfil de suelo se puede denominar a cada uno de los horizontes y reconocer los procesos pedogenéticos que llevaron a su actual expresión morfológica como también clasificar el suelo (con datos de laboratorio) y paralelamente definir las características ecológicas del perfil completo para a partir de ellas hacer la interpretación ecológica del sitio. Las interpretaciones pedogenéticas y ecológicas del sitio son el fundamento para la posterior evaluación del uso y manejo del suelo (Siebe *et al.*, 2006).

5.1.3 Definición de suelo

El suelo es un sistema abierto, tridimensional, dinámico, complejo y activo en el espacio y tiempo, resultado de la interacción de diversos sistemas: litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera a través del tiempo (Zapata, 2006).

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés), lo define como la capa superficial de material mineral y orgánico no consolidado que presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a

la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó (Summer, 2000).

Por lo tanto, el suelo es un cuerpo natural producto de la interacción de factores formadores de suelo, los cuales a su vez determinan la dirección e intensidad de los procesos pedogenéticos (intemperismo y neoformación de minerales, descomposición y humificación de la materia orgánica, formación de estructura, translocación de materia, entre otros). La relación de los factores formadores con las propiedades del suelo se puede expresar mediante la siguiente ecuación propuesta por Jenny (1941):

$$S = f (Cl, b, r, p, t)$$

Dónde: S = cualquier propiedad del suelo (contenido de arcilla, por ejemplo)

F = función dependiente

Cl = Clima

r = relieve (topografía)

b = biósfera (vegetación, organismos, hombre)

p = material parental

t = tiempo

Es necesario saber qué influencia tienen estos factores para entender por qué son diferentes los suelos, por qué varía su productividad y, en última instancia, como pueden usarse adecuadamente (Foth, 1980).

5.1.4 Influencia de los factores de formación en las características del suelo

a. Material parental

El contenido mineral de los materiales de origen es de particular importancia para determinar las características de los suelos y sus niveles de fertilidad.

Los materiales de origen pueden dividirse en cuatro categorías:

- Rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- Formación de rocas blandas (depósitos glaciares, eólicos y formados en el agua).
- Depósitos actuales (aluviones, coluviones).
- Materiales orgánicos (Cepeda, 1991).

Las propiedades del material de origen que influyen sobre el desarrollo de las propiedades del suelo son la textura, composición mineralógica, dureza, densidad, raya y grado de estratificación (Foth, 1980).

b. Relieve (topografía)

La topografía modifica el desarrollo de un suelo principalmente en las siguientes formas:

- Afecta la cantidad de precipitación absorbida y retenida en el suelo, e influye por lo tanto en las relaciones de humedad.
- Afecta la velocidad de pérdida del suelo por erosión.
- Determina el movimiento de materiales en suspensión y en solución de un área a otra.
- Influye en el grado de desarrollo del suelo según se localice en zonas de acumulación o aporte de material de acuerdo con la forma del terreno (Foth, 1980).

c. Clima

La precipitación y la temperatura influyen en la evolución de los suelos y su distribución en el paisaje. La primera influye directamente en los procesos de intemperismo físico y químico, dado que es el vector de movilidad de compuestos disueltos y favorece el reordenamiento de nuevos compuestos. Además de que afecta la velocidad de las reacciones de intemperismo físico-químico, la temperatura influye en la descomposición de la materia orgánica y en la actividad de la biota del suelo, determina el tipo y cantidad de vegetación presente en una zona y en consecuencia, también influye sobre la cantidad y tipo de materia orgánica producida. Por otro lado la intensidad y frecuencia de la precipitación determinan la naturaleza y distribución de los suelos en el paisaje (Cepeda, 1991; Boul, 2011).

d. Biósfera

Afecta en gran medida las relaciones agua-suelo, produce moléculas orgánicas que reaccionan con las partículas del suelo produciendo complejos órgano-minerales que contribuyen a la capacidad de intercambio catiónico, rige la actividad química del nitrógeno y carbono y otros procesos de oxidación-reducción, incrementa la concentración de dióxido de carbono del aire y de la solución del suelo. La cubierta vegetal reduce los procesos de degradación del suelo, favorece su estructura y la acumulación de nutrientes que contrarrestan los procesos de lixiviación protegiendo al suelo contra los agentes de la erosión (Bonh, 1993; Boul, 2011).

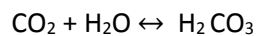
5.1.5 Procesos de disolución en paisajes kársticos

Podemos definir un karst como una región de la corteza terrestre en la que los procesos erosivos de disolución predominan sobre la erosión mecánica. El karst es el conjunto de formas derivadas de la acción del agua sobre materiales solubles. Estas morfologías afectan tanto al exterior como al interior de las rocas, generándose la formación de cavidades (Ortega, 2000). Lo esencial de la karstificación reside en que se logre establecer una red de drenaje subterráneo que a la vez ocasione la desaparición más o menos completa del drenaje superficial (Schaetzl y Anderson, 2005).

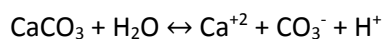
Las formas típicas de disolución, tanto en el exterior como en el interior, se producen de manera mayoritaria en rocas carbonatadas (calizas y dolomías). Las primeras están formadas por un componente fundamental, la calcita, CaCO_3 , a la que acompañan toda una serie de impurezas clásticas que terminan siendo un componente residual, el cual está dominado por arcillas, aunque también se encuentran pequeños granos de diversos minerales, como son cuarzo y feldespatos, limo, óxidos de hierro, etc. En el caso de la roca dolomía, será el mineral dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ su principal componente, quedando acompañada de impurezas similares a las de la caliza (Ortega, 2000; Schaetzl y Anderson, 2005).

El carbonato cálcico (CaCO_3) en todas sus formas y la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) son prácticamente insolubles en agua pura, sin embargo ciertos compuestos presentes en el agua alteran considerablemente estos valores. En la naturaleza el compuesto que condiciona principalmente la disolución es el anhídrido carbónico que disuelto en agua reacciona dando ácido carbónico el cual produce la disolución de la calcita según la siguiente cadena de reacciones y como se muestra en la *Figura 1*:

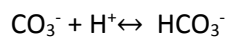
Durante la precipitación el agua de lluvia disuelve el CO_2 de la atmósfera. El dióxido de carbono físicamente disuelto reacciona con el agua para formar ácido carbónico:



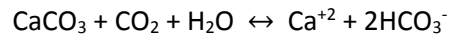
Cuando el agua entra en contacto con la roca carbonatada, los iones son liberados de su estructura cristalina:



El CO_2 se asocia con el H para generar bicarbonato:



De esta manera se define la fórmula de la disociación de las calizas:



Calcita sólida

Calcita disuelta

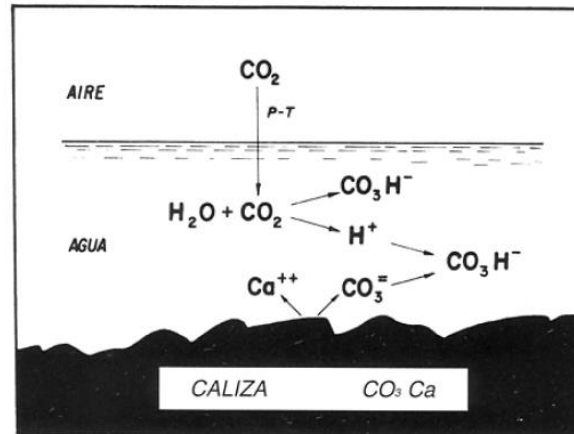


Figura 1. Síntesis de las reacciones de disolución del carbonato cálcico en agua. (Fernández *et al.*, 1995).

La variación de la solubilidad del CO₂ con la presión sigue la ley de Henry. Esto indica que la solubilidad del dióxido de carbono aumenta con una disminución de la temperatura y un aumento de la presión. Así que el dióxido de carbono es más soluble a temperaturas más bajas que en las altas (Huddart y Stott, 2010) y cuanto mayor sea la cantidad de CO₂ en el aire (o cuanto mayor sea su presión parcial) más cantidad pasará al agua; en la atmósfera el contenido normal de CO₂ es de 0.033% (o lo que es lo mismo, una presión parcial de 0.0003 atmósferas). Sin embargo, el aire del suelo tiene concentraciones mucho más altas de este gas debido a la descomposición de la materia orgánica, respiración de la fauna del suelo y raíces de las plantas. Así, en las proximidades del suelo vegetal puede alcanzarse valores de hasta 1% (300 veces mayor), y el contenido de CO₂ del agua puede llegar a ser, por consiguiente muy elevado (Fernández *et al.*, 1995; Schaetzl y Anderson, 2005). Otros factores también pueden afectar la solubilidad de carbonatos. La mezcla de dos soluciones saturadas con respecto a la calcita, que, sin embargo, tienen diferentes concentraciones de dióxido de carbono, se traduce en una solución, que a su vez pueden disolver más calcita. Esta forma alternativa de la corrosión se denominada corrosión de mezcla (Kaufmann, 2009).

Los procesos de solución suelen ser reversibles. Cuando se excede el punto de saturación de la solución, se convierte en sobresaturada produciéndose la precipitación de los iones disueltos

(calcita) que tienden a rellenar los conductos kársticos formando estalactitas y estalagmitas (Schaetzl y Anderson, 2005). En el aspecto físico también existe un equilibrio que puede desplazarse en uno u otro sentido: el agua es capaz de erosionar la roca (tanto dentro como fuera del karst) y arrastrar partículas, a veces de tamaño considerable; si su energía disminuye tendrá lugar el depósito de esas partículas (Fernández *et al.*, 1995).

Para que se produzca la karstificación es necesario que la erosión de superficie haya excavado diferencialmente el terreno, formando valles y creando niveles de base locales hacia los cuales puedan comenzar a drenar los terrenos kársticos. Si se cumple esta condición (existencia de un gradiente hidráulico), el agua podrá infiltrarse al interior del karst aprovechando las fisuras y discontinuidades de la roca, encauzándose internamente a favor de fracturas como diaclasas (fracturas paralelas sin desplazamiento de los estratos) y fallas, siguiendo un recorrido que respeta la disposición estructural de la montaña y su tectónica. Así el agua penetra en el interior hasta alcanzar una fractura principal a favor de la cual el caudal hídrico irá aumentando, hasta formar un curso subterráneo. Durante el recorrido, recibirá aportes laterales, hasta constituirse en ríos subterráneos. Por debajo de un cierto nivel (nivel freático) el karst se encuentra inundado, con sus grietas y galerías totalmente saturadas de agua. Por último, estos cauces subterráneos aflorarán al exterior por medio de manantiales y surgencias, siendo el origen de muchos ríos (Galán, 1991; Ugalde, 2009).

En la *Figura 2* se observa el proceso de formación del paisaje kárstico, el cual se caracteriza por el desarrollo de morfologías externas como la formación de cuevas, simas, valles cerrados, dolinas (grandes depresiones circulares semejantes a cráteres), lapiazes (extensiones de roca desnuda muy agrietada), poljes (depresiones de gran extensión de fondo plano a menudo colmatado por sedimentos no consolidados, desarrollados en las proximidades del nivel freático) entre otros. Este dispositivo geomorfológico es el resultado o la expresión de la resistencia de las rocas a los procesos erosivos (meteorización y transporte). Los macizos calcáreos destacan como formas positivas en el relieve por ser rocas duras, más resistentes a la erosión que otros terrenos contiguos. Esta “resistencia” a la erosión es un proceso diferencial, es decir, que la erosión trabaja a distinta velocidad en rocas de distinta dureza, excavando con mayor facilidad las más blandas. El resultado es la configuración de un relieve en el cual se crean diferencias de potencial (gradiente hidráulico) en el macizo karstificable. Esto permite que el agua pueda comenzar a infiltrarse y a

drenar subterráneamente hacia los niveles de base locales así creados (Galán, 1991; Ugalde, 2009).

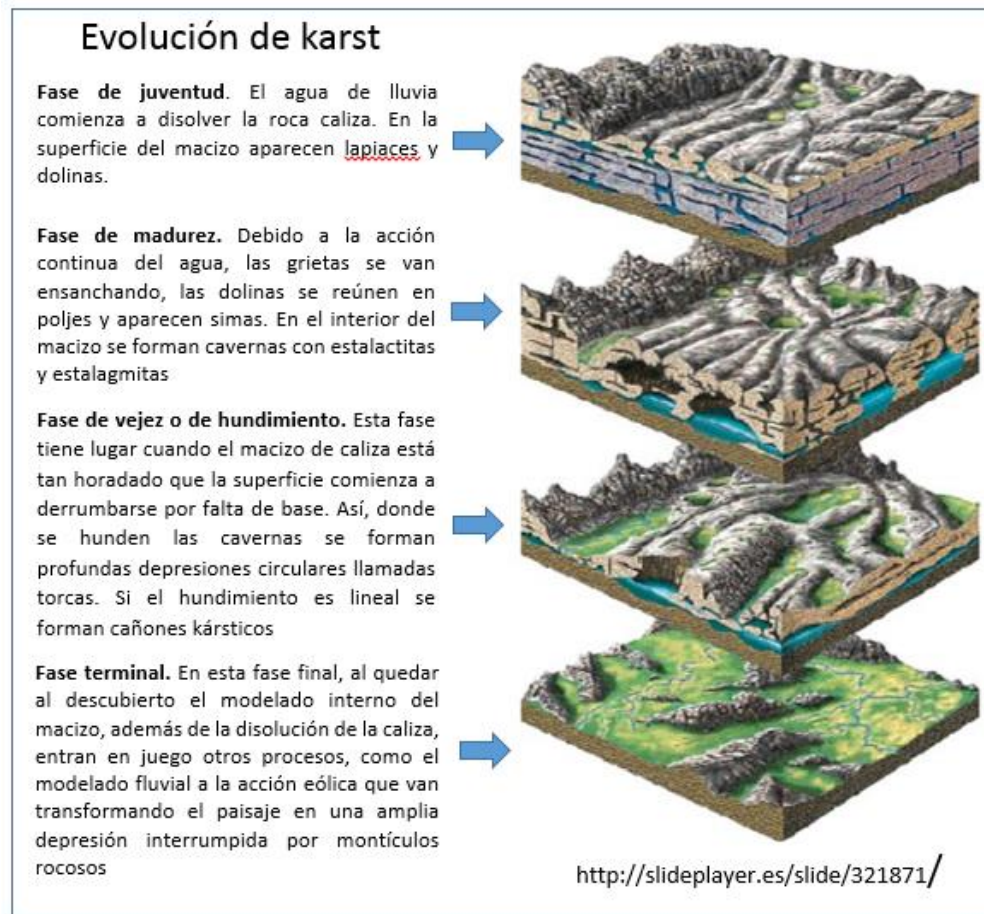


Figura 2. Fases de evolución del paisaje kárstico.

5.1.6 Importancia ecológica del suelo de acuerdo a sus funciones.

El suelo cumple con importantes funciones en los ecosistemas: a) da soporte a las plantas y las abastece con agua, oxígeno y nutrientes; b) es hábitat de numerosos organismos, desde especies de la microflora y fauna, hasta especies de mesofauna (lombrices, hormigas, ácaros, colémbolos, entre otros) y macrofauna (como mamíferos fosoriales, aves y reptiles); c) funge como regulador del ciclo hidrológico, dado que permite la infiltración del agua pluvial y retiene una parte de la misma contra la fuerza de gravedad en el espacio radical de las plantas, mientras que filtra la otra parte para destinarla a la recarga del acuífero; d) los procesos bioquímicos que ocurren en el suelo transforman la hojarasca y los cadáveres de animales en compuestos más simples, con lo que se reciclan los nutrientes que los componen y e) el suelo da soporte físico a

la infraestructura y sirve como depósito de desechos producto de las diversas actividades humanas (Siebe *et al.*, 2003). Finalmente, dentro de los servicios de regulación está la capacidad de amortiguamiento al filtrar, desactivar o retener compuestos potencialmente tóxicos que pudieran afectar las redes tróficas de los ecosistemas terrestres y acuáticos o llegar a las aguas subterráneas (MEA, 2005).

Las funciones potenciales pueden relacionarse directamente con variables físicas o químicas que le permiten llevar a cabo dichas funciones. Desde el punto de vista de la evaluación de calidad de sitio (Arp y Krause, 2006), proponen el uso de variables que permiten evaluar la capacidad de soporte como medio para el crecimiento de la plantas (*Cuadro 1*).

En un sentido más amplio, Siebe *et al.*, (1996), propone la evaluación edafocológica como un método para evaluar el suelo como un cuerpo multifuncional, basado igualmente en las propiedades físicas y químicas del suelo, a partir del cálculo de variables como profundidad de desarrollo, capacidad de retención de humedad que representa el almacenaje de agua logrado después de la lluvia cuando el agua gravitacional abandona el suelo; cantidad de humus almacenado, reserva de nitrógeno, disponibilidad de fósforo, entre otros.

El análisis interpretativo de las funciones ecológicas del suelo es fundamental para entender el buen uso y manejo, pero también para entender el impacto que puede llevar a cabo las actividades antrópicas en sistemas asociados, como es el caso de los sistemas acuáticos superficiales.

Cuadro 1. Propiedades edáficas que afectan la calidad de sitio (Arp y Krause 2006; tomado de Peña, 2012.

Propiedad del suelo	Relación con la calidad de sitio	Condiciones óptimas
Composición mineralógica del material parental	Afecta la disponibilidad de K, Ca y Mg.	Abundancia de minerales máficos
pH	Afecta la disponibilidad de nutrimentos, actividad microbiana, abundancia y diversidad de organismos, potencial redox.	5-7
Cantidad de materia orgánica	Fuente de N y P, promueve la estructuración, influye en el pH del suelo.	Presencia de mantillo y acumulación en horizontes A y B. Suelos fértiles $\geq 4\%$

Cuadro 1. Propiedades edáficas que afectan la calidad de sitio (Arp y Krause 2006; tomado de Peña, 2012. Continuación.

Propiedad del suelo	Relación con la calidad de sitio	Condiciones óptimas
Textura	Afecta el drenaje, Almacenamiento de agua y nutrimentos, grado de oxigenación	Franco arenoso, franco y franco limoso
Estructura	Promueve la aireación, contrarresta la compactación, confiere resiliencia y firmeza del suelo.	Granular y sub angular en bloques.
Consistencia	Afecta la firmeza del suelo.	Friable.
Drenaje	Determina el régimen de humedad del suelo y el estatus de aireación.	Bien y moderadamente bien drenado.
Profundidad del horizonte A	Localización de alta actividad biológica y disponibilidad de nutrimentos.	> 10 cm
Contenido de piedras	Limita desarrollo de las raíces en el suelo.	< 15%
Profundidad fisiológica	Delimita el espacio radical, mejora la humedad en suelos con texturas gruesas.	> 80 cm
Profundidad de manchas y motas	Revela la presencia de agua en exceso y la falta de aireación.	> 75 cm
Espesor del horizonte B	Arcilla y enriquecimiento de nutrimentos.	> 30 cm

VI. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La subcuenca Lagunas de Montebello, se ubica en la cuenca del río Usumacinta y abarca parte de los territorios de los municipios de Comitán, La Independencia y La Trinitaria, así como una pequeña porción del municipio de Las Margaritas y una localidad de la República de Guatemala (*Figura 3*). La cuenca se conoce como cuenca del río Grande, subcuenca de Comitán o cuenca Lagos/Lagunas de Montebello (CONAGUA, 2006).

Tiene una superficie de 76,205.854 ha y geográficamente se ubica entre las coordenadas 90° 10' 7.6" y 91° 39' 41.2" de longitud Oeste y 16° 04' 17.1" y 16° 25' 30.8" de latitud Norte (CONAGUA, 2009).

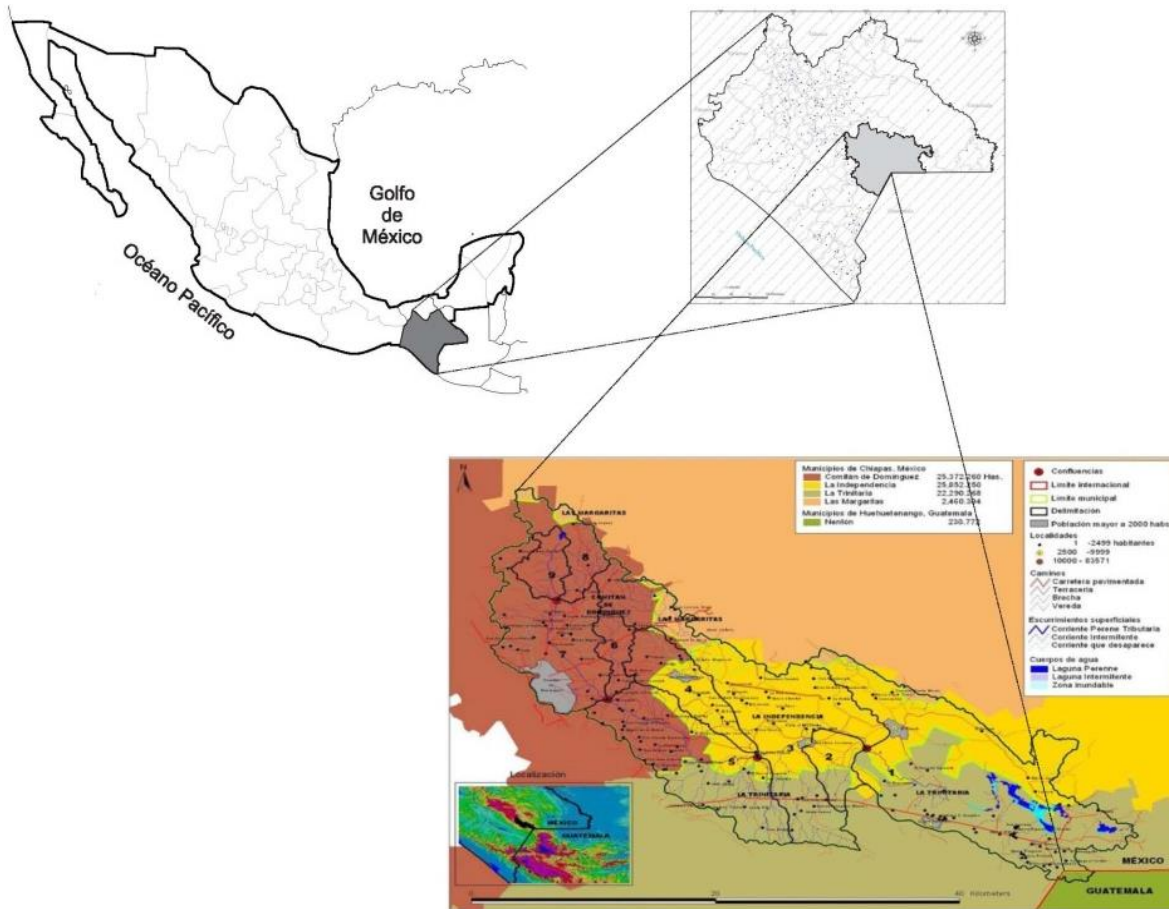


Figura 3. Esquema de ubicación de la zona de estudio en la cuenca del Río Grande, Lagunas de Montebello, Chiapas.

6.1 Geología

De acuerdo a INEGI (1985), el área de la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello está constituida principalmente por calizas cretácicas que representan 62% del total del área, el resto está compuesto por asociaciones de limolitas y areniscas del Terciario Superior a Cuaternario (19%) y aluviones del Cuaternario (19%) (Figura 4). Estructuralmente el área está afectada por varias fallas ubicadas principalmente en los límites norte y sur de la parte central de la cuenca, así como en la zona del nacimiento del río Grande. Además se indica una intensa fracturación de las calizas en la zona del Parque Nacional Lagunas de Montebello, cuya evolución geomorfológica ha llevado al desarrollo de un paisaje kárstico (Pérez *et al.*, 2007).

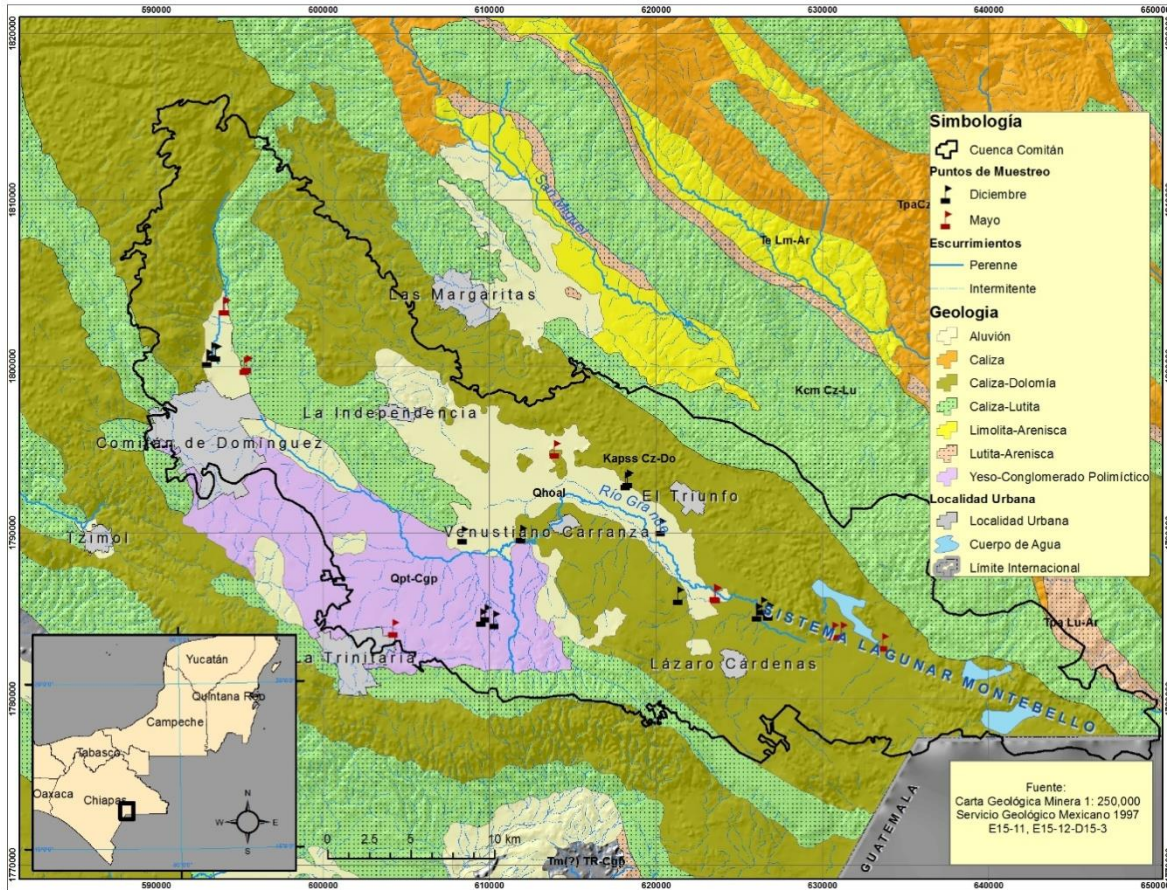


Figura 4. Geología de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello. Tomado de Servicio Geológico Mexicano, 1997.

Durán (2013) identificó cinco unidades litológicas (aluvión, caliza, caliza-dolomía, lutita arenisca, caliza-lutita) a partir de la carta geológica de INEGI escala 1:250,000 para el Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM). A partir de estas unidades y otros atributos generó diversas capas temáticas que en conjunto permitió conformar un mapa de unidades morfogénicas del PNLM, en el cual identificó las siguientes unidades: laderas montañosas del Paleógeno, laderas montañosas del Cretácico, lomeríos del Paleógeno, lomeríos del Cretácico, planicies aluviales, piedemonte y formas kársticas: depresiones (dolina, úvala, polje) y fluvio kársticos (valle fluvial, valle ciego, valle seco, valle tectónico).

El área que cubre la cuenca es de origen sedimentario por lo que afloran rocas calizas bien estratificadas y dispuestas en forma de bancos, aunque también en capas y lajas (INEGI, 1985; Vázquez y Méndez, 1994). Las calizas ligeramente plegadas se caracterizan por la karstificación de las rocas, sobre todo a lo largo de zonas lábiles (fracturas, poros, impurezas, etcétera). El proceso

de Karstificación está acompañado de una acumulación relativa de materiales residuales en las calizas, gran parte de este material es arcilloso y junto con un porcentaje de arenas, constituye otras unidades litológicas que existen en la cuenca distribuidas a menor escala, como depósitos lacustres y depósitos fluviales (SEMARNAT-CONANP, 2007).

La mayor actividad morfológica de la karstificación se presenta subterráneamente, este proceso se refleja en el macro y meso relieve en la superficie. La karstificación resulta en la formación y ampliación de complejos sistemas subterráneos de cuevas y canales interconectados que constituyen almacenes y conductos temporales o permanentes del manto freático o kárstico. Al encontrarse cerca de la superficie, la continua disolución de las calizas resulta, eventualmente, en una labilización de los techos calcáreos de estas concavidades y su consecuente derrumbe, con formación de depresiones redondas o alargadas que poco a poco se rellenan con sedimentos finos del suelo alrededor y el formado *in situ* (SEMARNAT-CONANP, 2007).

6.2 Clima

El clima es uno de los factores principales en la formación o modificación de la karstificación y sus formas resultantes. Los factores climáticos determinantes de las características del karst son: la humedad, la circulación del aire y la temperatura (Eslava *et al.*, 2000).

De acuerdo con el Sistema de Clasificación Climática de Köppen (1948), modificado por García (2004), los climas predominantes dentro de la cuenca son: clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw) en el municipio de Comitán, mientras que en los municipios La Trinitaria, La Independencia y Las Margaritas el clima dominante es semicálido subhúmedo con lluvias en verano (ACw). La temperatura y la precipitación varían de acuerdo a su altitud y a los diferentes periodos en el año.

En general en el periodo de mayo a octubre, la temperatura máxima es homogénea a nivel de la cuenca y va de 24 a 27°C y la mínima en ese mismo periodo es heterogénea ya que las temperaturas más bajas (9°C a 12°C) se encuentran en las partes más altas y montañosas de la cuenca y las temperaturas aumentan hasta 18°C en las partes medias y bajas de la cuenca. En el periodo de noviembre a abril, los niveles más altos de temperatura van de 21 a 24°C y los más bajos de 9 a 12°C (CONAGUA, 2009).

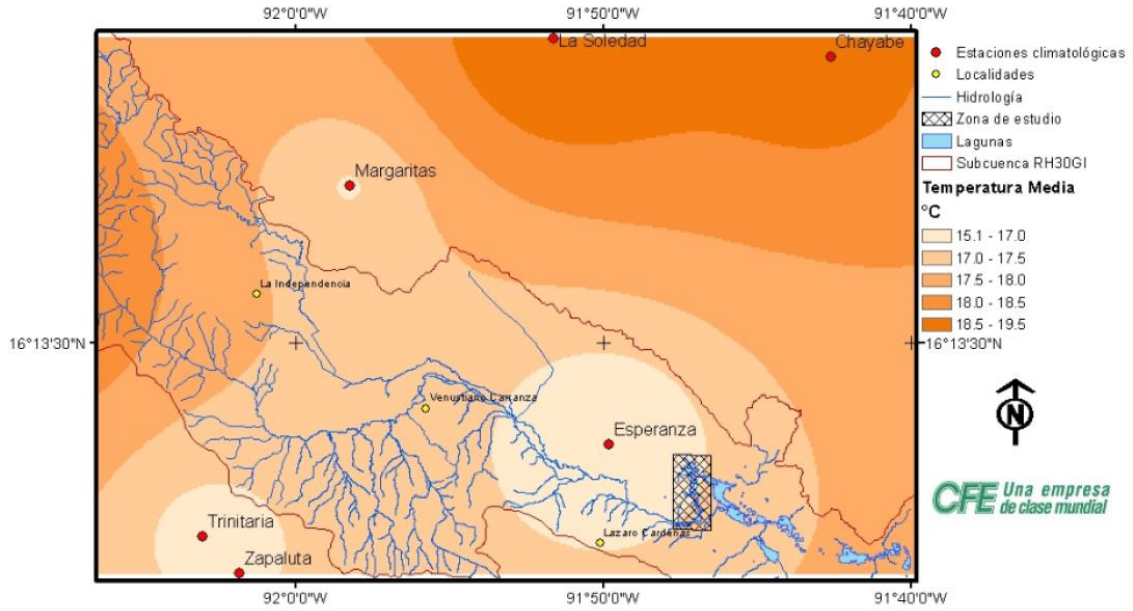


Figura 5. Temperatura media de estaciones meteorológicas analizadas por CFE. En general se observa que la temperatura media disminuye de norte a sur.

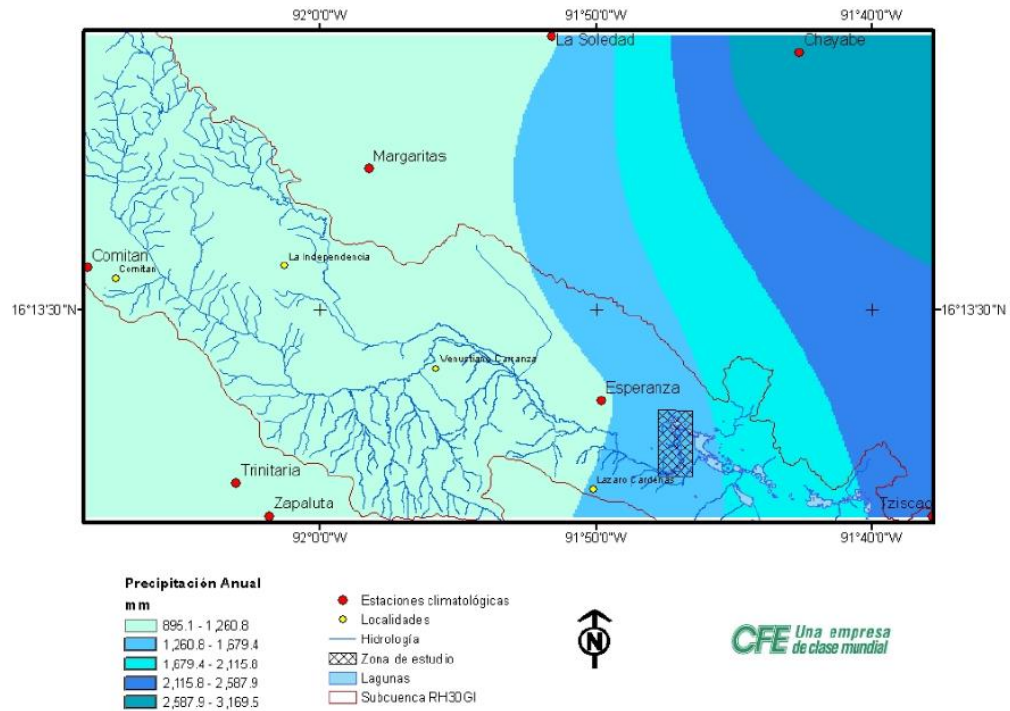


Figura 6. Precipitación media de las estaciones climatológicas analizadas por CFE. En general se observa que los valores de lluvia media crecen desde Comitán a las Lagunas de Montebello.

La precipitación en el periodo de mayo a octubre varía de 900 a 1,700 mm, mientras que en el periodo de noviembre a abril la precipitación va de 100 a 500 mm. Los valores máximos de precipitación se alcanzan en la zona del Parque Nacional Lagunas de Montebello. En la cuenca río Grande Lagunas de Montebello, la precipitación es de 1,372.8 mm según la estimación del 2008, ello comparado con el promedio de precipitación a nivel nacional que es de 900.7 mm, por lo cual es 52.4% más alto (CONAGUA, 2009).

En el 2012 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó un análisis de las estaciones meteorológicas que afectan el área de Montebello, Chiapas para detectar el comportamiento de variables climatológicas. En este estudio se evaluaron los parámetros a nivel mensual y anual de temperatura y precipitación medias. Para el caso de la temperatura observaron que las temperaturas medias no presentan cambios significativos entre sí, mientras que la temperatura media anual del conjunto de estaciones es de 17.5°C y en promedio la época más calurosa del año se registra entre los meses de mayo a octubre. La *Figura 5* contiene la información total del conjunto de estaciones analizadas en tal estudio para comprender la distribución espacial de la temperatura media. Por otro lado la precipitación media anual del conjunto de estaciones reportado en dicho estudio es de 1,482.6 mm, sin embargo se puede observar en la *Figura 6* que no hay una distribución uniforme de dicha lluvia pues los valores van desde un mínimo de 895.1 mm de lluvia anual hasta un valor máximo de 2,587.9 mm. El periodo de lluvias reportado es de mayo a octubre; sin embargo, los meses más lluviosos son de junio a septiembre siendo este último el mes con los máximos valores de lluvia, por lo cual las lluvias principales son durante el verano.

6.3 Unidades de Suelos

Según el mapa de INEGI (2007b) escala 1:250,000 y el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO-ISRIC-ISSS, 1988), existen dentro del territorio de la cuenca del río Grande-Lagunas de Montebello las siguientes unidades de suelo:

Leptosol. Se caracterizan por su escasa profundidad (10 centímetros) y pedregosidad, lo que los hace más vulnerables a los procesos erosivos.

En particular la unidad **Leptosol réndzico** ocupa un área importante. Generalmente son suelos arcillosos y poco profundos, rocosos y con periodo de humedad sujeto a la época de lluvias. También suelen ser el resultado de los procesos de erosión. Se caracterizan por tener una capa

superficial rica en materia orgánica, muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Si se desmontan se pueden usar en la ganadería con rendimientos bajos a moderados pero con gran peligro de erosión en laderas y lomas. El uso forestal de estos suelos depende de la vegetación que presenten. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2007a; CONAGUA, 2009).

Feozem. Son suelos medianamente profundos, con alta fertilidad al presentar una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes por lo que tienen buena aireación y son aptos para la agricultura. Se desarrollan sobre todo en climas templados y húmedos. El uso óptimo de estos suelos depende en muchas ocasiones de otras características del terreno y sobre todo de la disponibilidad de agua para riego. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se pueden utilizar para la agricultura de riego o temporal, con rendimientos altos. Los Feozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad, sin embargo, pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables (INEGI, 2007a; CONAGUA, 2009).

Luvisoles. Se caracterizan por ser inundables, con una marcada diferenciación textural dentro del perfil del suelo, tienen un horizonte de eluviación albeo sobre un horizonte argílico, son suelos con una alta capacidad de intercambio catiónico. Estos suelos son aptos para el cultivo de pastos, sin embargo, debe tenerse en cuenta que son altamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2007a; CONAGUA, 2009).

Vertisoles. Suelen encontrarse en climas estacionalmente húmedos o sujetos a sequías erráticas y a inundación. Son suelos ricos en arcilla expansiva tipo montmorillonita, presentan caras de deslizamiento “slickenside” por la alta cohesión y plasticidad del material arcilloso. Los usos agronómicos de los vertisoles varían mucho según el clima. El elevado contenido en arcillas y la baja permeabilidad asociadas a estos suelos cuando están húmedos, los hace convenientes para cultivos que requieren buena retención del agua superficial. Estos suelos son muy productivos, con un elevado potencial agrícola, pero que requieren un manejo especial debido a que en época seca se agrietan y se endurecen mucho y, con humedad, se tornan muy pegajosos (INEGI, 2007a; CONAGUA, 2009).

Fluvisoles. Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta, presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la

corriente y crecidas del agua en los ríos. Sus usos y rendimientos dependen de la subunidad de Fluvisol que se trate. Los más apreciados en la agricultura son los Fluvisoles mólicos y calcáricos por tener mayor disponibilidad de nutrientes a las plantas.

Planosoles. Suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm. Su vegetación natural es de pastizal o matorral. Se caracterizan por presentar debajo de la capa más superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas tanto que lo cubren como las capas que la subyacen. Debajo de esta capa se presenta un subsuelo muy arcilloso, o bien, roca o tepetate, todos impermeables. Su rendimiento agrícola depende de la subunidad de Planosol que se trate. Son muy susceptibles a la erosión, sobre todo en las capas superficiales.

6.4 Vegetación y uso de suelo

Los tipos de vegetación nativa establecidos en la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello son de bosque mixto pino-encino, pino-encino-liquidámbar, así como bosques de pino y bosques de encino. También se observan bosques fragmentados de pinares, encinares y en su mayor parte vegetación secundaria con elementos del género acacia y matorrales con diversas especies de cactáceas (Pérez *et al.*, 2007).

El territorio presenta problemas de deforestación que se deben no sólo a la alteración de la vegetación natural originada por el cambio de los usos de suelo para propósitos agropecuarios, sino también por la extracción excesiva de madera para uso industrial, construcción y leña (SAGARPA – FIRCO, 2007).

El uso de suelo predominante en la cuenca es agrícola, siendo el cultivo de maíz asociado con frijol y calabaza el principal sistema agroproductivo ya que ocupa aproximadamente dos tercios de la superficie sembrada anualmente (SAGARPA-FIRCO, 2007). Si bien existen áreas en las que se cultivan productos como maíz, tomate y otras hortalizas con riego, la agricultura en la cuenca es predominantemente de temporal. En los últimos años, el cultivo de jitomate se ha ido convirtiendo en la actividad de mayor importancia para algunas localidades de la cuenca, como son El Triunfo, La Esperanza y El Porvenir Agrarista (CONAGUA, 2009).

Los principales problemas ambientales asociados a la agricultura son: a) el uso de agroquímicos que contaminan los cuerpos de agua b) la sustitución de los bosques por áreas de cultivo

destinadas a la siembra de maíz, frijol, jitomate, calabaza y café. Este además se hace bajo el sistema roza y quema, lo cual también ocasiona incendios forestales (SEMARNAT-CONANP, 2007).

Dentro del Parque Nacional el uso de suelo está destinado predominantemente a la conservación de bosques de pino, pino-encino y pino-encino-liquidámbar, sin embargo, en los últimos 20 años, se redujeron los bosques en 51.62%, las selvas en 22.65%, en tanto que la actividad agrícola se incrementó en 23.94% (SEMARNAT-CONANP, 2007).

6.5 Importancia ecológica de la zona de estudio

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad identifica la cuenca de río Grande de Comitán-Lagunas de Montebello como una región hidrológica prioritaria de alta riqueza biológica y la denomina con clave 88-Comitán-Lagunas de Montebello (Arriaga *et al.*, 1998). Dentro de esta Cuenca se encuentra el **Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM)**, localizado en la parte sur sureste del Estado de Chiapas, en los límites con la República de Guatemala. El PNLM posee una extensión de 6,463 ha, comprendidas dentro de los municipios de La Trinitaria y La Independencia (DOF, 1959).

La belleza escénica de este Parque se enmarca en un paisaje kárstico de lomeríos con una multitud de lagunas de diversos tamaños y tonalidades. Se ubica en la región terrestre prioritaria 137-El Mormón-Montebello por su función como Corredor Biológico. Además constituye un área de importancia para la conservación de aves (AICA SE-19-Categoría G1 *Dendroica chrysoparia*). Obtuvo el reconocimiento como sitio RAMSAR, número 1325, el 27 de noviembre de 2003. Esto significa que el Parque se encuentra en la lista de humedales de importancia internacional según los criterios establecidos por la Convención sobre los Humedales, que es el único tratado ambiental mundial acerca de un ecosistema en particular y que entró en vigor a finales de 1975 (Del Coro y Márquez, 2000).

Entre los valores ecológicos de Montebello están sus funciones como vaso de captación de agua, regulador climático regional, corredor biológico, mantenimiento de recursos hídricos, conservación de suelos, preservación de valores paisajísticos, producción de recursos forestales maderables y no maderables y la estructuración de hábitat para una amplia diversidad de flora y fauna que incluye algunas especies protegidas (SEMARNAT-CONANP, 2007).

VII. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico utilizado en este trabajo está basado en estrategias sintéticas para llevar a cabo un levantamiento de suelo (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

En este enfoque se llevaron a cabo cuatro etapas de desarrollo del trabajo, mismas que se describen en los siguientes apartados:

7.1 Recopilación de Información

Se utilizó información cartográfica impresa y digital (Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 y conjunto topográfico: E15-D73, E15-D74 E15-D83, E15-D84 de INEGI, escala 1:250,000) en formatos vectorial y raster de la Cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. En el marco del proyecto, con apoyo de imágenes satelitales SPOT 5 (SE 15/diciembre/2010; NW 04/enero/2011; SW 04/enero/2011) se elaboró el mapa de unidades geomorfológicas y con el modelo digital de elevación de terrenos se definieron las unidades de paisaje. Finalmente, siguiendo una metodología basada en la establecida por Hammond (1964), se realizó una clasificación automática supervisada de las formas del terreno, y junto con mapas auxiliares y conocimiento de especialistas en geomorfología se definieron las unidades geomorfológicas. Hammond (1964), propone un método de clasificación de grandes unidades del relieve basado en criterios eminentemente cuantitativos que pueden ser replicados fácilmente utilizando tres parámetros: pendiente, relieve y tipo de perfil.

7.2 Recopilación de información en campo: muestreo

Las unidades geomorfológicas fueron corroboradas en campo y representaron el primer criterio para el muestreo. Ya identificadas las unidades de paisaje, en cada una de ellas se realizaron transectos dentro de los que, en función de la facilidad de acceso al lugar, se hicieron 21 barrenaciones para identificar similitudes edáficas y establecer los puntos de muestreo y su descripción del perfil. Con lo anterior, se obtuvieron un total de 19 perfiles.

Con base en las unidades geomorfológicas, se excavaron perfiles de suelo hasta encontrar material parental, o en su defecto, hasta 1.2 m para caracterizar sus propiedades.

En cada perfil se realizó la descripción detallada con base en Siebe *et al.*, (2006) cuyo fundamento consiste en la apreciación de las características morfológicas de los suelos en un paisaje determinado y a partir de ellas derivar los procesos pedogenéticos ocurridos. Para ello se evaluó

en cada horizonte pedogenético la profundidad, textura (prueba al tacto), porcentaje de pedregosidad, color en húmedo por medio de tablas Munsell, presencia de CaCO_3 observando la efervescencia al adicionar HCl al 10%, humedad del suelo, estructura (tipo, tamaño, grado), estabilidad de agregados, abundancia, tamaño y distribución de poros, densidad de raíces, tipo de horizonte, así como rasgos pedológicos como presencia de cutanes, nódulos o concreciones, manchas y motas (abundancia, color, límite, tamaño, forma, forma y localización) y/o presencia de slickensides. De igual manera se hizo un reconocimiento de las características del sitio (localidad, coordenadas geográficas (UTM), altitud, uso de suelo/vegetación, pendiente, evidencia de erosión, material parental, forma del terreno y paisaje). Finalmente se tomaron muestras perturbadas por cada horizonte genético para conocer sus propiedades químicas en el trabajo de laboratorio. Para la densidad aparente y contenido de humedad, se tomaron muestras inalteradas por duplicado con cilindros de aluminio de 100 cm^3 en cada horizonte.

7.3 Trabajo de laboratorio

7.3.1 Inventario y preparación de las muestras

Al llegar del trabajo de campo, se realizó un inventario de las muestras colectadas, mismas que posteriormente se llevaron a un cuarto de secado para secarla al aire. La homogeneización se inició a partir de las muestras secas y se tamizaron con tamiz de 2 mm de diámetro.

7.3.2 Análisis de parámetros físicos y químicos del suelo

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, en donde la masa se calcula por gravimetría a partir de una muestra inalterada tomada con cilindros de 100 cm^3 de capacidad después de secar la muestra a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta obtener peso constante. El contenido de humedad se determinó a partir de la diferencia de peso.

La textura del suelo se determinó por el método del hidrómetro o de bouyoucos modificado (Day, 1965). Las muestras se secaron a 105°C , se pesaron 25 g para muestras con suelos francos y arcillosos y 50 g para suelos franco arenosos o arcillo-arenosos y 100 g para suelos arenosos.

El pH del suelo se determinó potenciométricamente, en el sobrenadante de una suspensión relación suelo-solución 1:2,5 a temperatura ambiente, tanto en una solución de CaCl_2 0.01M como en agua destilada según (Schlichting, 1995). Se evaluó el pH con un potenciómetro Beckman previamente calibrado. En el extracto suelo: agua se evaluó la conductividad eléctrica con un conductímetro marca Lamotte.

Los cationes intercambiables se determinaron en extracto con acetato de amonio 1N a pH 7. El Ca y Mg se determinaron con un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110 y para K y Na se utilizó un espectrómetro de flama Corning 400.

El Fósforo disponible, se realizó por el método de Olsen utilizando ácido ascórbico como agente reductor (Jackson, 1964).

Para determinar carbono y nitrógeno totales se utilizara un Analizador Elemental CHNS/O Perkin Elmer 2400 series II. Las muestras se analizaran en el modo CHN bajo las siguientes condiciones analíticas: gas acarreador helio; temperatura de combustión 980° C; temperatura de reducción 640°C; detector conductividad térmica y compuesto de calibración acetanilida.

El contenido de carbono inorgánico se determinó utilizando un Analizador elemental Shimadzu, utilizando ácido fosfórico para eliminar el carbono orgánico y oxígeno como gas acarreador. El contenido de C orgánico se obtuvo de la diferencia entre el C total y el C inorgánico y posteriormente este valor multiplicando por el factor 1.724 para calcular el contenido de materia orgánica total.

7.4 Interpretación de la información

Con la caracterización en campo y el conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los suelos obtenidas en el trabajo de laboratorio, se realizó una interpretación de los procesos pedogenéticos dominantes en cada perfil, así como la clasificación de los suelos según la World Reference Base (WRB, 2007).

Finalmente, con base en Siebe *et al.*, (2006), se llevó a cabo la interpretación y evaluación edafocológica de los perfiles de suelo, que de manera general contempla lo siguiente: permeabilidad de raíces, disponibilidad de nutrientes, capacidad de aireación, agua disponible para las plantas, capacidad de campo, conductividad hidráulica, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, drenaje natural y erodabilidad. Con esta información y con los datos obtenidos de laboratorio, campo y mapas de la zona, se estableció los potenciales de uso para cada unidad de suelos, así como las unidades que representan mayor riesgo de contaminación al sistema lagunar de Montebello.

En la *Figura 7* se describe el esquema general de trabajo que contemplo la presente investigación.

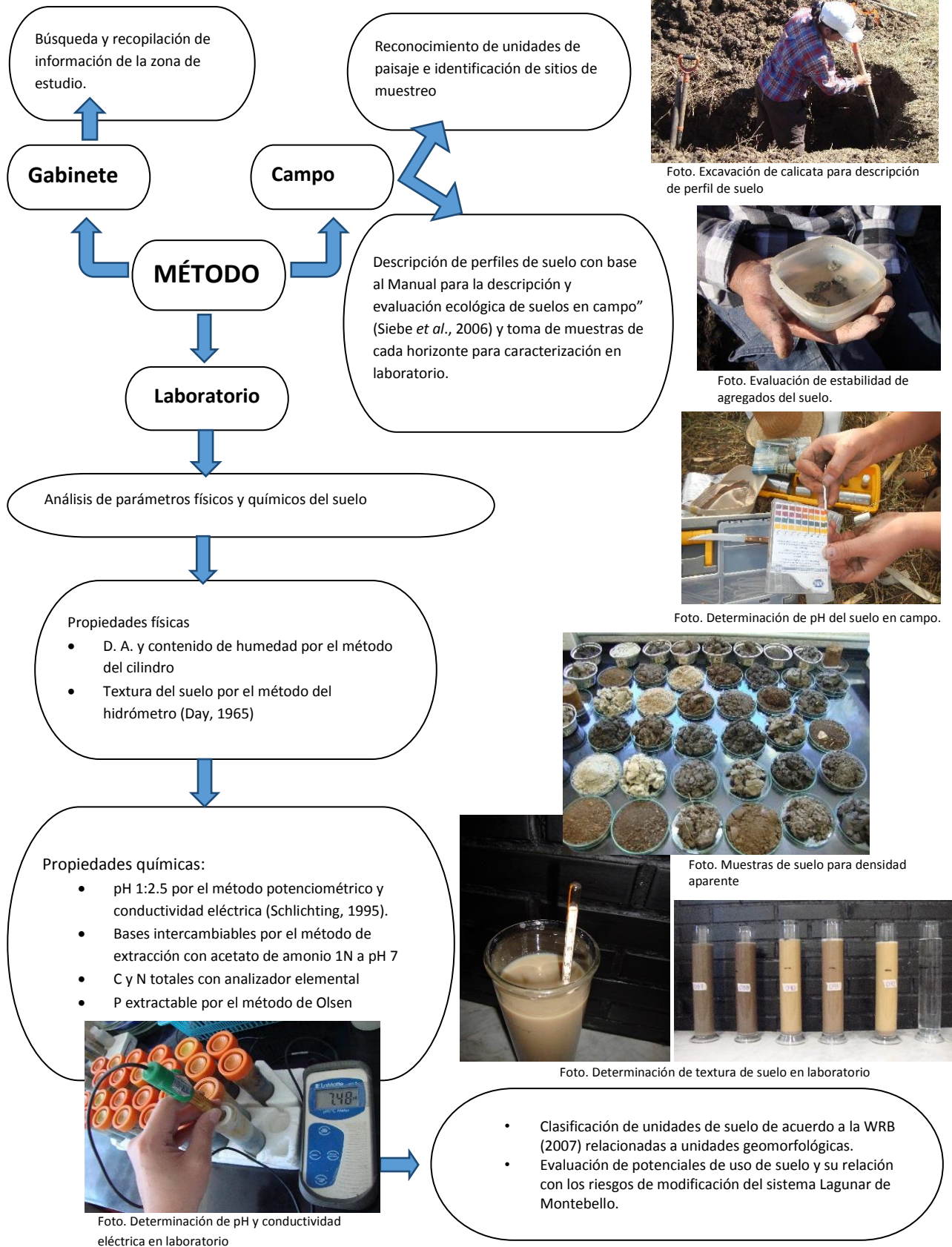


Figura 7. Esquema de metodología

VIII. RESULTADOS

8.1 Caracterización de las Unidades Geomorfológicas

El mapa geomorfológico permitió distinguir 13 unidades morfológicas, asociado a diferentes procesos y litología, las cuales se describen a continuación de acuerdo a la *Figura 8*:

- a- *Terrazas estructurales*: Corresponden a la parte más alta de la cuenca con litología predominantemente de caliza-dolomía cuya morfología está definida por el control estructural del material original debido a fallas y fracturas locales. Presenta erosión diferencial de la roca, pliegues suaves y simétricos, en dirección anticlinal. Las evidencias de disolución se expresan en lapiaz de desarrollo incipiente y coincide con las zonas de menor precipitación. Se observa rasgos erosivos debido a la fuerte pendiente. Son terrenos que tienen pendientes mayores a 20°.
- b- *Flancos de plegamiento*: Se ubican en el borde sur de la cuenca en donde aún se evidencian relictos de antiguas terrazas plegadas. Su litología es de composición caliza-lutita que facilita los procesos erosivos y su morfología es muy suave por la presencia de materiales finos (lutitas). Sus pendientes están entre 10 y 20°.
- c- *Restos de piedemonte con depósitos antiguos disectados*: Corresponde a relictos de las crestas pronunciadas de los flancos de plegamiento que han sido re-modeladas por procesos erosivos fluviales y depósitos de materiales retrabajados.
- d- *Plegamientos estructurales mesiformes (desarrollo kárstico incipiente)*: Corresponde a bloques de roca caliza-dolomía que han sido elevadas por movimientos tectónicos. Han sido modeladas incipientemente por procesos de disolución kárstica. En el borde sur de esta unidad se desarrolló el sistema lacustre de “planicie”, donde se formaron los lagos de planicie. A escala de detalle, Duran (2013) menciona que estos plegamientos son laderas montañosas del Paleógeno, con pendientes menores a 10°.
- e- *Lomerío bajo de pendiente continua y denudatoria*: Esta unidad corresponde litológicamente a un bloque de yeso-conglomerado polimictico, razón por la cual su morfología es diferente que las demás unidades de la cuenca, ya que se caracteriza por presentar fuertes evidencias erosivas a través de cárcavas profundas y estar fuertemente disectadas, probablemente por eventos fluviales antiguos. Sin embargo, las pendientes son suaves, menores a 5°.

- f- *Antigua planicie kárstica cubierta con material residual*: Este unidad se asemeja a una llanura de corrosión de nivel de base con colinas y mogotes. Son llanuras asociadas al nivel de bases que se han cubierto con sedimentos, dejando colinas y mogotes en su interior, su morfología es alargada en dirección NW-SE. Su litología es caliza-dolomía, rellena de material residual producto de una combinación de procesos de disolución-erosión de las colinas o mogotes que los rodean, evidencia de procesos kársticos avanzados.
- g- *Mogotes, karst cubierto avanzado*: Corresponde morfológicamente a estructuras redondeadas y aisladas dominadas por procesos erosivos y de disolución avanzados, de alturas no mayores a 50 m y pendiente promedio de 9°. La unidad se localiza en la parte alta de la cuenca, y sobre la unidad de *antigua planicie kárstica cubierta con material residual*, como relictos de bloques de roca caliza-lutita. Al igual que la unidad anterior, representa un desarrollo kárstico muy avanzado; sin embargo, en la actualidad los procesos erosivos dominan sobre los procesos de disolución, de esta manera los materiales pasan a formar parte del relleno de la *antigua planicie kárstica*.
- h- *Relieve mesiforme de plegamiento con depresión kárstica (karst moderado)*: Particularmente, este relieve mesiforme es controlado por elevaciones aisladas formadas por levantamientos del Plioceno-Pleistoceno con estructuras plegados por control estructural que favorecen la erosión en forma de los escurrimientos. En este ambiente residual actúan procesos de denudación de baja energía. Se distingue por un relieve bajo, alternando depresiones kársticas y colinas redondeadas, evidencia de procesos kársticos moderados. Las pendientes dominantes son entre 2 y 10°.
- i- *Elevaciones bajas con karst de dolinas y poljes inundados*: Esta se localiza al final de la cuenca en la zona de los lagos de “montaña”, se asocia a una intensa actividad de los procesos kársticos, sigue los lineamientos tectónicos (fallas y fracturas). Tanto las dolinas como los poljes son irregulares, desde redondeadas hasta elípticas. Los poljes tienen paredes escarpadas. La presencia de muchas dolinas y la coalescencia de las misma en forma de uvalas y poljes manifiestan el desarrollo kárstico avanzado.

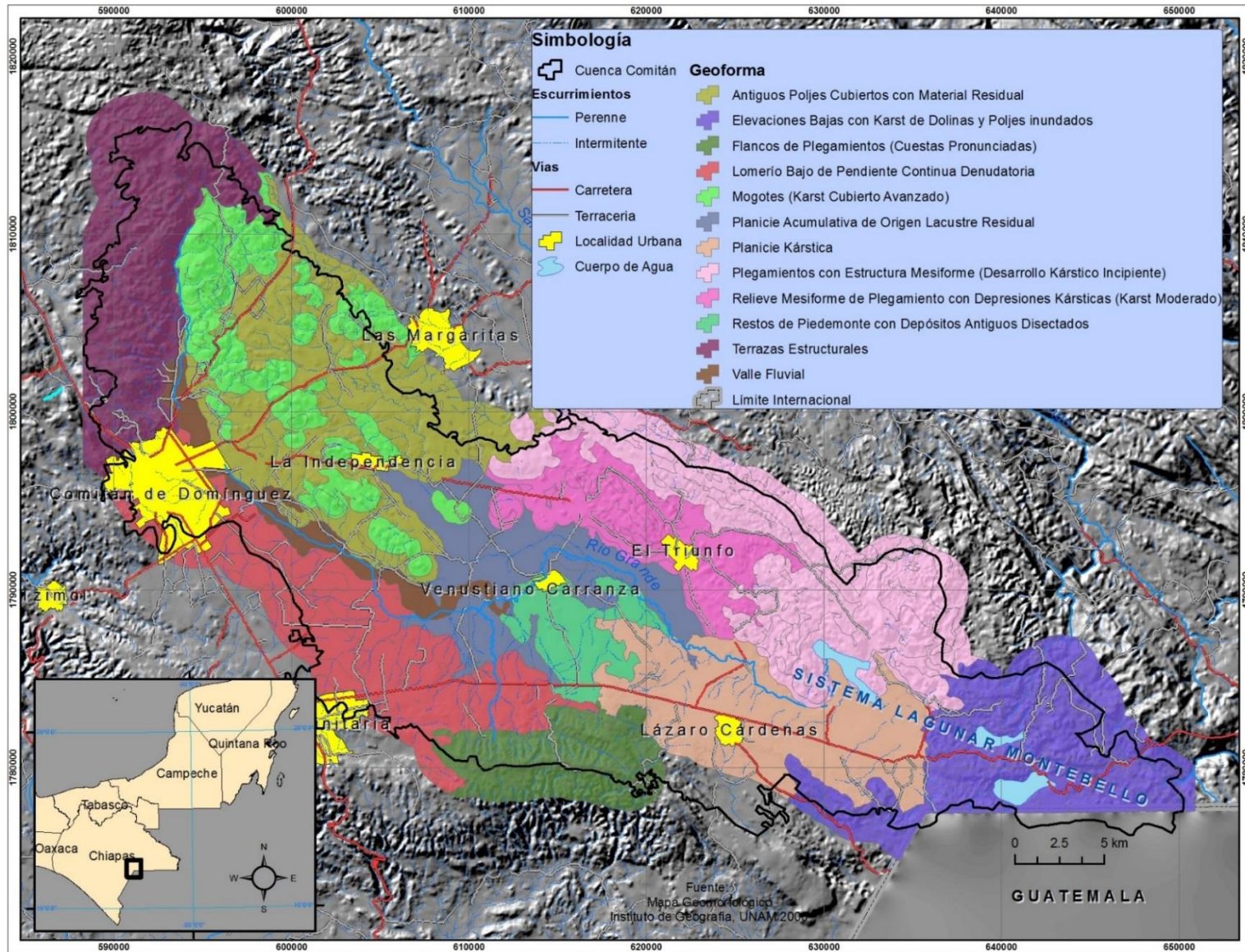


Figura 8. Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca Río Grande-Lagunas Montebello. (Bonifaz et al., 2014. En prensa).

- j- *Planicie kárstica*: La planicie kárstica se localiza en la zona de los lagos de “planicie” al final de la cuenca. Sus principales agentes modeladores son la disolución de las rocas que la conforman y en algunos casos el control tectónico. Su morfología corresponde a procesos kársticos de desarrollo avanzado. Su litología es principalmente caliza-dolomía.
- k- *Planicie acumulativa de origen lacustre residual*: Esta unidad se localiza en la parte central de la cuenta, en las zonas más bajas, de morfología plana y rellena de material residual producto de procesos de depósito.
- l- *Valle fluvial*: Se trata de morfología alargada, en forma de V, resultado de la dinámica fluvial del río grande de Comitán que se ubican a lo largo del mismo. La forma del río evidencia el control estructural por las líneas de debilidad tectónica.

8.2 Características, procesos pedogenéticos dominantes y propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo.

Este estudio contempló 19 sitios de muestreo dentro de la Cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello, los cuales se muestran en la *Figura 9*. En cada punto se llevó a cabo la descripción de los suelos y toma de muestras para la caracterización de las propiedades físicas y químicas como se refirió en el método. El *Cuadro 2* muestra las características generales y los procesos pedogenéticos dominantes de cada perfil, así como su clasificación correspondiente a la WRB (2007). Los detalles de la descripción de campo se presentan en el anexo 1, donde se puede observar la descripción detallada de los horizontes pedogenéticos, así como los atributos geográficos, climáticos, de relieve y uso de suelo del lugar a que corresponde. Por otro lado el *Cuadro 3* muestra los resultados de las características físicas y químicas de las muestras de suelo evaluadas en laboratorio para cada perfil de suelo con sus respectivos horizontes pedogenéticos.

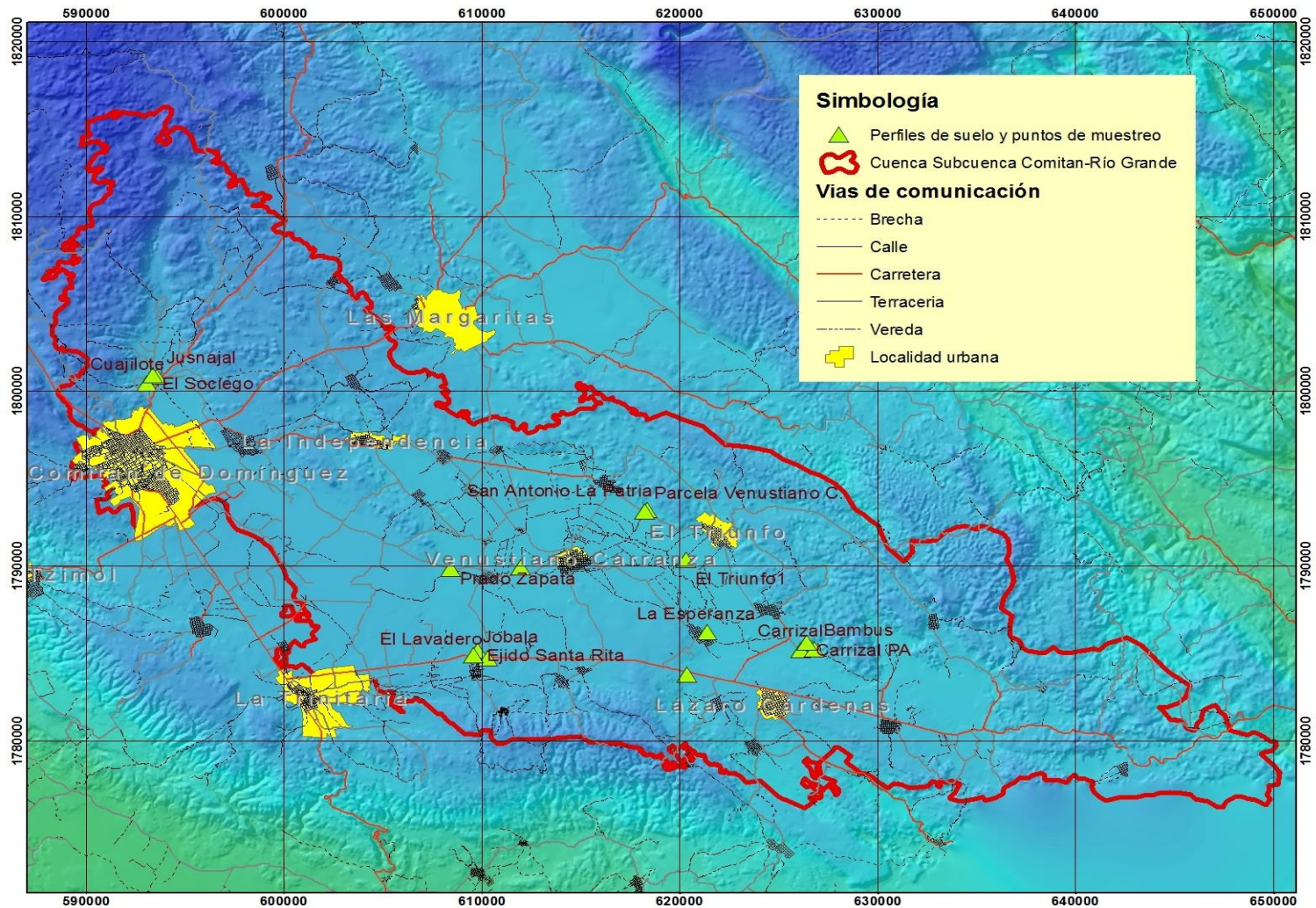





Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo de perfiles de suelo a lo largo de la Cuenca



Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo.

Localidad	Características generales	Fotografía
Carrizal parte alta ¹	<p>Perfil somero (11cm), drenado natural bueno, color gris muy oscuro. Desarrollo de estructura angular en bloques fuertes, estabilidad de agregados alta y textura arcillosa.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: El perfil muestra una alta acumulación de materia orgánica en los 10 cm (15.1%) de suelo desarrollado, con mantillo tipo mor (hojarasca de descomposición lenta, alta humedad, baja temperatura) por lo que la tasa de mineralización es baja. Por otro lado el pH ligeramente ácido (6.4) pone en evidencia una ligera pérdida de bases por lixiviación. La pedogénesis se encuentra limitada por la presencia de roca caliza a los 11cm de profundidad.</p> <p>Clasificación: Leptosol réndzico (eútrico)</p>	
San Antonio La Patria ²	<p>Perfil somero (29cm), arcilloso, drenado natural bueno, color pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento oscuro, alta pedregosidad, estructura subangular en bloques grandes y medianos, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Alto contenido de materia orgánica (hasta 12.4%). El pH muy ligera a ligeramente ácido (6.3-6.6) pone en evidencia una pérdida de bases por lixiviación. El desarrollo del perfil se encuentra limitado por roca caliza a los 29 cm y por la posición del terreno (pendiente de 25°)</p> <p>Clasificación: Leptosol lítico (eútrico).</p>	
Parcela Venustiano Carranza ²	<p>Profundidad mediana (65 cm), arcilloso, drenaje moderado, color pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento oscuro, estructura en bloques subangulares y fuertes.</p> <p>Procesos pedogenéticos dominantes: Acumulación de materia orgánica, pH moderadamente ácido (5.2-5.6) que indica una pérdida de bases por lixiviación o agricultura. Presenta concreciones de tipo Mn y un horizonte subsuperficial (Cwk) poco intemperizado que muestra acumulación de CaCO₃. Presenta un horizonte cámbico que carece de propiedades específicas para otros horizontes de diagnóstico a excepción de la transformación del material parental, que es evidente por la formación de estructura, un cromas Munsell más rojo, remoción de carbonatos y mayor contenido de arcilla que la capa subyacente producto de una formación de arcillas minerales in situ ya que carece de evidencia de iluviación.</p> <p>Clasificación: Cambisol háplico (húmico, eútrico arcilloso)</p>	

¹ Plegamientos de estructuras mesiformes

² Relieve mesiforme

Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)



Localidad	Características generales	Fotografía
San Miguel Tinajab ³	<p>Perfil medianamente profundo (70cm), de textura franca a franca limosa, pedregosidad mayor a 40%, drenado natural moderado a bueno, color pardo oscuro a pardo grisáceo muy oscuro, estructura granular fina y baja estabilidad de agregados.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Alto contenido de materia orgánica hasta el horizonte C. El pH muy ligeramente alcalino (7.2-7.3) indica la presencia de una reserva de cationes básicos. A lo largo de todo el perfil se muestra acumulación de CaCO₃ con fuerte reacción a HCl al 10%, muestra un incipiente desarrollo de un horizonte mólico, sin embargo a partir del segundo horizonte presenta roca continua (caliza) que limita la pedogénesis.</p> <p>Clasificación: Leptosol mólico (calcárico, esquelético)</p>	
Los Higos ⁴	<p>Perfil profundo (110cm), arcilloso, drenaje natural deficiente, color pardo grisáceo muy oscuro, estructura subangular y angular en bloques medianos y gruesos.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Alta acumulación de materia orgánica. El pH ligeramente alcalino (7.6-7.8) indica la presencia de una reserva de cationes básicos. A lo largo del perfil se muestra acumulación de CaCO₃ con mayor reacción al HCl en los horizontes subsuperficiales. Presenta un horizonte subsuperficial con acumulación iluvial de arcilla que se manifiesta en la presencia de cutanes, este proceso va acompañado de un cambio en la conductividad hidráulica por lo que el agua de lluvia se estanca generando condiciones cambiantes de óxido-reducción en el suelo que resultan en la presencia de manchas y motas rojizas distribuidas en los horizontes iluviales.</p> <p>Clasificación: Feozem stágnico lúvico (calcárico, páquico, arcílico)</p>	
La Esperanza El Encierro ⁵	<p>Perfil profundo (105cm), arcilloso, drenado natural moderado a deficiente, color gris muy oscuro a pardo, estructura granular (en superficie) y subangular en bloques gruesos, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Acumulación de materia orgánica, pH muy ligeramente alcalino (7.3-7.5) que indica una reserva de cationes básicos. El horizonte Cgk tiene acumulación de CaCO₃ con fuerte reacción al HCl y presenta concreciones de tipo Mn. Presenta gran cantidad de cutanes de arcilla producto de fenómenos de iluviación, esta deposición de partículas finas provoca que los poros se vayan tapando, de manera que el agua de lluvia se estanca originando condiciones cambiantes de óxido-reducción en el suelo que resultan en la presencia de manchas y motas.</p> <p>Clasificación: Feozem stágnico lúvico (glósico, arcílico)</p>	

³ Mogotes y dolinas

⁴ Antigua planicie kárstica cubierta con material residual

⁵ Planicie kárstica alta

Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)

Localidad	Características generales	Fotografía
Carrizal-Bambus ⁵	<p>Perfil profundo (105cm), arcilloso, drenado natural moderado a deficiente, color pardo grisáceo muy oscuro a pardo, estructura angular (dominante) y subangular en bloques medianos y fuertes, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Alta acumulación de materia orgánica (hasta 11.2%) pH ligeramente alcalino (7.0-7.3), acumulación de CaCO₃ a lo largo del perfil, así como un horizonte de acumulación iluvial de arcilla con presencia de cutanes. Este proceso va acompañado de un cambio en la conductividad hidráulica por lo que el agua de lluvia se estanca en el límite superior del horizonte eluvial generando condiciones cambiantes de óxido-reducción en el suelo que resultan en la presencia de manchas y motas distribuidas en el horizonte Bt.</p> <p>Clasificación: Feozem stágnico lúvico (calcárico, arcílico)</p>	
Potrero ojo de agua ⁶	<p>Suelo de profundidad mediana (45cm), arcilloso, con condiciones de drenaje natural deficiente, color negro, gris olivo oscuro a pardo, estructura granular en horizonte superficial y por debajo estructura subangular en bloques medianos y gruesos, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Muestra alto contenido de materia orgánica (hasta 11%). El pH fuertemente ácido (4.0-4.7) pone en evidencia una importante pérdida de bases por lixiviación o agricultura. La fluctuación del agua freática dentro del perfil ha generado condiciones cambiantes de óxido-reducción que resultan en la presencia de un patrón de color gléyico, por otro lado como producto de la pedogénesis se ha formado un horizonte subsuperficial con acumulación iluvial de material fino que se manifiesta en la presencia de cutanes de arcilla.</p> <p>Clasificación: Gleysol álico (dístrico, arcílico)</p>	Sin fotografía
Sociego ⁷	<p>Perfil profundo (95cm), arcilloso, drenado natural moderado, color gris muy oscuro, gris oscuro a pardo, estructura subangular y angular en bloques grandes, baja estabilidad de agregados en horizonte superficial y por debajo mediana estabilidad.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Muestra acumulación de materia orgánica. El pH ligeramente alcalino (7.3-7.7) indica una reserva de cationes básicos. El horizonte subsuperficial (74-95cm) muestra acumulación de carbonato de calcio y se encuentra poco intemperizado.</p> <p>Clasificación: Feozem háplico (arcílico)</p>	

⁵ Planicie kárstica alta

⁶ Planicie kárstica baja

⁷ Valle fluvial alto




Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)

Localidad	Características generales	Fotografía
Cuajilote ⁷	<p>Perfil profundo (105cm), arcilloso, drenaje natural moderado a deficiente, color pardo grisáceo muy oscuro, estructura subangular en bloques medianos y fuertes</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Muestra acumulación de materia orgánica. El pH varía de moderadamente ácido a muy ligeramente ácido (5.5-6.3), lo cual pone en evidencia una ligera pérdida de bases por lixiviación o agricultura. En horizontes subsuperficiales muestra cutanes de arcilla resultado de fenómenos de iluviación. Posee un horizonte subsuperficial arcilloso que, como resultado de expansión y contracción de arcillas esmectíticas presenta slikenides y texturas muy arcillosas que tienden a formar capas impermeables originando condiciones reductoras siendo evidentes en la presencia de un patrón de color stágnico.</p> <p>Clasificación: Vertisol stágnico (hipereútrico)</p>	
Juznajal ⁷	<p>Perfil profundo (60cm), arcilloso, drenado natural moderado, color pardo oscuro a pardo grisáceo muy oscuro, estructura subangular en bloques gruesos y fuertes, baja estabilidad de agregados en horizonte superficial y por debajo alta estabilidad.</p> <p>En el perfil los procesos dominantes son la mineralización de la materia orgánica, pH ligeramente alcalino (7.5-7.6) que indica la presencia de una reserva de cationes básicos. Presenta concreciones de tipo Fe-Mn a lo largo de todo el perfil, lo que indica condiciones de periodos alternos de humedad y sequedad en el suelo, que modifican el potencial redox. El horizonte subsuperficial (38-60 cm) muestra acumulación de carbonato o material calcárico y se encuentra poco intemperizado.</p> <p>Clasificación: Feozem réndzico (arcílico)</p>	
Carrizal ⁸	<p>Suelo profundo (100cm), con variación textural de arenosa, arenosa franca, arcillo arenosa a arcillosa, drenado moderado, color pardo grisáceo muy oscuro, pardo olivo, pardo muy pálido. Estructura variable desde masiva hasta estructura en bloques redondeados o subangulares, medianos y gruesos, estabilidad de agregados de muy baja a alta.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Presenta estratificación de material de origen fluvial, acumulación de materia orgánica, pH variable de ligeramente ácido (6.7) en el horizonte superficial a muy ligeramente alcalino (7.1-7.4) en los horizontes subsuperficiales. Presenta concreciones de Fe y condiciones reductoras que se manifiestan en la presencia de manchas y motas en canales de raíces. En todo el perfil hay acumulación de CaCO₃.</p> <p>Clasificación: Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico)</p>	

⁷ Valle fluvial alto




⁸ Valle fluvial bajo

Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)

Localidad	Características generales	Fotografía
Prado-Zapata ⁹	<p>Perfil profundo (105 cm), arcilloso, drenado natural moderado a deficiente, color gris muy oscuro a gris claro, estructura subangular en bloques gruesos y estabilidad de agregados mediana.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Acumulación de materia orgánica, pH muy ligeramente alcalino (7.4-7.5) que pone en evidencia la presencia de una reserva de cationes básicos, muestra acumulación de CaCO₃ en forma de concreciones de calcita lo que indica fenómenos de disolución y precipitación debidos a periodos alternos de humedad y sequedad en el suelo. A partir de los 51 cm tiene estructura masiva.</p> <p>Clasificación: Feozem réndzico (páquico, arcílico)</p>	
Venustiano Carranza ⁹	<p>Perfil profundo (90cm), arcilloso, drenado natural moderado a deficiente, color pardo grisáceo muy oscuro a pardo grisáceo oscuro, estructura subangular en bloques gruesos, por debajo de 60 cm estructura masiva, estabilidad de agregados mediana.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Mineralización de materia orgánica, presenta facetas de ficción-presión a lo largo de todo el perfil debido a la expansión y contracción de arcillas esmectíticas, acompañado de un patrón de color stágnico que refleja condiciones reductoras en el suelo. El pH fuerte a moderadamente ácido (4.6-5.2) pone en evidencia una importante pérdida de bases por lixiviación o agricultura. Presenta concreciones de Mn que indica fenómenos de disolución y precipitación debidos a periodos alternos de humedad y sequedad en el suelo.</p> <p>Clasificación: Vertisol stágnico (húmico, mesotrófico)</p>	
El Triunfo I ⁹	<p>Perfil profundo (110cm), arcilloso, drenado natural deficiente, color gris muy oscuro, gris olivo oscuro a olivo, estructura angular y subangular en bloques gruesos y fuertes, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Mineralización de materia orgánica, pH moderadamente ácido (5.2-5.6) en los primeros horizontes que pone en evidencia una ligera pérdida de bases por lixiviación o agricultura. Predomina la expansión y contracción de arcillas esmectíticas, que se manifiestan en la presencia de slickensides y altos porcentajes de arcilla que tienden a formar capas impermeables donde el estancamiento del agua origina condiciones reductoras generando un patrón de color stágnico. Se encontraron pocas concreciones de tipo Fe-Mn.</p> <p>Clasificación: Vertisol stágnico (mesotrófico, hipereútrico, pélico)</p>	

⁹ Planicie de acumulación lacustre


Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)

Localidad	Características generales	Fotografía
El Triunfo II ⁹	<p>Perfil de mediana profundidad de desarrollo (54cm), drenaje moderado a deficiente, color variable (pardo rojizo oscuro, gris muy oscuro, pardo fuerte, olivo pálido), estructura granular en el horizonte superficial y por debajo desarrollo de estructura subangular en bloques medianos y fuertes, estabilidad de agregados muy alta.</p> <p>Procesos y rasgos pedogenéticos: Suelo débilmente desarrollado que presenta una incipiente acumulación de materia orgánica. El pH muy ligeramente ácido (6.7-6.8) indica una muy ligera pérdida de bases por lixiviación. Predomina la textura arcillosa pero el porcentaje de arcilla es muy variado generando cambios en la conductividad hidráulica debido a la formación de capas impermeables que propician el estancamiento del agua dando lugar a fenómenos de reducción que se manifiesta en la presencia de manchas y motas.</p> <p>Clasificación: Regosol stágnico (eútrico arcílico)</p>	
Santa Rita El Lavadero ¹⁰	<p>Perfil de profundidad mediana (70 cm), textura franco arenosa en horizonte superficial a franco arcillo arenosa en horizonte subsuperficial, drenado natural bueno a moderado, color pardo olivo claro, pardo amarillento a amarillo, estructura en bloques subangulares pequeños y débiles y por debajo de los 34cm no hay desarrollo de estructura.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: El perfil muestra una discontinuidad textural abrupta, baja acumulación de materia orgánica en el primer horizonte (1.7%) y alta pedregosidad. El pH fuertemente ácido (4.2-4.6) pone en evidencia una importante pérdida de bases por lixiviación.</p> <p>Clasificación: Planosol háplico (dístrico, arénico).</p>	
Santa Rita Antonio López ¹⁰	<p>Perfil profundo (120cm), drenado natural bueno a moderado, color variable (gris muy oscuro, pardo grisáceo muy oscuro, pardo olivo oscuro), estructura subangular y angular en bloques grandes y medianos, estabilidad de agregados alta, textura arcillosa y franco arcillo arenosa</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Acumulación de materia orgánica, de 0-49/59 cm de profundidad, el pH moderadamente ácido pone en evidencia una ligera pérdida de bases por lixiviación o agricultura, de 49/59-120 cm el pH es muy ligeramente alcalino. A lo largo del perfil muestra acumulación de CaCO₃ con variada reacción a HCl al 10%, de muy baja a media.</p> <p>Clasificación: Feozem háplico (arcílico)</p>	

⁹ Planicie de acumulación de origen lacustre

¹⁰ Lomeríos de pendiente continua denudatoria

Cuadro 2. Características y propiedades pedogenéticas de perfiles de suelo (continuación)

Localidad	Características generales	Fotografía
Jobala ¹⁰	<p>Perfil profundo (72cm), arcilloso, drenado natural moderado, color gris muy oscuro, desarrollo de estructura subangular y angulares en bloques gruesos y fuertes, estabilidad de agregados alta.</p> <p>Rasgos y procesos pedogenéticos: Acumulación de materia orgánica, el pH moderadamente ácido (5.6-7.2) indica una ligera pérdida de bases. Desarrollo de horizonte con acumulación iluvial de arcilla (Bt) que se manifiesta en la presencia de cutanes, ésta deposición de partículas finas provoca que los poros se vayan tapando, de manera que el agua de lluvia se estanca eluvial originando condiciones cambiantes de óxido-reducción en el suelo que resultan en la presencia de manchas y motas.</p> <p>Clasificación: Feozem lúvico (páquico, arcílico).</p>	

¹⁰ Lomerios de pendiente continua denudatoria

Como se puede observar en el cuadro anterior los procesos pedogenéticos dominantes en los perfiles evaluados fueron: desarrollo de propiedades stágnicas debido al estancamiento del agua superficial (horizontes Bg), acumulación iluvial de arcilla (horizontes Bt), acumulación de CaCO₃, y en menor proporción pérdida de bases por lixiviación y desarrollo de propiedades vérticas (Bss) como son la presencia de grietas y superficies o caras de deslizamiento (slickensides). Otros rasgos pedogenéticos dominantes son el desarrollo de estructura de subangular a angular y colores de pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) a pardo oscuro (10YR3/3).

De las propiedades físicas y químicas evaluadas en laboratorio que se muestran en el Cuadro 3 y de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 y a Siebe *et al.*, (2006) se encontró que en general los suelos presentaron mediano contenido de materia orgánica en los horizontes Ah (2-4%) a excepción de los suelos que soportan vegetación forestal o matorral donde se observaron altos porcentajes (Carrizal-Bambus, Potrero-Ojo de Agua, Carrizal Parte Alta, San Antonio La Patria y San Miguel Tinajab con porcentajes de M.O. entre 8-15%); en cuanto a la textura dominan los suelos arcillosos (con porcentajes de arcilla superior al 50%) que va de la mano con un drenaje moderado a deficiente; pH ligeramente ácido a ligeramente alcalino (6.0-7.5) con excepción del perfil Santa Rita el Lavadero y Potrero Ojo de Agua que mostraron una intensa acidificación (pH 4.0-4.7) al igual que un bajo contenido de bases intercambiables (menor a 25 cmol/kg) mientras que los demás suelos mostraron un contenido de BI de mediano a alto (25- <200 cmol/kg); densidad aparente baja a mediana (0.6-1.4 g/cm³); contenido nitrógeno total de alto (0.15-0.25%) a muy alto (>0.25%) en los horizontes Ah; contenido de fósforo de bajo a alto (5.5- hasta 40 mg/kg) y finalmente con efectos despreciables de salinidad.

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo.

Localidad	Prof. (cm)	Hor.	pH 1:2,5		CE dS/m	D.A g/cm ³	C _T	N _T	CaCO ₃ %	M.O.	Ca	Mg	K	Na	BI	Ca/Mg	k/Mg	P Olsen mg/kg	arcilla %	arena	limo	Textura
			H ₂ O	CaCl ₂																		
Carrizal PA ¹	0-11	Ah	6.7	6.4	0.48	ND	8.8	0.61	0.0	15.1	51.5	2.1	0.37	0.13	54.0	24.9	0.18	8.4	58	4	38	R
San Antonio	0-5	Ah	6.6	6.3	0.68	0.6	7.2	0.50	0.0	12.4	48.5	2.8	0.88	0.17	52.4	17.5	0.32	5.5	64	4	32	R
La Patria ²	5-29	AC	6.9	6.6	0.71	0.8	4.4	0.37	0.0	7.6	48.4	0.7	0.44	0.17	49.7	72.2	0.65	2.4	75	3	22	R
Parcela Venustiano Carranza ²	0-5	Ap	6.2	5.6	0.20	1.0	2.2	0.19	0.01	3.8	22.0	2.8	0.45	0.12	25.4	7.8	0.16	8.1	70	11	19	R
	5-15/24	Ah	6.3	5.6	0.15	1.2	2.3	0.20	0.38	3.4	22.5	2.5	0.27	0.13	25.4	9.0	0.11	3.6	68	12	20	R
	15/24-50	BCw	5.7	5.2	0.11	1.2	1.4	0.13	0.01	2.3	21.0	1.0	0.17	0.11	22.3	20.7	0.16	3.1	80	6	14	R
San Miguel	0-15	Ah	7.4	7.2	0.48	1.0	12.2	0.34	5.7	11.1	48.1	4.9	0.71	0.12	53.8	9.8	0.15	7.1	20	36	44	C
Tinajab ³	15-51	AC	7.4	7.2	0.52	ND	12.5	0.39	5.4	12.2	45.1	5.3	0.45	0.14	51.0	8.5	0.09	7.8	20	36	44	C
	51-70	C	7.6	7.4	0.42	ND	11.9	0.34	5.4	11.2	48.5	4.5	0.52	0.14	53.6	10.8	0.12	3.3	20	30	50	CL
Los Higos ⁴	0-25/28	Ap	7.6	7.6	0.76	0.9	4.0	0.27	0.0	7.0	67.4	13.9	2.03	0.18	83.5	4.8	0.15	43.2	85	7	8	R
	25/28-48	Btg	7.8	7.6	0.58	1.0	2.4	0.17	0.0	4.1	50.2	23.4	1.97	0.17	75.7	2.1	0.08	2.8	95	3	2	R
	48-74	Btg	7.9	7.7	0.49	0.9	1.8	0.13	0.0	3.0	35.9	31.0	3.09	0.11	70.1	1.2	0.10	1.4	95	3	2	R
	74-91	Btg	7.9	7.7	0.49	1.1	2.6	0.09	0.0	4.4	38.8	25.8	2.36	0.10	67.1	1.5	0.09	1.6	83	7	10	R
	91-110	BC	8.1	7.8	0.36	ND	3.6	0.07	0.0	6.1	43.7	22.4	2.19	0.09	68.4	2.0	0.10	0.6	66	16	18	R
La Esperanza	0-2	Ap	7.6	7.4	0.53	ND	2.4	0.17	0.0	4.1	51.8	0.8	0.52	0.14	53.3	65.2	0.66	9.9	56	30	14	R
El Encierro ⁵	2-10	Ah	7.7	7.4	0.44	1.0	2.4	0.17	0.0	4.1	55.4	0.6	0.15	0.08	56.2	100.7	0.28	6.4	60	28	12	R
	10-26	Ah	7.7	7.3	0.41	1.1	2.2	0.15	0.0	3.8	50.8	0.5	0.11	0.04	51.5	103.8	0.23	6.0	60	28	12	R
	26-40	AB	7.6	7.3	0.45	1.1	1.9	0.13	0.0	3.3	47.8	0.3	0.12	0.04	48.2	167.6	0.43	4.1	60	30	10	R
	40-70	BC	7.7	7.4	0.44	1.3	0.9	0.08	0.0	1.6	44.4	0.2	0.12	0.09	44.8	227.4	0.61	2.3	56	32	12	R
	70-105	Ck	7.9	7.5	0.37	1.4	5.6	0.04	3.90	2.9	63.1	0.3	0.10	0.08	63.6	221.4	0.36	1.4	60	12	28	R

¹ Plegamientos de estructuras mesiformes, ² Releve mesiforme, ³ Mogotes y dolinas, ⁴ Antigua planicie kárstica cubierta con material residual,

⁵ Planicie kárstica alta

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo (continuación).

Localidad	Prof. (cm)	Hor.	pH 1:2,5		CE dS/m	D.A g/cm ³	C _r	N _r	CaCO ₃ %	M.O.	Ca	Mg	K	Na	BI	Ca/Mg	K/Mg	P Olsen mg/kg	arcilla %	arena	limo	Textura
			H ₂ O	CaCl ₂																		
Bambus ⁵	0-21	Ah	7.1	7.0	1.03	0.9	9.0	0.54	2.55	11.2	65.0	5.9	0.42	0.21	71.5	11.1	0.07	8.3	64	4	32	R
	21-30/34	Ah	7.3	7.2	0.79	1.1	6.2	0.21	0.05	10.7	58.2	5.4	0.23	0.19	64.0	10.8	0.04	4.2	62	14	24	R
	30/34-59	Btg	7.5	7.3	0.85	1.0	1.5	0.12	0.09	2.5	47.9	8.6	0.31	0.26	57.1	5.6	0.04	0.8	84	1	15	R
	59-105	Btg	7.5	7.3	1.13	ND	1.0	0.09	0.03	1.7	45.6	9.3	0.25	0.32	55.4	4.9	0.03	0.8	85	0	15	R
Potrero	0-13/20	Ap	5.4	4.7	0.20	0.8	6.4	0.50	0.0	11.1	18.7	4.3	0.26	1.70	24.9	4.3	0.06	19	70	2	28	R
ojo de	13/20-21.5	AB	5.1	4.2	0.17	0.8	3.7	0.31	0.0	6.3	14.7	2.8	0.17	0.11	17.8	5.3	0.06	8.3	75	2	23	R
Agua ⁶	21.5-31/34	Btg	4.4	4.0	0.10	1.0	1.5	0.15	0.0	2.6	10.1	2.0	0.12	0.06	12.3	5.1	0.06	1.3	85	2	13	R
	31/34-45	Btg	4.5	4.1	0.10	1.1	1.0	0.10	0.0	1.7	9.9	1.9	0.10	0.06	12.0	5.2	0.05	1.9	75	2	23	R
Sociego ⁷	0-2	Ap	7.8	7.3	0.51	0.9	1.9	0.16	0.0	3.3	47.4	14.2	0.87	0.14	62.6	3.3	0.06	7.3	74	8	18	R
	2-18	Ah	7.8	7.4	0.43	1.1	1.9	0.16	0.03	3.1	47.9	13.6	0.70	0.08	62.3	3.5	0.05	5.8	72	8	20	R
	18-41	Ah	7.7	7.3	0.48	ND	1.9	0.16	0.00	3.4	46.0	12.9	0.58	0.16	59.7	3.6	0.04	4.2	74	8	18	R
	41-74	Acw	8.0	7.5	0.43	ND	1.2	0.09	0.00	2.0	61.5	19.5	0.25	0.16	81.5	3.1	0.01	1.4	77	6	17	R
	74-95	Cwk	8.1	7.7	0.41	ND	1.7	0.04	1.15	0.9	63.6	22.3	0.38	0.21	86.5	2.9	0.02	0.7	72	10	18	R
Cuajilote ⁷	0-5	Ap	6.0	5.5	0.19	1.0	1.7	0.13	0.02	2.9	31.2	16.9	0.39	0.20	48.7	1.8	0.02	3.0	75	3	22	R
	5-13	Ah	6.2	5.7	0.18	1.1	1.2	0.09	0.00	2.1	34.8	17.7	0.36	0.18	53.1	2.0	0.02	0.8	78	3	19	R
	13-29	Ah	5.9	5.5	0.16	1.3	1.7	0.13	0.00	2.9	30.7	16.4	0.35	0.15	47.6	1.9	0.02	1.5	74	4	22	R
	29-50	Btg	7.4	7.0	0.37	1.0	0.3	0.03	0.00	0.5	42.8	21.5	0.67	0.25	65.2	2.0	0.03	0.4	88	1	11	R
	50-88	Btgss	6.8	6.3	0.21	0.9	0.8	0.06	0.01	1.3	34.4	17.4	0.36	0.24	52.4	2.0	0.02	0.6	84	3	13	R
	88-105	BCK	7.9	7.4	0.56	ND	0.7	0.03	0.15	0.9	45.5	19.8	0.62	0.27	66.2	2.3	0.03	0.3	84	6	10	R
Juxnajal ⁷	0-3	Ap	7.8	7.5	0.42	1.1	1.8	0.13	0.60	2.2	45.0	7.2	0.89	0.12	53.3	6.2	0.12	4.5	53	33	14	R
	3-11/14	Ah	7.8	7.5	0.42	1.1	2.1	0.15	0.58	2.5	43.2	7.1	0.70	0.09	51.1	6.1	0.10	4.4	52	33	15	R
	11/14-38	Ah	7.9	7.6	0.35	1.2	1.8	0.12	0.75	1.8	44.8	6.3	0.35	0.14	51.6	7.1	0.06	2.0	52	33	15	R

⁵ Planicie kárstica alta, ⁶ Planicie kárstica baja, ⁷ Valle fluvial alto

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo (continuación).

Localidad	Prof. (cm)	Hor.	pH 1:2,5		CE dS/m	D.A g/cm ³	C _r	N _r	CaCO ₃ %	M.O.	Ca	Mg	K	Na	BI	Ca/Mg	k/Mg	P Olsen mg/kg	arcilla %	arena	limo	Textura
			H ₂ O	CaCl ₂																		
Carrizal ⁸	0-22/24	Ah	6.9	6.7	0.95	1.0	3.8	0.35	0.00	6.6	47.0	6.6	0.55	0.16	54.3	7.2	0.08	26.8	54	27	19	R
	22/24-31	AC	7.3	7.1	0.73	1.1	1.4	0.12	0.12	2.2	41.0	4.5	0.35	0.13	46.0	9.2	0.08	14.1	40	46	14	RA
	31-41	C1	7.7	7.2	0.35	1.5	0.5	0.03	0.47	0.1	10.1	1.3	0.65	0.04	12.1	7.6	0.49	30.2	10	88	2	AC
	41-51	C2	7.8	7.4	0.27	ND	0.3	0.03	0.13	0.3	10.9	1.3	0.57	0.04	12.8	8.7	0.45	29.5	8	91	1	A
Prado Zapata ⁹	0-51	Ah	7.7	7.4	0.66	1.5	1.6	0.09	0.59	1.7	50.3	1.6	0.16	0.22	52.2	32.3	0.10	1.8	47	42	11	R
	51-60	AC	7.8	7.4	0.60	1.4	3.1	0.03	2.78	0.6	57.8	0.9	0.09	0.28	59.1	62.8	0.10	1.0	55	29	16	R
	>60	Cwk	7.8	7.5	0.79	1.2	1.2	0.02	0.86	0.6	55.0	1.1	0.09	0.39	56.6	51.4	0.09	0.3	86	4	10	R
Llanura Venustiano	0-20	Ap	5.5	5.0	0.19	1.4	1.8	0.15	0.00	3.0	26.5	4.9	0.17	0.12	31.6	5.4	0.04	7.2	48	15	37	R
	20-60	Bss	5.2	4.7	0.23	1.5	1.4	0.12	0.00	2.4	18.6	3.9	0.17	0.19	22.8	4.8	0.04	4.1	56	10	34	R
Carranza ⁹	60-90	Bssg	5.8	5.3	0.18	1.4	0.6	0.06	0.00	1.1	20.1	3.6	0.12	0.18	23.9	5.6	0.03	1.2	60	10	30	R
Triunfo I ⁹	0-20	Ap	5.4	5.2	0.62	1.0	2.0	0.16	0.00	3.5	60.4	3.1	0.24	0.17	63.9	19.5	0.08	3.5	79	5	16	R
	20-40	Bssg	5.4	5.1	0.75	1.2	1.5	0.13	0.00	2.7	59.9	2.8	0.10	0.18	63.0	21.3	0.04	0.9	80	4	16	R
	40-55	Bssg	5.8	5.7	1.55	1.2	0.9	0.07	0.00	1.5	52.2	2.3	0.07	0.15	54.7	23.0	0.03	1.0	82	6	12	R
	55-70/76	Bssg	6.3	6.1	2.84	1.1	0.7	0.06	0.31	0.6	106.9	2.3	0.09	0.16	109.4	45.7	0.04	0.8	82	6	12	R
	70/76-93	BCg	7.4	7.2	2.83	1.1	0.1	0.02	0.00	0.2	241.4	1.7	0.08	0.14	243.3	142.0	0.05	0.7	80	8	12	R
	93-110	BC	7.4	7.3	2.88	1.0	0.1	0.02	0.00	0.2	135.5	2.3	0.14	0.16	138.1	58.1	0.06	1.9	85	1	14	R
Triunfo II ⁹	1-17	Ah	7.1	6.7	0.58	1.2	1.9	0.20	0.00	3.3	12.7	4.9	1.08	0.26	19.0	2.6	0.22	7.8	52	18	30	R
	17-32	ABg	7.3	6.9	0.43	1.2	1.0	0.13	0.00	1.7	19.4	4.4	1.42	0.28	25.6	4.4	0.32	8.3	42	26	32	R
	32-51/54	Cg	7.1	6.8	0.64	1.0	0.4	0.07	0.00	0.7	44.2	10.2	2.30	0.58	57.3	4.3	0.23	2.5	74	3	23	R
	54-73		----- Sedimento -----																			
	73-105	2C	7.7	7.3	0.38	1.0	0.1	0.04	0.00	0.2	49.6	10.7	3.01	1.25	64.5	4.6	0.28	1.9	38	2	60	CRL
105-138	3C	7.7	7.2	0.45	0.8	0.1	0.04	0.00	0.3	46.2	10.2	2.80	1.29	60.5	4.5	0.27	0.3	78	0	22	R	

⁸ Valle fluvial bajo, ⁹ Planicie de acumulación lacustre

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo (continuación).

Localidad	Prof. (cm)	Hor.	pH 1:2,5		CE dS/m	D.A. g/cm ³	C _T	N _T	CaCO ₃	M.O.	Ca	Mg	K	Na	BI	Ca/Mg	k/Mg	P Olsen mg/kg	arcilla	arena	limo	Textura
			H ₂ O	CaCl ₂																		
Santa Rita,	0-15	AC	5.1	4.5	0.08	ND	1.0	0.08	0.00	1.7	4.6	1.9	0.15	0.36	7.0	2.5	0.08	3.2	11	68	21	CA
El Lavadero ¹⁰	15-34	Cw	5.2	4.6	0.04	ND	0.6	0.05	0.00	1.0	2.7	0.5	0.08	0.07	3.4	5.3	0.15	0.8	29	53	18	CRA
	34-70	C	5.2	4.1	0.07	ND	0.3	0.04	0.00	0.5	7.5	2.5	0.16	0.27	10.4	3.0	0.06	0.4	19	74	7	CA
Santa Rita,	0-20	Ap	6.1	5.7	0.28	1.0	3.1	0.25	0.00	5.4	39.0	6.2	1.13	0.13	46.5	6.3	0.18	13.5	60	18	22	R
Antonio	20-40	Ah	5.9	5.4	0.17	1.1	2.3	0.20	0.00	3.9	39.7	5.4	0.59	0.16	45.8	7.4	0.11	6.3	64	16	20	R
Lopez ¹⁰	40-49/59	Ah	6.2	5.8	0.17	1.2	1.5	0.14	0.00	2.5	39.8	4.5	0.33	0.22	44.9	8.8	0.07	3.0	60	23	17	R
	49/59-70	2Ah	7.8	7.3	0.40	1.3	0.9	0.08	0.00	1.5	42.6	2.9	0.24	0.23	46.0	14.5	0.08	2.4	42	40	18	R
	70-84	3Ah	8.1	7.5	0.29	1.4	0.7	0.06	0.08	1.1	32.6	1.9	0.17	0.18	34.8	16.9	0.09	2.3	33	51	16	CRA
	84-120	3Ah	8.0	7.5	0.33	1.4	0.7	0.06	0.00	1.2	34.0	2.7	0.20	0.23	37.2	12.5	0.07	1.8	44	39	17	R
Jobala ¹⁰	0-13	Ap	6.0	5.6	0.31	1.2	2.7	0.22	0.00	4.7	39.4	6.6	0.44	0.27	46.7	6.0	0.07	14.9	58	18	24	R
	13-34	Ah	6.0	5.6	0.26	1.2	2.3	0.20	0.00	3.9	40.4	6.1	0.47	0.34	47.3	6.6	0.08	7.5	64	15	21	R
	34-72	Bt	6.6	6.2	0.34	1.2	1.2	0.09	0.00	2.0	45.4	4.9	0.50	0.46	51.2	9.2	0.10	1.9	66	12	22	R
	72-100	Bw	7.6	7.2	0.47	ND	0.8	0.06	0.00	1.4	40.2	4.0	0.35	0.41	45.0	10.0	0.09	1.7	57	29	14	R

¹⁰ Lomeríos de pendiente continua denudatoria

Textura: (R) arcillosa, (C) franca, (CL) franco limosa, (RA) arcillo arenosa, (AC) arenosa franca, (A) arenosa, (CRL) franco arcillo limosa, (CRA) franco arcillo arenosa, (CA) franco arenosa.

CE Conductividad eléctrica

D.A. Densidad aparente

CT Carbono total

NT Nitrógeno total

CaCO₃ Carbonatos

M.O. Materia orgánica

Ca Calcio

Mg Magnesio

K Potasio

Na Sodio

BI Bases intercambiables

P Olsen Fosforo

8.3 Suelos y geomorfología como bases para entender la evolución del paisaje

A partir del mapa geomorfológico elaborado por Bonifaz *et al.*, (2014), se llevó a cabo la asociación entre las unidades geomorfológicas y los tipos de suelo descritos en cada unidad, con el objeto de entender el desarrollo de los suelos y la evolución del paisaje kárstico referido previamente (Figura 2). Esta relación se presenta en el Cuadro 4 donde se distinguieron 4 etapas de desarrollo: Fase de juventud, madurez, vejez y fase terminal que modelan el relieve. Es así como se aborda la discusión de las características de los suelos de acuerdo a las unidades morfológicas, en donde se integran características, clasificación y procesos pedogenéticos.

a- Fase Juvenil

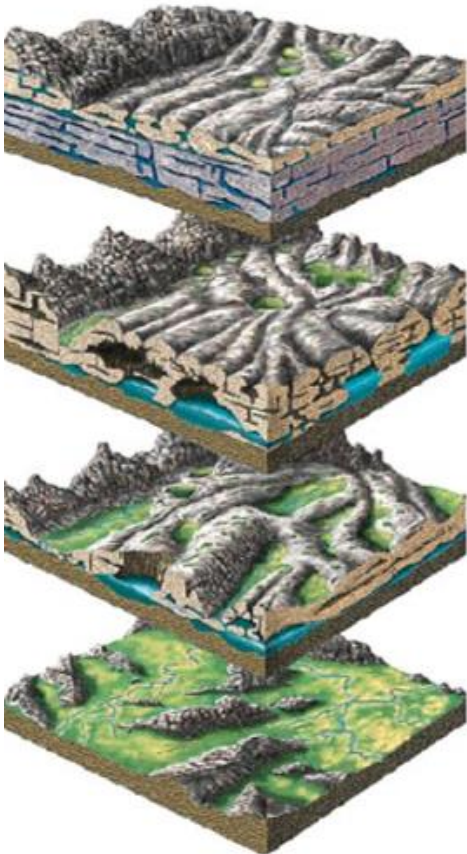
En la cuenca la fase de juventud del desarrollo kárstico se expresa en la unidad de *Terrazas estructurales*. Esta fase se caracteriza porque el agua de lluvia comienza a disolver la roca y en la superficie aparecen formaciones de lapiaz y dolinas.

Por dificultades de acceso al área, no se tiene ningún perfil sobre esta unidad. Sin embargo, por las observaciones de campo, los suelos son muy delgados, pedregosos y con poca o nula diferenciación de horizontes. Son suelos de tipo Leptosol, debido a que la roca prácticamente se encuentra expuesta en superficie.

Por otro lado, esta unidad coincide con la zona de menor precipitación en relación a toda la cuenca, lo cual limita el desarrollo de la vegetación y la disolución de materiales.

En esta misma etapa juvenil, pero en secuencia de evolución del paisaje kárstico se encuentra la unidad geomorfológica de *Plegamientos de estructuras mesiformes*, el cual representa un karst de desarrollo incipiente que igualmente limita la pedogénesis. Son suelos limitados en profundidad por roca continua (caliza), en esta unidad se identificó un perfil de tipo **Leptosol réndzico eútrico - LP rz (eu)**-. A diferencia de la anterior unidad, el aumento en la precipitación media anual (1,211 mm), con temperatura media anual de 17.2°C (SMN, 2014a), favorece la diferenciación de un horizonte superficial, muy rico en materia orgánica (humus tipo mor) por la presencia de bosque natural (bosque de pino-encino). La biomasa de esta vegetación da lugar a una baja tasa de mineralización y acumulación de hojarasca de difícil descomposición, asociado a pH ligeramente ácido en la superficie, y así mismo un grado avanzado de desarrollo de estructura con bloques angulares y fuertes.

Cuadro 4. Geomorfología asociada a suelos.

Evolución de paisaje Kárstico	Unidad Morfológica	Asociación de suelo	Perfil
	Terrazas estructurales ¹	Leptosol	Sin muestrear
	Plegamientos de estructuras mesiformes ¹	Leptosol réndzico (eútrico)	Carrizal parte alta
	Relieve mesiforme ²	Leptosol lítico (eútrico)	San Antonio, La Patria
		Cambisol háplico (húmico, eútrico, arcílico)	Parcela Venustiano Carranza.
	Mogotes y dolinas ²	Leptosol mólico (calcárico, esquelético)	San Miguel Tinajab
	Antigua planicie kárstica cubierta con material residual ²	Feozem stágnico lúvico (calcárico, páquico, arcílico)	Los Higos
	Planicie kárstica alta ³	Feozem stágnico lúvico (glósico, arcílico)	La Esperanza, El encierro
		Feozem stágnico lúvico (calcárico, arcílico)	Carrizal-Bambús
	Planicie kárstica baja ⁴	Gleysol álido (dístrico, arcílico)	Potrero, ojo de agua
	Valle fluvial alto ⁵	Feozem háplico (arcílico)	El Sociego
	Vertisol stágnico (hipereútrico)	Cuajilote	
	Feozem réndzico arcílico	Juxnajal	
Valle fluvial bajo ⁵	Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico)	Carrizal	
Planicie de acumulación, origen lacustre ⁵	Feozem réndzico (páquico, arcílico)	Prado zapata	
	Vertisol stágnico (húmico, mesotrófico)	Llanura Venustiano Carranza	
	Vertisol stágnico (mesotrófico, hipereútrico, pélico)	Triunfo 1	
	Regosol stágnico (eútrico, arcílico)	Triunfo 2	
Lomeríos de pendiente continua denudatoria ⁵	Planosol háplico (dístrico, arénico)	Sta. Rita, El Lavadero	
	Feozem háplico (arcílico)	Ejido Sta. Rita	
	Feozem lúvico (páquico, arcílico)	Jobala	

<http://slideplayer.es/slide/321871/>

¹Fase juvenil, ²Fase de madurez, ³Fase de vejez, ⁴Fase terminal, ⁵No corresponde a modelo de paisaje kárstico

b- Etapa de madurez

Como evidencia de la etapa de madurez del paisaje se identifica la unidad de *Relieve mesiforme*, en esta unidad se identifican suelos de tipo **Leptosol lítico (eútrico) -LP li (eu)-** en las partes altas de la colina y en las partes bajas **Cambisol háplico (húmico, eútrico, arcílico) -CM ha (hu-eu-ce)-**, este último se asocia a un mayor desarrollo de paisaje.

La presencia del LP li (eu) se debe principalmente a su ubicación en el relieve (terrenos con inclinación de 25°) lo cual limita fuertemente el desarrollo pedogenético.

Por otro lado, el CM ha (hu-eu-ce) presenta un horizonte subsuperficial que muestra evidencias de alteración con respecto al horizonte subyacente (Bw), lo cual evidencia procesos de neoformación de minerales secundarios.

Para ambos perfiles se encontraron procesos pedogenéticos comunes como el desarrollo de estructura en bloques subangulares, grandes y fuertes, pH de ligera a moderadamente ácido que indica acumulación de materia orgánica y poca diferenciación de horizontes.

Las condiciones de drenaje del suelo van de buena a moderada presentándose los siguientes casos: en el Leptosol existe una conductividad hidráulica de alta, buenas condiciones de drenaje natural y carece de características redoximorfias relacionadas al exceso de humedad, mientras que el Cambisol tiene una conductividad hidráulica mediana y condiciones de drenaje natural moderado, ya que en el perfil se identificó la presencia de concreciones de tipo Mg que indican condiciones de periodos alternos de humedad y sequedad en el suelo, por lo que la infiltración del agua ocurre con lentitud en algunos periodos del año.

En esta misma etapa de desarrollo, pero como un proceso de rejuvenecimiento del paisaje se identificaron de manera aislada en la parte alta de la cuenca, la unidad de los *Mogotes y dolinas* y la unidad correspondiente a *Antigua planicie kárstica cubierta con material residual*. Estas unidades indican una relación en el paisaje expresadas con la presencia de suelos poco desarrollados de tipo **Leptosol mólico (calcárico, esquelético) -LP mo (ca-sk)-** en las parte alta de *los Mogotes* y suelos desarrollados tipo **Feozem stágnico lúvico (calcárico, páquico, arcílico) -PH st-lv (ca-ph-ce)-** en la parte baja sobre el área de la *Antigua planicie kárstica cubierta con material residual*.

La presencia de un horizonte mólico en la unidad de *Mogotes* se debe a que soporta vegetación de matorral espinoso que se caracteriza por una alta tasa de mineralización que se refleja en un alto contenido de materia orgánica en el suelo (hasta 12% a una profundidad de 70 cm). En esta unidad se encontró desarrollo de estructura granular, alta saturación de bases y presencia de roca continua que limita el desarrollo de la pedogénesis en profundidad, de manera que el perfil aún conserva características del material parental, con una secuencia de horizontes Ah-AC-C. Por otro lado la fuerte reacción a HCl a lo largo de todo el perfil se debe al alto contenido de material calcáreo, razón por la que el pH es alto (7.2-7.4 en CaCl₂). Los *Mogotes* son el resultado de procesos de disolución antiguos por lo que expresan remanentes de bloques de roca caliza (pedregosidad de 40 a 50%). A pesar del avanzado proceso de disolución de esta unidad, los procesos erosivos asociados a la pendiente no condicionan la estabilidad de formación de suelos, al contrario el material se moviliza a la unidad circundante.

En la *Antigua planicie kárstica cubierta con material residual* solo se describió un perfil correspondiente a PH st-lv (ca-ph-ce) en el cual se muestra una secuencia de horizontes Ap-Btg-BC mostrando acumulación de materia orgánica, menor que en la unidad de *Mogotes*, debido al uso agrícola. A lo largo del perfil se muestra efervescencia al HCl de muy baja a alta reacción que se relaciona con los valores altos de pH (7.6 -7.8 CaCl₂) y la alta saturación de bases (*Cuadro 3*). Predomina el desarrollo de estructura en bloques angulares medianos y gruesos de grado moderado aunque también se encuentran bloques subangulares. El suelo contiene altos porcentajes de arcilla y un horizonte Btg grueso caracterizado por la formación de revestimientos de arcilla en caras de agregados como evidencia de procesos de iluviación de arcilla, lo que genera taponamiento de poros y crea capas impermeables que favorecen el estancamiento del agua sobre todo en los periodos de precipitación alta (mayo a octubre) por lo que prevalece el hidromorfismo y las condiciones anaerobias manifestándose en la presencia de manchas y motas de óxido-reducción del hierro.

Las características de mayor desarrollo del suelo en esta unidad se pueden interpretar a partir de la relación con la unidad de *Mogotes*, ya que en ésta dominan los procesos erosivos sobre la disolución del material, principalmente porque la precipitación es menor en el suelo. De esta manera todo el material intemperizado en las zonas de *Mogotes* se moviliza hacia las zonas bajas, rellenando la *Antigua planicie kárstica* con material previamente intemperizado, lo cual se expresa en los altos contenidos de arcilla en las dichas planicies, así como en el comportamiento del

contenido de materia orgánica a lo largo del perfil Los Higos, ya que desde el horizonte superficial hasta 110 cm de profundidad se encontró de mediano a medianamente alto contenido de materia orgánica (3.0-7.0%) (*Cuadro 3*).

c- Etapa de vejez y fase terminal

En la etapa de vejez y fase terminal del paisaje kárstico, la disolución da lugar al colapso y hundimiento de las estructuras, conformando un paisaje en forma de una amplia depresión caracterizada por planicies.

Dentro de la gran unidad geomorfológica de planicies kársticas se distingue una parte alta y una baja, la planicie alta se relaciona con la etapa de vejez del paisaje kárstico, mientras que la planicie baja es una expresión de la fase terminal. En este sentido, los suelos asociados a cada etapa de desarrollo del paisaje en esta unidad fueron: (1) *Planicie kárstica alta* asociada a suelos de tipo **Feozem stágnico lúvico (glósico, arcílico) -PH st-lv (gs-ce)-** y **Feozem stágnico lúvico (calcárico, arcílico) -PH st-lv (ca-ce)-** y (2) *Planicie kárstica baja* en donde se identificó un perfil de tipo **Gleysol álico (dístico, arcílico) -GL al (dy-ce)-**.

En la *Planicie kárstica alta* los procesos pedogenéticos predominantes es la alta acumulación de materia orgánica reflejada en un horizonte Ah grueso, bien estructurado, oscuro y con moderado contenido de materia orgánica, característico de un horizonte mólico. Por otro lado, también se presenta un horizonte B con marcados procesos de iluviación de arcillas y reductomorfismo.

En la zona la precipitación promedio anual es casi el doble que en la parte inicial de la cuenca, como consecuencia la disolución de la roca caliza es más intensa. Así mismo, la vegetación es más conservada, por lo que se favorece la acumulación de materia orgánica. El desarrollo avanzado del karst se relaciona con evidencias de mayor intemperismo tales como la formación *in situ* de arcillas y su iluviación.

Por otro lado en la *Planicie kárstica baja* se describió un perfil correspondiente a Gleysol el cual muestra un alto contenido de materia orgánica sobre todo en el primer horizonte (11.1%), en este perfil la posición y forma del terreno han influenciado la pedogénesis debido a que el material del suelo se encuentra saturado o en fluctuación con agua freática permitiendo la ocurrencia de condiciones cambiantes de óxido-reducción reflejadas en un patrón de color gléyico, así mismo, como resultado de la pedogénesis se ha formado un horizonte subsuperficial con acumulación iluvial de arcilla.

En general los suelos de las planicies kársticas muestran evidencias de una pedogénesis más avanzada, encontrándose suelos muy profundos e intemperizados, con ausencia o muy baja pedregosidad, acumulación de materia orgánica, desarrollo de estructura en bloques subangulares y angulares gruesos y medianos. Por otro lado, los procesos de reductomorfía relacionados con la dificultad de movimiento del flujo de agua están fuertemente marcados y son evidentes por la presencia de manchas y motas, a su vez, estos procesos se relacionan con la dominancia de texturas arcillosas y taponamiento de poros por iluviación de arcillas, este proceso y la posición del terreno dificultan en gran medida el flujo vertical y lateral de agua, generando un drenaje deficiente.

Es importante destacar que los perfiles ubicados en la *Planicie kárstica alta* mostraron acumulación de CaCO_3 a lo largo del perfil con mayor reacción al HCl en los horizontes subsuperficiales, mientras que, en la *Planicie baja*, no se observaron restos de material parental, debido a que la karstificación ha actuado intensamente, esto mismo explica los valores de pH, ya que en la parte alta los suelos se caracterizan por ser ligeramente alcalinos con pH por arriba de 7.0, mientras que, en la parte baja el pH se torna fuertemente ácido (4.0-4.7), poniendo en evidencia una pérdida de bases por lixiviación, lo cual coincide con las zonas de máxima precipitación de la cuenca que según el SMN (2014e) correspondiente a 1, 861 mm, mayor en los meses de junio a octubre.

A lo largo del Río grande se originan procesos de modelación fluvial de manera que se estableció una unidad denominada *Valle fluvial* en donde se identificaron suelo de tipo **Feozem (háplico o réndzico), Vertisol stágnico y Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico)**.

Los perfiles correspondientes a Feozem y Vertisol se localizaron en la parte inicial del río, en ellos los procesos pedogenéticos dominantes fueron: acumulación de materia orgánica con un horizonte superficial perturbado por labranza u otras actividades agrícolas, desarrollo de estructura en bloques subangulares, grandes y medianos, de grado fuerte a moderado, y en el caso de los Feozem en algunos horizontes subsuperficiales se encontró estructura angular, así como un pH ligeramente alcalino (con valores por arriba de 7.5) indicando una importante reserva de cationes básicos mientras que para el Vertisol el pH en los primeros 29 cm es moderadamente ácido (5.5-5.7) indicando una ligera pérdida de bases por lixiviación, sin embargo posee una reserva de cationes básicos muy alta.

En general los suelos de tipo Feozem (réndzico o háplico) tienen un horizonte Ah profundo (38 a 41 cm, respectivamente), moderado contenido de materia orgánica que está por encima de material calcárico parcial o prácticamente intemperizado que denota la ausencia de horizontes B, mostrándose en ambos perfiles un horizonte AC donde se aprecian remanentes de carbonato de calcio propios del material parental, reflejados en la reacción a HCl. A diferencia de otras zonas fluviales, estos perfiles muestran desarrollo estable y diferenciación del horizonte superficial, lo que muestra que la dinámica del río es muy baja, favoreciendo la acumulación de material fino y materia orgánica.

El perfil clasificado como Vertisol stágnico muestra una mayor pedogénesis con una secuencia de horizontes Ap-Ah-Btg-Btgss-Bck, identificándose la formación de un horizonte subsuperficial arcilloso que como resultado de expansión y contracción de arcillas esmectíticas presenta slikenides, también, se observan procesos de iluviación de arcilla que se manifiestan en la presencia de cutanes de arcilla en caras de agregados, éste cambio textural va de la mano con la formación de capas impermeables que originan condiciones reductoras debido a una deficiente infiltración y el subsecuente estancamiento del agua resultando en un patrón de color stágnico.

Las condiciones climáticas que prevalecen en esta unidad corresponden a una precipitación media anual de 1,109.4 mm, mayor en los meses mayo a octubre y temperatura media anual de 19.8°C (SMN, 2014d), de manera que en los meses de lluvia el suelo dispone de un alto volumen de precipitación, por otro lado la morfología del terreno no favorece la escorrentía ya que en los perfiles evaluados prácticamente no hay inclinación, además de presentar texturas con altos porcentajes de arcilla que generan condiciones de drenaje moderado (en suelos de tipo Feozem) a deficiente (en Vertisol) de manera que el agua en estos últimos suelos tiende a estancarse en algunas épocas del año resultando en hidromorfismo.

En la ribera del río se describió otro perfil, ubicado en la localidad del Carrizal, a un km de la parte inicial de las lagunas, clasificado como **Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico) -FL st (ca-eu)-** y la secuencia de horizontes corresponde a Ap-ACg-C1-C2-C3-C4-C5 mostrando una clara estratificación de material de origen fluvial, así como cambios texturales hasta una profundidad mayor a 65 cm con límites claros y uniformes, que durante el tiempo de formación del suelo no ha resultado en el desarrollo de ningún horizonte de diagnóstico subsuperficial más que la presencia de propiedades stágnicas.

En el contexto de la cuenca se identificaron otras unidades tales como, la *Planicie de acumulación de origen lacustre*, la cual representa la parte central de la cuenca, en donde el proceso de modelación del paisaje es principalmente la acumulación de sedimentos.

Esta unidad geomorfológica recibe material de las partes adyacentes, el cual tiene influencia en las propiedades de los suelos. Por la morfología del terreno los suelos tienen mayor estabilización lo que permite el avance de la pedogénesis manifestándose en una mayor profundidad del suelo y desarrollo de propiedades vérticas y stágnicas muy marcadas, encontrando la siguiente asociación de suelos: **Feozem réndzico (páquico, arcílico) -PH rz (ph-ce)- + Vertisol stágnico (húmico, mesotrófico) -VR st (hu-ms)- + Vertisol stágnico (mesotrófico, hipereútrico, pélico) -VR st (ms-he-pe)- y Regosol stágnico (eútrico, arcílico) -RG st (eu-ce)-.**

En general, en los suelos de esta unidad operan procesos pedogenéticos como la acumulación de materia orgánica con alta saturación de bases, desarrollo de estructura en bloques subangulares y angulares (gruesos y medianos) y, como producto residual de una intensa karstificación, así como del material que se recibe de las partes altas, los suelos se caracterizan por tener altos porcentajes de arcilla, que tienden a formar capas impermeables y con ello un flujo lento del agua, además, las planicies acumulativas presentan una pendiente casi nula, que favorece el estancamiento semipermanente o estacional de las aguas pluviales por lo que prevalece el hidromorfismo y las condiciones anaerobias, mostrando un patrón de color stágnico muy evidente. Igualmente como resultado de periodos alternos de humedad y sequedad en el suelo se observa la formación de concreciones de tipo calcita en Feozem réndzico y tipo Fe-Mg en Vertisol stágnico. Por otra parte hay pérdida de bases por lixiviación a excepción del Feozem réndzico que muestra un pH ligeramente alcalino con valores mayores a 7.0 y reacción a HCl en todo el perfil, donde el material parental consistente en material calcáreo, ejerce una fuerte influencia en la reacción del suelo.

En el perfil clasificado como Feozem réndzico se encuentra una secuencia de horizontes Ah-AC-Cwk con un horizonte de acumulación de materia orgánica grueso, bien estructurado y moderado contenido de materia orgánica que está por encima de material calcáreo poco intemperizado con estructura masiva. El Vertisol stágnico (presente en dos de los cuatro perfiles descritos) se caracterizan por un horizonte Ah grueso pero como proceso pedogenético dominante se encuentra la expansión y contracción de arcillas esmectíticas dando como resultado la formación de facetas de fricción-presión, acompañando de un patrón de color stágnico que refleja condiciones reductoras en el suelo además de la formación de concreciones de Fe-Mn. Por último,

el Regosol stágnico se encuentra débilmente desarrollado con una ligera acumulación de materia orgánica, presentando los siguientes horizontes Ah-ABg-Cg1-2C-3C.

El régimen climático es variado, la temperatura media anual oscila entre 17.2 y 18.7°C y la precipitación media anual varía de 908.2 a 1,211.1 mm siendo mayor en los meses de mayo a octubre (SMN, 2014a; SMN, 2014c), hacia la Localidad de El Triunfo donde se ubican los perfiles El Triunfo 1 y El Triunfo 2 se tiene una mayor precipitación, pero en general, como en el resto de la cuenca, se presentan altos volúmenes de precipitación ante los cuales el drenaje de estos suelos es de moderado a deficiente debido a capas bastante arcillosas y la poca inclinación del terreno.

Finalmente, también se identificó la unidad denominada *Lomeríos de pendiente continua denudatoria*, cuya característica principal es la diferencia en el material litológico, modelado por procesos de erosión y disección pronunciados.

Esta unidad no sigue la secuencia de evolución de paisaje kárstico ya que el material geológico que da origen a los suelos pertenece a yeso conglomerado polimíctico encontrando la siguiente asociación de suelos: **Planosol háplico (dístrico, arénico) -PL ha (dy-ar)- + Feozem háplico (arcílico) -PH ha (ce)- + Feozem lúvico (páquico, arcílico) -PH lv (ph-ce)-**.

En el Planosol, la pedogénesis está poco avanzada, el material parental se encuentra poco intemperizado y el suelo muestra una incipiente acumulación de materia orgánica y ausencia de horizontes B, con baja saturación de bases (menor a 50%) y alta pedregosidad. Por otro lado se describieron dos perfiles clasificados como Feozem, ambos poseen un horizonte de acumulación de materia orgánica grueso, bien estructurado, con alta saturación de bases y dominancia de textura arcillosa. En el caso del Feozem háplico por debajo del horizonte mólico se observó material estratificado rico en materia orgánica y para el Feozem lúvico además de la formación de un horizonte mólico se observó la formación de revestimientos de arcilla así como una incipiente iluviación de material fino.

Por lo tanto en esta unidad se pueden encontrar tanto suelos de poco desarrollo como suelos con pedogénesis medianamente avanzada. Como rasgos y procesos pedogenéticos en común se observó el desarrollo de estructura y ausencia de propiedades reductomorfas relacionadas con el exceso de humedad; sin embargo, la precipitación ha ejercido influencia a través de la lixiviación de cationes básicos ya que en todos los perfiles se observó un pH de moderada a fuertemente ácido (4.1-5.8) en horizontes superficiales.

8.4 Evaluación edafocológica de los perfiles de suelo y potenciales de uso

En el *Cuadro 6* se muestra un resumen del potencial de uso de los suelos para el soporte de vegetación, recarga de mantos acuíferos, capacidad de retención de agua y capacidad de retención de contaminantes, tomando como referencia la evaluación edafocológica de los perfiles de suelo (*Cuadro 5*) basado en lo propuesto por Siebe *et al.*, (2006), así como en las propiedades físicas y químicas determinadas en laboratorio (*Cuadro 3*).

Las características que se tomaron en cuenta para evaluar la aptitud del suelo en el soporte de plantas fueron: el contenido de bases intercambiables (BI), la disponibilidad de nutrimentos con base en el pH, disponibilidad de agua (dCC), capacidad de aireación (CA), posición de terreno y penetrabilidad de raíces, la cual depende de la densidad aparente, pedregosidad, contenido de carbonatos y tipo de estructura. Para evaluar la recarga de mantos acuíferos se tomó en cuenta la conductividad hidráulica (Kf), textura y profundidad de desarrollo del perfil de suelo. Finalmente, para determinar la capacidad de los suelos para retener agua y contaminantes se tomó en cuenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la profundidad de desarrollo, conductividad hidráulica y textura del suelo. La CIC, CA, dCC y BI se evaluaron dentro de la profundidad fisiológica (es decir el espesor de suelo en el que pueden penetrar y desarrollarse potencialmente las raíces) de acuerdo con Siebe *et al.*, (2006) conforme lo siguiente: Para la CIC en cmol_c/kg (0-5 muy baja, 5-10 baja, 10-20 regular, 20-40 mediana, 40-80 alta, >80 muy alta); CA en % (0-3 muy baja, 3-7 baja, 7-12 mediana, 12-18 alta); dCC en L/m^2 (0-50 muy baja, 50-90 baja, 90-140 mediana, 140-200 alta, >200 muy alta); BI en mol_c/m^2 (0-5 muy baja, 5-10 baja, 10-25 regular, 25-50 mediana, 50-100 medianamente alta, 100-200 alta, >200 muy alta) y para la kf en $\text{cm}/\text{día}$ (0-1 muy baja, 1-10 baja, 10-40 mediana, 40-100 alta, 100-300 muy alta). Dicha evaluación se presenta en el *Cuadro 5*.

Cuadro 5. Resumen de evaluación edafocológica de perfiles de suelo

Tipo de suelo/ Geoforma	Prof. (cm)	Pen. Raíces ¹	Dis.Nut. ²	CIC ³	Poros	CA ⁴	dCC ⁵	CC ⁶	Kf ⁷	BI ⁸	Drenaje	Limitantes para el desarrollo de las Plantas ⁶
Leptosol réndzico Plegamientos	11	mediana	buena	alta	finos	mediana	muy baja	muy baja	mediana	medianamente alta	bueno	D.A alta, CA mediana dCC y CC muy bajas y estructura angular.
Leptosol lítico Relieve mesiforme	29	buena en primeros 5 cm	buena	alta	finos y muy finos	baja-mediana	muy baja	muy baja	alta	mediana	bueno	Perfil somero, pedregosidad mayor a 75% que restringe la cantidad de nutrimentos y agua por m ² , CA baja-mediana, CC y dCC muy bajas.
Cambisol háplico Relieve mesiforme	50	buena	buena	mediana	finos y muy finos	baja	baja	baja	mediana	medianamente alta	moderado	Acumulación de CaCO ₃ en el horizonte Cwk, baja CA, baja CC y baja dCC, textura muy arcillosa.
Leptosol mólico Mogotes	70	deficiente	buena	alta	finos	mediana	baja	baja	medianamente alta	alta	bueno	Acumulación de CaCO ₃ , D.A. mediana y alta pedregosidad.
Feozem stágnico Antigua planicie kárstica	110	buena hasta 48 cm	buena	alta	finos y muy finos	baja	muy alta	muy alta	baja	muy alta	deficiente	Estructura angular, acumulación de CaCO ₃ y D.A. mediana después de 48 cm.
Feozem stágnico Planicie kárstica alta	105	buena	buena	alta	muy finos a medios	baja	mediana	medianamente alta	mediana	muy alta	moderado a deficiente	CaCO ₃ en último horizonte, CA baja y dCC mediana, textura arcillosa
Feozem stágnico Planicie kárstica alta	105	buena hasta 21 cm	buena	alta	finos y muy finos	baja-mediana	alta	alta	mediana	muy alta	moderado a deficiente	Acumulación de CaCO ₃ , estructura angular en bloques gruesos, medianos y fuertes, baja CA y textura muy arcillosa
Gleysol álico Planicie kárstica baja	45	muy buena hasta 34 cm	baja	mediana-alta	muy finos, finos y medianos	baja	mediana	mediana	baja	medianamente alta	deficiente	Se necesita instalar un sistema de drenaje para bajar la capa de agua freática. Además presenta D.A. mediana y estructura angular, baja CA, textura arcillosa, dCC y CC medianas.
Feozem háplico Valle fluvial alto	95	buena hasta 41 cm	buena	alta-muy alta	muy finos a grandes	baja	mediana	alta	mediana	muy alta	bueno a moderado	Estructura angular y acumulación de CaCO ₃ en el horizonte CwK, así como baja CA, mediana dCC, textura arcillosa.

¹Penetrabilidad de raíces; ²Disponibilidad de nutrientes; ³CIC (Capacidad de intercambio catiónico); ⁴CA (Capacidad de aireación); ⁵dCC (Agua disponible para las plantas);

⁶CC (Capacidad de campo); ⁷(Conductividad hidráulica); ⁸BI (Bases intercambiables); ⁶Limitantes para las plantas en uno o varios horizontes de los perfiles

Cuadro 5. Resumen de evaluación edafocológica de perfiles de suelo (Continuación)

Tipo de suelo/ Geoforma	Prof. (cm)	Pen. Raíces	Dis.Nut. ¹	CIC ¹	Poros	CA ²	dCC ³	CC ⁴	Kf	BI ⁵	Drenaje	Limitantes para el desarrollo de las Plantas ⁶
Vertisol stágnico Valle fluvial alto	105	buena hasta 50 cm	buena	alta	finos y muy finos	baja	alta	alta	mediana	muy alta	moderado a deficiente	Presencia de CaCO ₃ en alta concentración, baja CA y textura arcillosa.
Feozem réndzico Valle fluvial alto	38	buena hasta 14 cm	buena	alta	finos a grandes	baja	muy baja	baja	mediana	alta	moderado	Estructura angular, textura arcillosa y una acumulación fuerte de CaCO ₃ en el horizonte CwK, también CA, CC dCC bajas.
Fluvisol stágnico Valle fluvial bajo	100	buena hasta 31 cm	buena	regular- alta	muy finos a gruesos	baja-muy alta	alta	mediana	mediana	muy alta	moderado	Acumulación de CaCO ₃ y D.A. alta, CC mediana y baja CA.
Feozem réndzico Planicie lacustre	105	buena hasta 25 cm	buena	alta	micro y finos	baja	mediana	alta	mediana	muy alta	moderado	Estructura masiva y CaCO ₃ en un porcentaje mayor a 50% por debajo de 51 cm, además de CA baja.
Vertisol stágnico Planicie lacustre	90	buena hasta 20 cm	mediana	alta	muy finos a gruesos	baja	mediana	alta	mediana	muy alta	moderado a deficiente	A partir del segundo horizonte estructura angular y masiva, presencia de slickensides, CA y CC medianas y textura arcillosa.
Vertisol stágnico Planicie lacustre	110	muy buena hasta 20 cm	mediana	muy alta	finos y medianos	baja	mediana	alta	baja a mediana	muy alta	deficiente	Baja CA y dCC mediana, textura arcillosa, pedregosidad mediana en últimos dos horizontes (73-110 cm).
Regosol stágnico Planicie lacustre	54	buena	buena	mediana- alta	finos y muy finos	baja	baja	alta	mediana	alta	moderado a deficiente	Textura arcillosa que le confiere baja CA al suelo y baja dCC.
Planosol háplico Lomeríos de pendiente	70	mediana- deficiente	baja	baja- mediana	finos a grandes	baja- mediana	baja	muy baja	mediana a alta	regular	bueno	D.A. y pedregosidad alta, dCC baja, CC muy baja y CA baja a mediana.
Feozem háplico Lomeríos de pendiente	120	buena- mediana	buena	alta	finos y muy finos	baja	alta	alta	mediana	muy alta	bueno a moderado	Acumulación de CaCO ₃ , D.A. mediana, estructura angular en el segundo horizonte, textura arcillosa.
Feozem lúvico Lomeríos de pendiente	100	buena hasta 34 cm	buena	alta	muy finos a medios	baja	mediana	alta	mediana	muy alta	moderado	Pedregosidad baja, D.A. mediana y estructura en bloques angulares, gruesos y fuertes, textura arcillosa, baja CA y mediana dCC.

¹Penetrabilidad de raíces; ²Disponibilidad de nutrientes; ³CIC (Capacidad de intercambio catiónico); ⁴CA (Capacidad de aireación); ⁵dCC (Agua disponible para las plantas);

⁶CC (Capacidad de campo); ⁷(Conductividad hidráulica); ⁵BI (Bases intercambiables); ⁶Limitantes para las plantas en uno o varios horizontes de los perfiles

Cuadro 6. Potenciales de uso para cada tipo de suelo asociado a geomorfología de la cuenca

Unidad Morfogénica	Asociación de suelo	Uso de suelo	Soporte para las plantas	Recarga de acuíferos	Retención de agua	Retención de contaminantes
Plegamientos de estructuras mesiformes	Leptosol réndzico (eútrico)	Bosque de pino-encino, uso potrero	+	++	+	+
Relieve mesiforme	Leptosol lítico (eútrico)	Matorral espinoso	+	+++	+	++
	Cambisol háplico (húmico, eútrico, arcílico)	Agrícola de temporal (frijol y maíz)	++	+	+	++
Mogotes y dolinas	Leptosol mólico (calcárico, esquelético)	Matorral espinoso	++	+++	+	++
Antigua planicie kárstica	Feozem stágnico lúvico (calcárico, páquico, arcílico)	Agrícola (jitomate)	+++	+	+++	+++
Planicie kárstica alta	Feozem stágnico lúvico (glósico, arcílico)	Agrícola de temporal (maíz)	+++	+	++	+++
	Feozem stágnico lúvico (calcárico, arcílico)	Cambio de pastizal a sembradío de Bambú	+++	+	+++	+++
Planicie kárstica baja	Gleysol álico (dístrico, arcílico)	Agrícola (maíz, tomate, frijol, pepino)	+	+	++	++
Valle fluvial alto	Feozem háplico (arcílico)	Agrícola (rotación de lechuga, flores)	+++	++	+++	+++
	Vertisol stágnico (hipereútrico)	Agrícola (maíz de temporal)	+++	+	+++	+++
	Feozem réndzico arcílico	Agrícola (maíz, frijol)	++	++	+	++
	Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico)	Pastizal	++	++	++	++
Planicie de acumulación origen lacustre	Feozem réndzico (páquico, arcílico)	Bosque perturbado de pino-encino	++	++	+++	+++
	Vertisol stágnico (húmico, mesotrófico)	Agrícola (maíz de temporal)	+++	+	+++	+++
	Vertisol stágnico (mesotrófico, hipereútrico, pélico)	Agrícola (frijol, maíz, jitomate)	+++	+	+++	+++
Lomeríos de pendiente continua denudatoria	Regosol stágnico (eútrico, arcílico)	Agrícola de temporal (maíz, frijol)	++	+	+++	++
	Planosol háplico (dístrico, arénico)	Bosque de pino-encino alterado	+	+++	+	+
	Feozem háplico (arcílico)	Agrícola de temporal (maíz, frijol) y pastoreo	+++	++	+++	+++
	Feozem lúvico (páquico, arcílico)	Agrícola (frijol y maíz)	+++	++	+++	+++

Potencial de uso de suelo: alto (+++), medio (++) y bajo (+).

A continuación se presenta una discusión de la evaluación edafocológica y los potenciales de uso de suelo agrupados en cada una de las geoformas presentes en la cuenca río Grande-Lagunas de Montebello.

a- Plegamientos de estructuras mesiformes asociado a Leptosol réndzico

El suelo se encuentra en un sitio con eventos periódicos de precipitación alta pero carece de características redoximorfias relacionadas al exceso de humedad ya que tiene una conductividad hidráulica (kf) mediana y presenta condiciones de drenaje natural bueno, el agua se infiltra bien, pero no con rapidez. Por otro lado el suelo tiene buena disponibilidad de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables (BI) altas; sin embargo, la profundidad de desarrollo es la principal limitante para el establecimiento de la vegetación, siendo un suelo muy somero limitado por roca caliza con desarrollo de estructura angular (desfavorable para la penetrabilidad de raíces), aunado a una capacidad de aireación (CA) mediana, capacidad de campo (CC) y agua disponible para las plantas (dCC) muy bajas, además de condiciones climáticas desfavorables para la descomposición de la hojarasca (alta humedad, baja temperatura) por lo que la mineralización de la materia orgánica tiende a ser lenta. Estas características son desfavorables para el desarrollo de la agricultura mientras que la recarga de mantos acuíferos y la conservación de bosque de coníferas se ven favorecidas, ya que éste tipo de vegetación está adaptada a dichas condiciones climáticas y edafológicas.

b- Relieve mesiforme asociado a Leptosol lítico y Cambisol háplico

En general se observan valores de pH de ligera a moderadamente ácidos (5.2-6.6), aunque no representan mayor problema en la disponibilidad de nutrientes, sin embargo, presenta varias limitantes para el desarrollo de la vegetación, entre ellas la profundidad fisiológica, teniendo, en el caso del Leptosol un suelo muy somero (29 cm) limitado por una pedregosidad mayor a 75%, conformada por roca caliza, la cual restringe la penetrabilidad de raíces y la cantidad de nutrientes y agua por m^2 , mientras que en el Cambisol se tiene una profundidad fisiológica de 50 cm limitada por una alta acumulación de $CaCO_3$ en el horizonte Cwk. También, ambos suelos se evaluaron con baja CA, dCC y CC, además de una textura muy arcillosa con dominancia de poros finos y muy finos en donde el agua queda atrapada y retenida con tensiones muy fuertes a las que las plantas no pueden acceder, por lo que el uso potencial del suelo para fines agrícolas queda limitado a la época de lluvias, a menos de que el suelo sea regado en la época de secas para compensar el déficit hídrico, además de presentar serios inconvenientes para una buena

oxigenación de las plantas. Para el caso del Leptosol ubicado en una pendiente fuerte se recomienda conservar la vegetación natural, ya que el matorral le confiere estabilidad al suelo, previene la erosión y favorece la recarga de mantos acuíferos ya que el suelo tiene una Kf alta y condiciones de drenaje natural bueno.

Ambos suelos son susceptibles a la erosión, por un lado el Leptosol se ubica en una ladera con mediana inclinación (25°) que ejerce una fuerza erosiva importante aunado a que ya hay evidencia de erosión laminar baja y por otro lado el Cambisol presenta desarrollo de estructura granular en el horizonte superficial, de tamaño fina a muy fina y de grado débil con estabilidad de agregados muy baja, por lo que es necesario tener prácticas enfocadas a la conservación del suelo.

c- Mogotes y dolinas asociado a Leptosol mólico

Suelo medianamente profundo, de textura franca a franca limosa que le confiere al suelo una conductividad hidráulica (Kf) mediana a alta y condiciones de drenaje natural bueno. El suelo tiene buena disponibilidad de nutrientes (CIC y BI altas y pH muy ligeramente alcalino); sin embargo presenta como limitantes para el desarrollo de las plantas una deficiente penetrabilidad de raíces debido a la acumulación de CaCO₃, densidad aparente (DA) mediana y alta pedregosidad, así como una CA mediana, dCC y CC bajas, que en conjunto limitan el uso potencial del suelo para fines agrícolas, por lo que este suelo es más apto para la recarga de mantos acuíferos y conservación de la vegetación de matorral como medida preventiva a la erosión, ya que el horizonte superficial (con estructura granular fina y baja estabilidad de agregados) es susceptible a la pérdida del suelo.

d- Antigua kárstica cubierta con material residual asociada a Feozem stágnico

Suelo profundo y muy arcilloso que genera condiciones de drenaje deficiente, sin embargo presenta buenas aptitudes para el uso agrícola como buena disponibilidad de agua (dCC alta) y nutrimentos (pH ligeramente alcalino), BI y CIC altas, buena penetrabilidad de raíces hasta 48 cm, pero por debajo de esta profundidad la penetrabilidad se complica debido al desarrollo de estructura angular, así como acumulación de CaCO₃ y DA mediana. Un problema importante relacionado a altos porcentajes de arcilla es la baja capacidad de aireación que compromete el desarrollo de las plantas, por lo que se debe considerar en el manejo agrícola; por otro lado la alta CC y CIC indica que es un suelo con buena aptitud para la retención de agua y contaminantes, mientras que la kf baja indica poca aptitud del suelo para la recarga de mantos acuíferos.

e- Planicie kárstica alta asociada a Feozem stágnico

En esta unidad geomorfológica se desarrollan suelos profundos de espesores mayores a un metro, con una importante reserva de cationes básicos, mediana a alta CC, con pH neutros a ligeramente alcalinos (6.7-7.5) que indican buena disponibilidad de nutrimentos. Estas características son buenas para el establecimiento de la agricultura, aunque, los suelos presentan algunos inconvenientes que deben considerarse para esta actividad, como problemas de aireación debido a las texturas arcillosas con dominancia de poros finos y muy finos en donde el agua es retenida con fuertes tensiones pudiendo generar problemas de déficit hídrico en la época de secas. También en algunos horizontes subsuperficiales se observó una o más de las siguientes características: desarrollo de estructura angular, DA alta y acumulación de CaCO_3 , las cuales complican la penetrabilidad de raíces.

La Kf en estos suelos se evaluó como mediana, con condiciones de drenaje natural moderado a deficiente por lo que contribuyen muy poco a la recarga de mantos acuíferos pero poseen potencial agrícola, así como buena retención de contaminantes y agua debido a una CIC alta y un espesor de suelo mayor a un metro.

f- Planicie kárstica baja asociada a Gleysol álico

Suelo de profundidad mediana, muy arcilloso (con porcentajes de arcilla mayores a 70%), con un drenaje deficiente por lo que el agua se infiltra con lentitud y el suelo se encuentra periódicamente mojado debido a que está saturado con agua freática en algunos periodos del año. Por otro lado el pH fuertemente ácido (4.0-4.7) limita la disponibilidad de nutrimentos para las plantas sobre todo fósforo, boro y molibdeno; sin embargo, el suelo tiene una CIC mediana a alta y una reserva de cationes básicos medianamente alta. El suelo tiene buena penetrabilidad de raíces en los primeros 34 cm ya que por debajo hay desarrollo de estructura angular en bloques gruesos y DA mediana. Otras limitantes para el desarrollo de las plantas son una baja CA que restringe la cantidad de oxígeno, por lo que su uso potencial para fines agrícolas presenta varias restricciones principalmente la necesidad de instalar un sistema de drenaje para bajar la capa de agua freática. El uso óptimo del suelo recae en la conservación de vegetación nativa debido a las características del suelo y posición en el paisaje.

g- Valle fluvial alto asociado a Vertisol stágnico y Feozem háplico y réndzico

Estos suelos se caracterizan por un mediano a profundo desarrollo, con alta disponibilidad de nutrimentos y una importante reserva de cationes básicos. Los suelos tienen buena penetrabilidad de raíces en los primeros horizontes pero hacia la profundidad la penetrabilidad se ve disminuida principalmente por el desarrollo de estructura angular y horizontes de acumulación de CaCO_3 . Otro problema común es la baja CA resultado de la presencia de texturas arcillosas con muy altos porcentajes de arcilla.

En cuanto a la infiltración del agua los suelos clasificados como Feozem presentan mejores condiciones de drenaje que el Vertisol, en el cual se observaron características redoximorfas, aunque en todos los suelos el drenaje se califica como moderado a deficiente por lo que la infiltración del agua ocurre con lentitud en algunos periodos del año. La disponibilidad de agua muestra variación dependiendo del tipo de suelo, para el Feozem réndzico que tiene una menor profundidad de desarrollo la disponibilidad de agua es baja, mientras que el Feozem háplico tiene mediana disponibilidad de agua debido a un mayor espesor de desarrollo, de manera que en estos suelos el uso potencial para fines agrícolas se limita a la época de lluvias, a menos de que sea regado en época de secas. Por último, el Vertisol muestra alta disponibilidad de agua para las plantas así como alta capacidad de campo, por lo que estos suelos poseen considerable potencial agrícola; sin embargo, las propiedades físicas y el régimen de humedad de los Vertisoles representan serias restricciones de manejo ya que la textura y el predominio de minerales de arcilla expandible resultan en un rango de humedad del suelo entre estrés hídrico y exceso de agua, además de que la labranza se obstaculiza por la adhesividad cuando el suelo está mojado y dureza cuando el suelo está seco.

Por otro lado para el Feozem réndzico el desarrollo de estructura subangular fina con muy baja estabilidad de agregados en el primer horizonte establece susceptibilidad a la erosión, si no hay buen manejo del suelo.

h- Planicie de acumulación de origen lacustre asociada a Regosol stágnico, Feozem réndzico y Vertisol stágnico

Suelos de profundo desarrollo, arcillosos y prácticamente con poca pedregosidad como resultado de una pedogénesis avanzada, DA medianas, CC, CIC y BI altas. En cuanto a la disponibilidad de nutrimentos se evaluó de mediana a alta, dependiendo del pH el cual varía de fuertemente ácido a

ligeramente alcalino (4.7-7.5) mostrando mayor acidez y por lo tanto menor disponibilidad de nutrimentos en el Vertisol stágnico.

En general son suelos que tienen un mal drenaje con conductividad hidráulica baja a mediana siendo el Vertisol el que presenta mayor problema para la infiltración del agua. Se observa buena penetrabilidad de raíces en los primeros horizontes disminuyendo en profundidad principalmente por desarrollo de estructura angular o masiva y horizontes de acumulación de CaCO_3 , otro problema que presenta el suelo es una baja CA que genera estrés debido a la falta de oxígeno.

El potencial de los suelos para su uso agrícola depende de numerosos factores pero está fuertemente relacionado con la disponibilidad de agua, al respecto, estos suelos se evaluaron con una dCC baja a mediana ya que a pesar de ser suelos con una espesa profundidad fisiológica presentan texturas arcillosas y en algunos horizontes poros muy finos donde el agua queda fuertemente retenida y no puede ser absorbida por la mayoría de las plantas por lo que disponibilidad de agua se ve limitada en época de secas; sin embargo, no representa mayor problema para la agricultura de temporal, además los suelos poseen cualidades favorables para la retención de agua y contaminantes. Pero para el caso del Feozem réndzico, que tiene una profundidad fisiológica de 50 cm y por debajo estructura masiva con alta cantidad de CaCO_3 y el cual se desarrolla vegetación de matorral espinoso, se recomienda conservar el uso de suelo ya que presenta poca aptitud para el soporte de la agricultura.

i- Lomeríos de pendiente continua asociado a Planosol háplico y Feozem háplico y lúvico

En general son suelos de desarrollo mediano a profundo, con una Kf baja a mediana y condiciones de drenaje natural moderado pero sin presentar características redoximorfias, en cuanto al pH presentan valores de fuertemente ácidos a ligeramente alcalinos (4.2-7.5), siendo el Planosol el suelo con mayor acidez y por lo tanto con menor disponibilidad de nutrimentos, como fósforo, boro y molibdeno además de presentar una CIC baja-mediana y contenido regular de BI. Mientras que los Feozem se evaluaron son CIC y BI altas.

Por lo tanto esta unidad está representada por suelos incipientes y suelos más desarrollados, con muy variadas características que implican diferencias en el potencial de uso. En cuanto al Planosol se observó una deficiente penetrabilidad de raíces resultado de DA y pedregosidad altas, que, como se mencionó anteriormente restringe la cantidad de nutrimentos y agua por m^2 dando como resultado una baja (dCC), CC y CA. Por lo anterior, la aptitud natural de este suelo es la

conservación de la vegetación natural (bosque de pino-encino) que se encuentra adaptada a dichas condiciones, además el sistema radicular de la vegetación de coníferas, así como el depósito de hojarasca le confiere estabilidad al suelo, previene la erosión y favorece la recarga de mantos acuíferos, mientras que el uso agrícola está limitado por varios factores, principalmente el déficit de agua, oxígeno, nutrimentos y una deficiente penetrabilidad de raíces. En cuanto a los suelos de tipo Feozem háplico y lúvico se observó mediana a buena penetrabilidad de raíces y buena disponibilidad de agua y nutrimentos, pero con textura arcillosa que le confiere a los suelos una baja CA generando estrés en las plantas por falta de oxígeno siendo ésta la mayor limitante para su uso agrícola, por lado, éstos suelos poseen buena aptitud para la retención de agua y contaminantes debido a una CIC y CC altas.

En el horizonte superficial del Planosol se observó en campo una estabilidad de agregados mediana, además de evidencia de erosión en cárcavas, por lo que el terreno tiene alta susceptibilidad a la erosión y necesita medidas urgentes para mitigar este problema. Cabe mencionar que en los Feozem se observó alta estabilidad de agregados con estructura en bloques subangulares, grandes y fuertes, por lo que la susceptibilidad a la erosión es muy baja.

IX. DISCUSIÓN

En el área de estudio la piedra caliza-dolomía, caliza-lutita, aluvión y yeso conglomerado polimíctico son identificados y mapeados como las principales formaciones geológicas (CONAGUA, 2009), sobre estos materiales actúan procesos kársticos, los cuales juegan un papel determinante en la evolución del paisaje en la cuenca Rio grande-Lagunas de Montebello dando lugar a una variedad de geoformas sobre las cuales se ha desarrollado una diversidad de tipos de suelo. La evolución del paisaje kárstico al igual que la formación de los suelos es el resultado de un gran número de factores que actúan conjuntamente y que deben tenerse en cuenta a la hora de su estudio. Entre ellos se encuentran los factores climáticos (cantidad y régimen de precipitación y temperatura), relieve (altitud, pendiente, presencia del nivel del mar), cubierta vegetal, tiempo de evolución y características litológicas (mineralogía, textura, espesor, permeabilidad) (Fernández *et al.*, 1995; Huddart y Stott, 2010).

Varios estudios han evaluado la relación entre la geomorfología y la pedología encontrando patrones de distribución de suelos asociados a las formas del relieve (Siebe, *et al.*, 2003; Palacio *et al.*, 2005; Bautista *et al.*, 2011; Solís *et al.*, 2014). En cuanto a las unidades geomorfológicas de la cuenca cada una posee características que condicionan muchos de los procesos pedogenéticos imprimiendo particularidades a las unidades de suelo asociadas. A su vez, las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje determinan su potencial de uso y la susceptibilidad a ser dañados por procesos como son erosión laminar, incisión de cárcavas y movimientos en masa.

En la cuenca los suelos de tipo Leptosol son someros, con fragmentos rocosos y baja fertilidad limitados en gran medida por la profundidad fisiológica que se relaciona con una baja capacidad de retención de agua, poco contenido de nutrientes y posibilidades bajas de enraizamiento. Estos suelos se desarrollan en varias unidades geomorfológicas con distintos estados de evolución kárstica encontrándose sobre Plegamientos de estructuras mesiformes que son geoformas de reciente formación, donde la karstificación se encuentra en una etapa incipiente, también se encuentran en Relieve mesiforme que constituye una unidad de karst moderado y por último se desarrollan sobre Mogotes que corresponde a un karst cubierto avanzado. Sobre relieves mesiformes también se desarrollan Cambisoles que son suelos jóvenes de transición. La poca profundidad de desarrollo o de diferenciación de horizontes se debe a su ubicación en pendientes en donde los procesos denudativos actúan continuamente o a la ubicación sobre materiales geológicamente recientes donde los procesos pedogenéticos son incipientes.

Por lo anterior, los suelos desarrollados en el relieve mesiforme, mogotes y plegamientos de estructuras mesiformes, son particularmente frágiles y de baja resiliencia, frecuentemente con aptitudes marginales para agricultura y por lo tanto expuestos a degradación rápida, especialmente por erosión hídrica, siendo particularmente aptos para la conservación/restauración de vegetación de matorral o uso forestal sostenible dependiendo de las condiciones climáticas y edáficas, lo que permite a su vez la recarga del acuífero y captura de carbono, en especial en el relieve mesiforme donde hay una alta precipitación y condiciones de cobertura boscosa. Por otro lado los suelos son altamente susceptibles a la erosión acelerada del suelo después de la deforestación debido a una o varias de las siguientes características: estructura granular con grado débil en los horizontes superficiales, ubicación sobre laderas con fuerte pendiente o baja estabilidad de agregados, lo que refuerza el hecho de conservar estas áreas con vegetación natural.

Por otra parte encontramos unidades geomorfológicas en las que se favorece la acumulación de agua y sedimentos coluvio-aluviales y fluviales. La Antigua planicie kárstica consiste en una depresión de gran extensión cubierta por material residual, las Planicies de acumulación se forman en terrenos con disminución gradual de la pendiente y se constituyen por material de tipo coluvio-aluvial, mientras que el Valle fluvial y las Planicies kársticas alta y baja se constituyen a partir de materiales calcáreos. En conjunto, estas unidades geomorfológicas tienen un relieve marcadamente plano en donde domina la formación de Feozem y Vertisol ya sea réndzico, háplico o stágnico dependiendo de las condiciones del perfil, pero también podemos encontrar suelos aluviales clasificados como Fluvisoles que muestran estratificación de material de origen flúvico, resultado de frecuentes fenómenos de depositación, y en el caso de las planicies bajas donde hay fluctuación del nivel freático se desarrollan Gleysoles. En general debido a la topografía, que resulta en unidades geomorfológicas estables en tiempo y espacio que permiten el desarrollo de procesos pedogenéticos se encuentran suelos con una pedogénesis avanzada mostrándose en una mayor profundidad de desarrollo de un mínimo de 80 cm de espesor (ofreciendo así mejores posibilidades de enraizamiento y mayor espacio radicular para la asimilación de agua y nutrientes para las plantas), con ausencia o muy baja pedregosidad, acumulación de materia orgánica y desarrollo de estructura en bloques subangulares y angulares, así como un alto abasto de bases intercambiables, mientras que los procesos de óxido reducción relacionados con la dificultad de movimiento del flujo de agua están fuertemente marcados, a su vez estos procesos se relacionan con la dominancia de texturas arcillosas que generan un taponamiento de poros debido a la

iluvación de arcillas. Con base en estas características se califica a los suelos con buena aptitud para el desarrollo de la vegetación pero al mismo tiempo presentan varias limitantes para las actividades agrícolas ya que los suelos están mal drenados y aireados, además de que en época de estiaje pueden presentar déficit hídrico debido a la dominancia de texturas arcillosas con presencia de microporos en donde el agua queda retenida con fuertes tensiones. Por otro lado poseen buena aptitud para la retención de contaminantes y agua (suelos de profundo desarrollo con CIC y CC altas) y características desfavorables para la recarga de mantos acuíferos (mal drenaje, baja a mediana kf).

En la unidad correspondiente a Lomeríos de pendiente continua, los suelos se desarrollan sobre materiales geológicos de poca karstificación, dando origen a Feozem (lúvico o háplico) asociado a Planosol háplico caracterizado por ser un suelo inmaduro con poca diferenciación de horizontes, a excepción de un cambio textural abrupto, formado a partir de conglomerados polimícticos, en donde se observó una intensa erosión en cárcavas y sobre el cual se desarrolla vegetación de pino-encino que se encuentra en estado alterado (*Figura 10*), por lo que la zona requiere de medidas urgentes para la conservación del bosque y mitigación de la erosión.

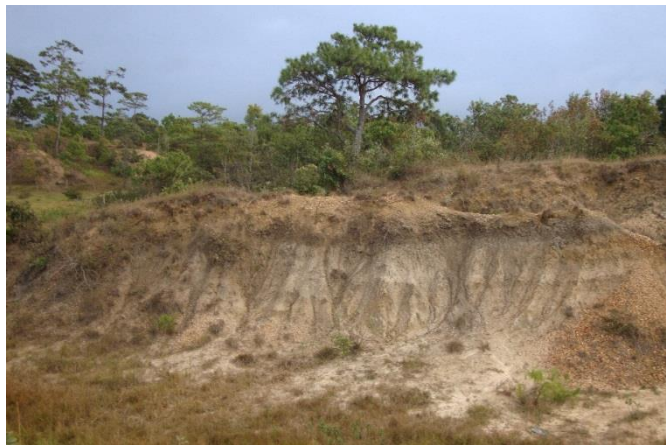


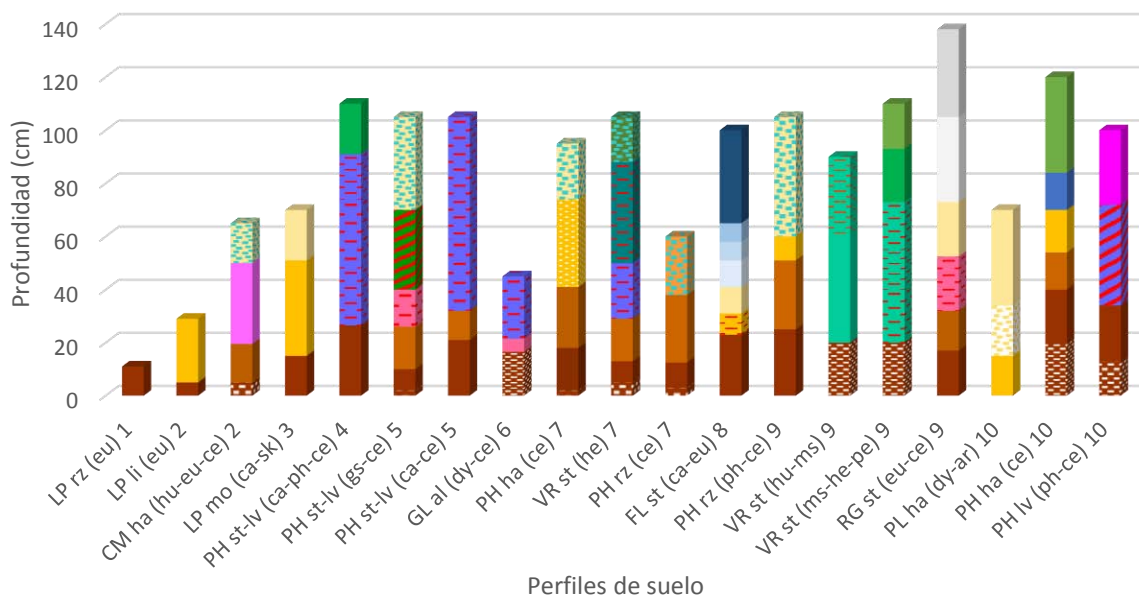
Figura 10. Santa Rita, El Lavadero, suelo clasificado como Planosol háplico ubicado en una colina fuertemente disectada con evidencias de erosión y vegetación perturbada de pino encino.

En las parte baja de la Cuenca se encuentra la mayor parte del PNLN, en el cual se ha reportado una intensa karstificación (SEMARNAT-CONANP, 2007) y se han identificado los siguientes tipos de suelos: Leptosoles, Vertisoles, Acrisoles, Fluvisoles y Gleysoles (Vásquez y Méndez, 1994; INEGI, 2000). En este estudio solo se caracterizaron suelos de tipo Gleysol, los cuales se encuentran concentrados en las partes más bajas del relieve, en los puntos más bajos de depresiones

influenciadas por el manto freático, por lo que se caracterizan por un pronunciado hidromorfismo, consecuencia de la inundación permanente o temporal, en el cual, la agricultura presenta muchas limitantes y contribuye de manera importante a la degradación del suelo, así como a la contaminación del agua por su relación con el nivel freático. El problema en estos suelos se suma a la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, la urbanización, el turismo y la explotación del agua que influyen negativamente en las zonas kársticas de la cuenca, las cuales requieren de protección especial debido a que son zonas que exhiben una importante biodiversidad, además de que los acuíferos kársticos son valiosos recursos de agua dulce, pero muy vulnerables a la contaminación como lo reporta Goeppert (2011).

Actualmente las Lagunas de Montebello y su zona de influencia se mantienen en categoría de protección y se aprovechan como atractivo turístico debido a los servicios ambientales y de recreación que proporciona; sin embargo, el avance de la agricultura se ha hecho notar (SEMARNAT-CONANP, 2007). Por lo tanto, se considera pertinente conservar la calidad ambiental y detener el avance de la frontera agrícola ya que la zona presenta un gran potencial para el desarrollo de vegetación forestal asociado a una alta aportación de servicios ambientales, entre ellos la recarga de agua, inhibición de la erosión, apoyo a las acciones de ecoturismo y almacenamiento de carbono debido al tipo de humus que generan los bosques de pino-encino mientras que, como lo define Jaramillo (2012) la eliminación de la vegetación y del suelo reduce la evapotranspiración y aumenta la precipitación efectiva generando una importante escorrentía y sedimentación que terminan en el deterioro de las aguas subterráneas.

Considerando toda la Cuenca los procesos pedogenéticos dominantes que se infieren de los calificadores de primer y segundo orden establecidos por la WRB (2007) son: desarrollo de propiedades stágnicas debido al estancamiento del agua superficial (horizontes Bg), acumulación iluvial de arcilla (horizontes Bt), acumulación de CaCO_3 (réndzico o calcárico dependiendo del porcentaje de material calcárico), desarrollo de propiedades vérticas (Bss) que se manifiestan en la presencia de grietas y caras de deslizamiento, texturas arcillosas en una capa de 30 cm o más de espesor, saturación de bases mayor a 50% (eútrico, mesoeútrico o hipereútrico) y en menor proporción se encontró saturación de bases menor a 50% (dístricos). La *Figura 11* muestra la secuencia de horizontes de los perfiles descritos en cada una de las unidades geomorfológicas.



Grupo de referencia WRB		Calificador 1er. Orden		Calificador 2do. Orden	
(PH)	Feozem	(st)	stágnico	(ca)	calcárico
(LP)	Leptosol	(lv)	lúvico	(ph)	páquico
(VR)	Vertisol	(mo)	mólico	(ce)	arcílico
(RG)	Regosol	(rz)	réndzico	(hu)	húmico
(CM)	Cambisol	(ha)	háplico	(sk)	esquelético
(FL)	Fluvisol	(li)	lítico	(ms)	mesotrófico
(GL)	Gleysol	(al)	álico	(he)	hipereútrico
				(pe)	pélico
				(eu)	eútrico
				(dy)	dístrico
				(ar)	arénico
				(gs)	glósico

1) Plegamientos de estructuras mesiformes, 2) Relieve mesiforme, 3) Mogotes y dolinas, 4) Antiguos poljes 5) Planicie kárstica alta 6) Planicie kárstica baja 7) Valle fluvial alto 8) Valle fluvial bajo 9) Planicie de acumulación lacustre 10) Lomeríos de pendiente continua denudatoria.

Figura 11. Secuencia de horizontes de los perfiles descritos en cada una de las unidades geomorfológicas.

Puede observarse que indistintamente de la geoforma en todos los perfiles existe un horizonte con acumulación de materia orgánica (Ah) cuyo espesor varía de 5 a 50 cm, y de las propiedades físicas y químicas (*Cuadro 3*) se puede observar que de manera general el contenido de materia orgánica en éstos horizontes es mediano (2-4%), a excepción de los suelos que soportan vegetación natural ya sea forestal, matorral o pastizal lo cual le confiere al suelo valores altos de materia orgánica en los horizontes Ah, así, los porcentajes fueron los siguientes: Potrero-Ojo de Agua (11.1-6.3), Carrizal-Bambus (11.2-10.7%), San Miguel Tinajab (12.2-11.1), San Antonio La Patria (12.4-7.6) y finalmente Carrizal Parte Alta (15.1%) el cual se debe al desarrollo de humus tipo mor.

En la *Figura 11* también se puede observar que en la mayoría de los perfiles el horizonte superficial se encuentra perturbado (Ap) debido a que pertenecen a parcelas agrícolas, cuya principal actividad es la siembra de maíz, frijol y jitomate en donde el manejo del suelo conlleva a la pérdida de la estructura y materia orgánica, lo que explica los contenidos más bajos de materia orgánica de los perfiles correspondientes a parcelas agrícolas en comparación con los que tienen una cobertura vegetal natural, por lo que las técnicas de manejo agrícola se deben de enfocar a la conservación estas propiedades debido a su importancia en el suelo. Para Jaramillo (2002) la materia orgánica tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo principalmente la estructura (favorece su formación, aumenta el tamaño y estabilidad de los agregados) con esto se mejora la aireación, la porosidad, la permeabilidad, la velocidad de infiltración, el drenaje y el desarrollo radicular reduciendo en gran medida la susceptibilidad del suelo a la erosión. La acumulación de humus incrementa la CIC del suelo y con ello se incrementa la capacidad de retener agua, además de que se reducen y evitan las pérdidas de bases por lixiviación, y por otro lado almacena compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o metales pesados que llegan al suelo dificultando su transporte a ecosistemas acuáticos.

Cabe señalar que la agricultura es una de las principales actividades económicas que se realizan en la cuenca y que tienen la característica de ser altamente consumidoras de agroquímicos. Los PRPC (SAGARPA-FIRCO, 2007) y los Diagnósticos Socioeconómicos (Pérez *et al*, 2007) reportan que en la porción de la cuenca La Independencia y La Trinitaria, el Río Grande se encuentra fuertemente contaminado por agroquímicos y aguas negras del municipio de Comitán, las cuales desembocan en el sistema de humedales que se localiza en las cercanías del PNL. Por lo que en estas

localidades se debe poner un freno al uso de agroquímicos y tener prácticas agrícolas sustentables.

Una característica particular en toda la cuenca, independientemente del grado de pedogénesis, es el desarrollo de horizontes muy arcillosos tanto en suelos incipientes como en suelos de mayor evolución. En el *Cuadro 3* se observa que prácticamente dominan las texturas arcillosos a excepción de los perfiles San Miguel Tinajab (Leptosol mólico) que presenta texturas francas, El Carrizal (Fluvisol stágnico) con variación textural de arenosa, arenosa franca y arcillo arenosa y Santa Rita-El Lavadero (Planosol háplico) con texturas arenosas que se originan de un material parental de conglomerados polimícticos, para los demás suelos se observó un alto porcentaje de arcilla (superior a 50%) sin embargo, en el valle fluvial alto y en las planicies kársticas (alta, baja, de acumulación lacustre y antigua planicie cubierta con material residual) se presentaron los mayores porcentajes de arcilla, principalmente en los suelos Vertisol stágnico (Perfil Cuajilote, Triunfo 1), Gleysol álico (Potrero-Ojo de agua), Feozem stágnico (Los Higos, Carrizal-Bambus) y Feozem háplico (Sociego) con contenidos de material arcilloso superiores a 70% y llegando hasta 95%, lo cual que tiende a azolver el terreno mediante procesos de iluviación, en el cual la precipitación juega un papel importante al favorecer la movilización de las partículas finas de los horizontes superficiales a horizontes más profundos. El origen de estas texturas se debe a que los residuos de piedra caliza y dolomita contienen cierto porcentaje de elementos insolubles en su composición a menudo ricos en arcillosa y limo (Schaetzl y Anderson, 2005), en las calizas margosas el porcentaje de arcilla alcanza 5 a 35% (Galán, 1991). A medida que avanza el proceso de disolución, estos minerales insolubles se recogen en la parte superior de la superficie del lecho de roca como material residual arcilloso, parte de este material es transportado por el agua en las aberturas en la roca madre llegando a obstruirlas (Goepfert, 2011). Cuanto mayor es el tenor en insolubles de las calizas, más difícil resulta su karstificación, ya que el residuo de la disolución tiende a colmatar las fisuras y las cavidades (Galán, 1991).

Al respecto varios investigadores han reportado la colmatación parcial por arcillas de descalcificación en suelos desarrollados en ambientes kársticos que hacen los terrenos impenetrables, principalmente sobre las planicies. En un estudio realizado en el karst de Cantabria se observó esta situación, el conjunto de sumideros (dolinas, torcas, uvalas) que recogen el agua de escorrentía superficial y a través de conductos verticales la llevan al interior presentó colmatación de arcillas dando lugar a depresiones bastante impermeables (Ortega, 2000). En otro

estudio realizado en suelos de la Península de Yucatán, Bautista *et al.*, (2005a) y Bautista *et al.*, (2005b) reportan que las planicies acumulativas, cuando son cubiertas por extensos depósitos de terra rosa (arcillas no solubles de la caliza) pueden llegar a azolvar el nivel superficial debido al exceso de estos depósitos, deteniéndose el desarrollo de tales geoformas e incluso, pueden formarse cuerpos de agua debido a la impermeabilidad de la terra rosa que impide que el agua se siga infiltrando. Esta expresión representa una etapa avanzada de la karstificación de forma aislada y dispersa que genera un drenaje superficial deficiente.

Las unidades geomorfológicas no son independientes entre sí, por ejemplo, los Mogotes son geoformas erosivas que depositan material en las partes bajas de la cuenca, mientras que la Antigua planicie kárstica es una gran depresión que por su posición dentro del paisaje ha sido colmatada por los sedimentos no consolidados provenientes de material erosionado de los dichos mogotes como se aprecia en la (*Figura 12*). Los suelos que se forman en la planicie a partir de estos depósitos tienen altos porcentajes de arcilla (63-95%) resultado de un material que ha tenido una intensa karstificación, quedando prácticamente pura arcilla residual.



Figura 12. Localidad Los Higos. Suelo clasificado como Feozem stágnico ubicado sobre un pie de monte correspondiente a la unidad geomorfológica Antigua planicie kárstica.

En cuanto a la importancia relativa de los elementos del paisaje que permiten diferenciar las unidades geopedológicas, destaca sin duda el relieve; sin embargo, existen otros elementos del paisaje que influyen en la formación de los suelos y procesos pedogenéticos como es el caso del régimen climático. El rango de altitud varía en toda la cuenca, en las partes bajas cercanas al PNLM, se tiene una elevación promedio de 1,500 msnm, el nivel mínimo de elevación en la cuenca es de 1,300 msnm y alcanza hasta los 2,400 msnm en las partes más altas que corresponden al

municipio de Comitán (CONAGUA, 2009) lo que genera variabilidad climática, que de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García, la CFE a través de un estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas (CFE, 2012) reporta climas semicálidos y subhúmedos a templados cerca de la zona de las Lagunas de Montebello con un incremento en la humedad hacia esta región. Todos los climas muestran régimen de lluvias en verano y la cuenca dispone de un alto volumen de precipitación (1,482.6mm según lo estimado en el mismo estudio) que junto con un deficiente drenaje producto de capas arcillosas que originan horizontes impermeables dificultando en gran medida el flujo vertical y lateral del agua, contribuyen al estancamiento del agua en épocas de lluvias en las geoformas en donde la morfología del terreno no favorece la escorrentía lo que explica en gran parte el desarrollo de propiedades stágnicas prevalecientes en casi toda la cuenca como se observa en la *Figura 11* (horizontes ABg, ACg, Btg, Bssg, Btgss), sobre todo en los suelos que se desarrollan sobre un relieve de fondo plano (antigua planicie kárstica cubierta con material residual, valle fluvial y planicies kárstica alta, baja y de acumulación lacustre). Así las condiciones de mayor o menor humedad acumulada en el suelo son consecuencia en gran parte de la topografía. Esto es así, como puntualizan (Aguilera, 1959) y (Hernández, 1959), porque la configuración topográfica del terreno afecta la dinámica de la precipitación pluvial que recibe cada área, tanto en lo que se refiere a la escorrentía superficial como a la infiltración o estancamiento del agua, lo que acarrea efectos directos sobre la génesis y morfología de los suelos.

Por otra parte la infiltración eficaz del agua hacia el acuífero depende de numerosos factores además de la precipitación, como son la evapotranspiración, karst desnudo o cubierto con distintos tipos de suelo y vegetación, roca caliza más o menos fracturada, cuenca epigea sobre terrenos impermeables que permiten o no ampliar enormemente el área de captura de agua, entre otros (Galán, 1991). Como se ha mencionado la colmatación por arcillas impide infiltración en relieves planos principalmente en las planicies y valles; no obstante, en estos paisajes por debajo de la capa edáfica la carbonatación ha ampliado los patrones de fractura naturales en las rocas, lo que lleva a altos niveles de porosidad y permeabilidad como lo reportan (Schaetzel y Anderson, 2005).

Según el informe de la CFE (2012) de acuerdo a las características de porosidad y permeabilidad de las rocas que afloran en la zona y a sus condiciones de fracturamiento, fallamiento y grado de disolución que presentan las unidades calcáreas se clasificó a la cuenca como una unidad

hidrogeológica de alta permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, debido a esto y a la profundidad del nivel estático, el acuífero se considera muy vulnerable a la contaminación, siendo la lixiviación e infiltración de los residuos sólidos municipales e infiltración de aguas residuales no tratadas, las principales fuentes potenciales de contaminación..

En el informe de la CFE (2012) también se presenta un mapa de porosidad de la cuenca, según el cual se considera de baja permeabilidad a las formaciones que se encuentran sobre materiales poco o no consolidados constituidos por aluviones, suelos arcillosos y conglomerado, mientras que las formaciones de alta y media permeabilidad son aquellas que están constituidas por rocas calcáreas dolomitizadas, con fracturamiento intenso que originan un paisaje kárstico y cavernoso. Las regiones de mayor permeabilidad y por tanto de mayor Karsticidad se presentan en la base de la cuenca donde se ubican el PNLM, que coincide con los valores de precipitación pluvial más alta de la cuenca, lo que le asigna a esta región un índice de vulnerabilidad alto a extremo.

Cabe señalar que la precipitación es uno de los factores que inciden directamente en el rendimiento de los cultivos principalmente en zonas donde no se cuenta con grandes infraestructuras para la irrigación. Sin embargo, la precipitación también es un fenómeno meteorológico muy variable, con eventos máximos que pueden contribuir a procesos de inundación en terrenos de morfología plana y pérdida de suelos y formación de cárcavas en terrenos con fuertes pendientes (CONAGUA, 2009).

Los suelos desprovistos de estructura o con desarrollo de estructura débil son más susceptibles a los procesos erosivos, por otro lado la estabilidad estructural que se refiere a la resistencia que tienen los agregados del suelo a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua y manipulación mecánica (laboreo), es la que define en gran medida la intensidad y el tipo de uso y manejo y, desde el punto de vista del manejo intensivo del suelo, ésta es una de las propiedades que mejor deben conocerse, ya que es la que más determina su resistencia al deterioro y a la erosión (Jaramillo, 2002). La estabilidad estructural de un suelo está controlada en gran medida por el contenido de arcilla y materia orgánica, así, a mayor contenido de arcilla y de materia orgánica, hay mayor estabilidad (Ingelmo y Cuadrado, 1986); a menor laboreo y mayor población microbiana, mayor estabilidad (Utomo y Dexter, 1982), a mayores revestimientos de los pedos con óxidos de hierro y aluminio, mayor estabilidad (Sánchez, 1981). Esto indica que todas las prácticas agronómicas deben hacerse con carácter de conservación de la misma ya que la estructura del suelo y su estabilidad juegan un rol fundamental en muchos procesos del suelo y su interacción

con las plantas: erosión, infiltración de agua, exploración radicular, aireación y resistencia mecánica (Rucks *et al.*, 2004). Además la estructura puede mitigar los efectos nocivos que puede tener la textura arcillosa; así por ejemplo, un suelo bien estructurado puede reducir los problemas de mal drenaje, baja permeabilidad y poca aireación inducidos por el empaquetamiento fuertemente ajustado que se presenta en un suelo de textura fina (Jaramillo, 2002), dominante a lo largo de toda la Cuenca.

De acuerdo a las observaciones de campo la mayoría de los perfiles presento susceptibilidad a la erosión (*Cuadro 8*) independientemente de la unidad geomorfológica a la que pertenecen ya sea por su ubicación sobre pendientes, el desarrollo de estructura desfavorable y/o con grado débil de agregación y baja estabilidad de agregados en el horizonte superficial, siendo los suelos clasificados como Leptosol mólico, Planosol háplico Regosol stágnico, Cambisol háplico y Fluvisol stágnico los que mayormente presentan uno o varias de éstas características y los suelos de tipo Feozem stágnico o Vertisol stágnico tienen mejor desarrollo y estabilidad estructural, lo cual es de esperarse debido a un mayor desarrollo pedogenético. Sin embargo, en algunos suelos perturbados por agricultura a pesar de su avanzada pedogénesis muestran susceptibilidad a la erosión, ya que a pesar de tener a lo largo del perfil dominancia de estructura subangular o angular con grado fuerte de agregación, el horizonte superficial ha perdido estas características mostrándose una estructura granular y/o grado débil de agregación y/o baja estabilidad de agregados, tal es el caso de Parcela Venustiano Carranza, Los Higos, La Esperanza, Sociego y Juznajal como se observa en el *Cuadro 7*. De manera que se debe poner mayor cuidado si se va a someter un suelo a prácticas intensivas de manejo, pues un mal manejo del suelo conlleva a la destrucción de la estructura y ello a la compactación, pérdida de la fertilidad y erosión (Jaramillo, 2002).

Cuadro 7. Estructura y estabilidad de agregados de los perfiles de suelo para los horizontes superficiales o de acumulación de materia orgánica.

Localidad	Tipo de suelo	Prof. (cm)	Horizonte.	Estructura Tipo, tamaño, grado	Estabilidad de Agregados	Factores que generan susceptibilidad a la erosión
Carrizal PA	LP rz (eu)	0-11	Ah	BA, bien desarrollados y fuertes	Alta	
San Antonio	LP li (eu)	0-5	Ah	BSA, grandes y fuertes	Alta	Fuerte pendiente 25° y
La Patria		5-29	AC	BSA, medianos, moderado	Alta	suelo de poca pedogénesis
Parcela Venustiano Carranza	CM ha (hu-eu-ce)	0-5	Ap	Granular, fino a muy fino, débil	Baja	Estructura favorable a la erosión y baja estabilidad de agregados en horizonte superficial
		5-15/24	Ah	BSA, grandes, fuerte-moderado	Alta	
San Miguel	LP mo (ca-sk)	0-15	Ah	Granular fina	Baja	Estructura favorable a la erosión
Tinajab		15-51	AC	Granular fina	Baja	y baja estabilidad de agregados
Los Higos	PH st-lv (ca-ph-ce)	0-25/28	Ap	BSA y granular, medianos y grandes, moderado	baja-moderada	Baja estabilidad de agregados
		25/28-48	Btg	BSA, medianos y grandes, débil	Alta	en horizonte superficial
La Esperanza	PH st-lv (gs-ce)	0-2	Ap	Granular, medianos y finos	alta-mediana	Horizonte superficial perturbado por
El Encierro		2-10	Ah	BSA, muy gruesos, moderado	Alta	labranza y con estructura favorable
		10-26	Ah	BSA, gruesos, moderado	Alta	a la erosión
Bambus	PH st-lv (ca-ce)	0-21	Ah	BSA, medianos y finos, fuertes	Alta	
		21-30/34	Ah	BA, medianos y gruesos, fuertes	Alta	
Potrero	GL al (dy-ce)	0-13/20	Ap	BSA y granular, medianos, moderado-fuerte	Alta	Horizonte superficial perturbado por
ojo de agua		13/20-21.5	AB	BSA, medianos, moderado	Alta	labranza
		21.5-31/34	Btg	BSA, medianos, débil	mediana	
Sociego	PH ha (ce)	0-2	Ap	BSA, finos, moderado	Baja	Horizonte superficial perturbado por
		2-18	Ah	BSA, grandes, moderado	mediana	labranza y con baja estabilidad de
		18-41	Ah	BSA, medianos, moderado	mediana	agregados
Cuajilote	VR st (he)	0-5	Ap	BSA, medianos, fuerte	Alta	
		5-13	Ah	BSA, medianos, moderado	Alta	
		13-29	Ah	BSA, grandes, fuerte	Alta	

Estructura. Tipo: (BSA) bloques subangulares, (BA) bloques angulares, (BR) bloques redondeados. Tamaño: muy fina, fina, media, gruesa, muy gruesa. Grado: débil, moderado, fuerte.

Cuadro 7. Estructura y estabilidad de agregados de los perfiles de suelo para los horizontes superficiales o de acumulación de materia orgánica. Continuación...

Localidad	Tipo de suelo	Prof. (cm)	Horizonte.	Estructura Tipo, tamaño, grado	Estabilidad de agregados	Factores que generan susceptibilidad a la erosión
Juxnajal	PH rz (ce)	0-3	Ap	BSA, medianos finos y muy finos, débil	muy baja	Horizonte superficial perturbado, con grado débil de agregación y muy baja estabilidad en horizonte superficial
		3-11/14	Ah	BSA, muy gruesos y gruesos	Alta	
		11/14-38	Ah	BSA y BA, muy gruesos	Alta	
Carrizal	FL st (ca-eu)	0-22/24	Ah	Masiva	no tiene	Horizonte superficial con estructura favorable a la erosión
		22/24-31	AC	BSA, fuertes	Alta	
		31-41	C1	BR, medianos y finos, moderado	mediana	
Prado Zapata	PH rz (ph-ce)	0-51	Ah	BSA, gruesos, fuerte	mediana	
		51-60	AC	Masiva	no tiene	
Llanura Venustiano Carranza	VR st (hu-ms)	0-20	Assg	Bloques bien desarrollados y gruesos	mediana	
		20-60	Bss	BSA, gruesos y medianos	mediana-alta	
El Triunfo 1	VR st (ms-he-pe)	0-20	Ap	BSA, medianos y gruesos, fuerte	Alta	
		20-40	Bssg	BA, medianos y gruesos, fuerte	Alta	
El Triunfo 2	RG st (eu-ce)	0-1	Ah	Granular, fina, fuerte	muy alta	
		1-17	Ah	BSA, medianos, muy fuerte	muy alta	
		17-32	ABg	BSA, muy grandes, fuerte	Alta	
Santa Rita, El Lavadero	RG ha (dy-sk-ar)	0-15	AC	BSA, pequeños y fuertes	mediana	Colina fuertemente disectada
		15-34	Cw	BSA, débiles	mediana	
Santa Rita, Antonio López	PH ha (ce)	0-20	Ap	BSA, grandes, fuerte	muy alta	Horizonte superficial perturbado
		20-40	Ah	BA, grandes, fuerte	Alta	
		40-49/59	Ah	BSA, medianos, moderado	Alta	
Jobala	PH lv (ph-ce)	0-13	Ap	BSA, gruesos, fuerte	Alta	
		13-34	Ah	BSA, medianos y pequeños, fuerte	Alta	

Estructura. Tipo: (BSA) bloques subangulares, (BA) bloques angulares, (BR) bloques redondeados. Tamaño: muy fina, fina, media, gruesa, muy gruesa. Grado: débil, moderado, fuerte.

En el mapa geológico de la cuenca (*Figura 4*) se observa la diversidad litológica constituida mayormente por piedra caliza-dolomía (compuesta principalmente por CaCO_3 y MgCO_3) y calizalutita (compuesta además de CaCO_3 por roca sedimentaria detrítica o clástica constituida por partículas de tamaños arcilla y limo) y en menor proporción por aluvión y yeso conglomerado polimíctico, estos materiales condicionan la naturaleza mineral de los suelos presentes en la cuenca e imprimen sus características a propiedades químicas de los suelos como es el pH y el contenido de bases intercambiables, ambos fuertemente relacionados con el grado de disolución de CaCO_3 , así, en los suelos ubicados en las planicies y valles, la eliminación de los carbonatos es más evidente en los horizontes superficiales que están en contacto directo con el agua de lluvia. Debido a que los suelos han tenido mayor tiempo de pedogénesis se ha favorecido la disolución en superficie mientras que, hacia los horizontes subsuperficiales se observó acumulación de CaCO_3 . Por otro lado, en los suelos más jóvenes como Leptosoles, donde la pedogénesis apenas empieza a actuar, y en los suelos que aún conservan su carácter de rendzina como es el caso de Feozem réndzico se muestran alta reacción a HCl a causa de la enorme reserva de CaCO_3 en donde será cuestión de tiempo para que los procesos de disolución actúen sobre este material.

De la mano con los procesos de disolución de CaCO_3 hay un enriquecimiento de Ca en el suelo debido a que al reaccionar el carbonato de calcio con agua de lluvia se libera Ca, el cual se acumula en el suelo (Fernández *et al.*, 2005), ocupando gran parte del complejo de cambio, siendo el principal responsable de que en prácticamente toda la cuenca, los suelos sean ricos en bases intercambiables. En el *Cuadro 3* se observa que los valores de Calcio son altos en todos los perfiles de suelo (20-65 cmol/kg llegando a superar los 200 cmol/kg en el perfil El Triunfo 1), a excepción de Santa Rita-Lavadero y Potrero ojo de agua, donde se encontraron los valores más bajos (2.7-18.7 cmol/kg), En cuanto a las bases intercambiables se encontraron contenidos de mediano a alto en todos los suelos (25-240 cmol/kg), a excepción de Santa Rita y Potrero-Ojo de agua donde se obtuvieron valores bajos (7-25 cmol/kg) que corresponden a Planosol háplico y Gleysol álico respectivamente, para el Planosol esto se puede explicar debido a que el suelo se origina a partir de conglomerados que no son ricos en bases (Ca y Mg) como los demás materiales parentales, y para el caso del Gleysol álico la influencia del nivel freático y los procesos de lixiviación han permitido la pérdida de bases del suelo.

Por otro lado el CaCO_3 influye en la reacción del suelo al amortiguar el pH debido a que el agua ácida procedente de la lluvia es contrarrestada por la continua liberación de bases en el contacto

caliza-residuo y en los fragmentos de piedra caliza que hay en el suelo (Schaetzl y Anderson, 2005) obteniéndose en casi todos los suelos de la cuenca un pH en CaCl_2 de ligeramente ácido a ligeramente alcalino (6.0-7.5), solo para el perfil Parcela Venustiano Carranza y Llanura Venustiano Carranza se observaron valores moderadamente ácidos a lo largo de todo el perfil (4.7-5.6) y para el perfil Santa Rita el Lavadero y Potrero Ojo de Agua se encontró una intensa acidificación (pH 4.0-4.7) como se muestra en el *Cuadro 3* de propiedades físicas y químicas. Con el pH también se puede observar que en algunos perfiles ha habido pérdida de bases en los horizontes superficiales ya que hacia los horizontes subyacentes se observaron valores de pH más alcalinos, éste proceso se acentúa más en los suelos que pertenecen a parcelas agrícolas, tal es el caso de Cuajilote (5.5-7.5), El Triunfo (5.2-7.3) y Santa Rita Antonio López (5.7-7.5), lo cual se puede explicar por la extracción de nutrimentos por parte de los cultivos y por la lixiviación de bases donde la alta precipitación dominante en la cuenca juega un papel importante.

Finalmente, la disponibilidad de los nutrientes que necesitan las plantas está prácticamente controlada por el pH, como se aprecia en la *Figura 13*, en ésta se presenta la solubilidad de los nutrientes en el suelo en relación con el pH del mismo. De acuerdo a Smithson *et al.*, (2002) los suelos presentan buena disponibilidad de macronutrimentos (N, K, S, Ca y Mg) entre un pH de 6.0 a 8.0 pero por debajo de pH 5.5 se empiezan a presentar problemas de disponibilidad, para el caso del P, su disponibilidad decrece por debajo de un pH de 6.5 y por debajo de 6.0 es prácticamente muy baja debido a la fijación de P por calcio de manera que los suelos que tienen una moderada a fuerte acidificación presentaran deficiencias de estos macronutrimentos sobre todo de fósforo. Por lo anterior, y analizando los valores de pH antes mencionados se puede decir que en la cuenca hay suelos de mala, mediana y alta disponibilidad de nutrimentos dependiendo del pH, siendo los Planosoles, que se originan de conglomerados y los Gleysoles ubicados en las partes bajas de planicies kársticas, ambos caracterizados por una fuerte acidificación (4.0-4.7) los que presentan mayores problemas de disponibilidad de macronutrimentos (P,K,S, Ca) y molibdeno. Para los demás suelos la disponibilidad de nutrimentos para las plantas varía independientemente del tipo de suelo o unidad geomorfológica. En el caso de los micronutrimentos como Fe, Mn, Bo, Cu y Zn la disponibilidad no se ve gravemente afectada dentro de los rangos de pH encontrados en la cuenca (4.0-7.5) a excepción del molibdeno que a partir de pH 6.0 disminuye su disponibilidad.

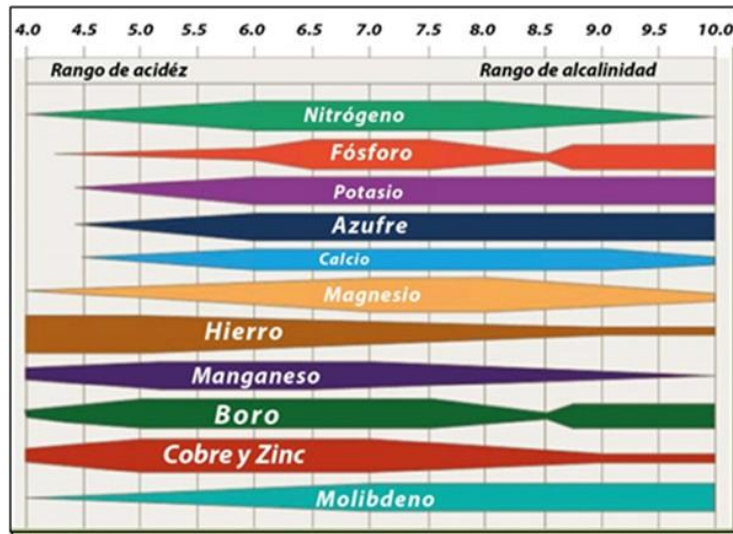


Figura 13. Disponibilidad de nutrimentos con respecto al pH del suelo.

Los análisis químicos muestran que de manera general el contenido de fósforo en el suelo (P Olsen) se califica según la NOM-021-RECNAT-2000 como bajo a medio (5.5- hasta 40 mg/kg) sin embargo solo para el Carrizal (Fluvisol stágnico), Potrero Ojo de Agua (Gleysol álico) y Los Higos (Feozem stágnico) se observaron valores altos (14.1-29.5, 1.3-19 y 0.3-43.2 mg/kg) respectivamente, en el primero los altos contenidos se deben a que en el suelo crece pastizal que aporta continuamente materia orgánica y en los otros dos se puede deber al aporte de fertilizantes para la agricultura, además, en el Gleysol puede estar influyendo su posición en la cuenca (Planicie kárstica baja) que es una zona de enriquecimiento de las partes altas. Para el resto de la cuenca el contenido de fósforo es predominantemente bajo. En el caso del nitrógeno total éste se encuentra en mejor proporción en el suelo, de alto (0.15-0.25%) a muy alto (>0.25%) sobre todo en los horizontes superficiales debido a la acumulación de materia orgánica.

Por otro lado la densidad aparente (D.A) es un parámetro importante para la descripción de la calidad del suelo pues es un estimador del grado de compactación del suelo. Los valores de D.A. altos indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como la reducción de la infiltración del agua, mientras que la D.A. baja es un indicador de altos contenidos de materia orgánica en el suelo, puesto que la M.O. reduce el valor de dicha densidad, igualmente los valores de D.A. bajos indican generalmente una condición porosa del suelo (Jaramillo, 2002).

Teniendo en cuenta la textura, Cortés y Malagón (1984) consideran como valores altos de D.A. aquellos que sean superiores a 1.3 g/cm³ para los suelos de texturas finas; 1.4 g/cm³ para suelos

de texturas medias y 1.6 g/cm^3 para los suelos de texturas gruesas. Con base en lo anterior y a Siebe *et al.*, (2006) los perfiles que presentaron una D.A. alta corresponden a Prado- Zapata y Llanura Grande ($1.4\text{-}1.5 \text{ g/cm}^3$) ubicados sobre la Planicie de acumulación de origen lacustre por lo que se infiere una probable compactación del suelo, los demás perfiles mostraron valores de D.A. baja a mediana ($0.6\text{-}1.3 \text{ g/cm}^3$) indicando ausencia de compactación, así como buena a mediana penetrabilidad de raíces y suficiente espacio poroso para el almacenamiento de aire y agua, sin embargo por los altos contenidos de material arcilloso se tiene un problema de aireación y drenaje generalizado en toda la cuenca.

De las propiedades químicas del suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una de las más importantes, ésta consiste en la capacidad que posee un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo. Los cationes que son sometidos a esta retención quedan protegidos contra los procesos de la lixiviación, evitando así que se pierdan nutrientes para las plantas (Schaeztl y Anderson, 2005). En cada perfil de suelo se evaluó la CIC dentro de la profundidad fisiológica en base a Siebe *et al.*, (2006), la cual se muestra en el Cuadro 5 donde se aprecia que únicamente en el Planosol háplico (Santa Rita- Lavadero) la CIC se evaluó como baja-mediana y para el resto de los perfiles de la cuenca la CIC es de mediana a muy alta, lo que indica buena capacidad de retención de nutrimentos contra la lixiviación, sin embargo las cargas electrostáticas superficiales presentes en los coloides del suelo no siempre son neutralizadas con iones benéficos para las plantas y organismos que viven en o del suelo. Algunas veces son retenidos, por efecto de esas cargas, iones que pueden llegar a ser tóxicos para aquellos organismos como Cu, Pb, Ni, Cd, Co y V (Jaramillo, 2002). De manera que si bien el suelo sirve como amortiguador de contaminantes hacia los sistemas acuáticos se debe cuidar de no pasar ciertos límites ya que la saturación con ellos conllevará a las plantas y otros organismos del suelo a tomar estos elementos.

De manera general existen buenas condiciones químicas para el establecimiento de la vegetación como un pH que ofrece mediana a buena disponibilidad de nutrimentos, D.A. bajas a medianas, CIC y BI altas en prácticamente toda la cuenca, a excepción de los Planosoles y Gleysoles. Sin embargo los nutrientes no solo tienen que estar en cantidad sino en las relaciones óptimas para que no haya antagonismos entre ellos, es decir, que la capacidad de un elemento de poder ser absorbido por las plantas, en la cantidad y tiempo requeridos se vea inhibido y disminuido por

acción de otro u otros elementos presentes en el medio. En el suelo se establecen de manera natural y dentro de ciertos límites relaciones de interacción entre los nutrimentos, lo cual determina en alto grado su disponibilidad (Chávez, 2012).

En la cuenca el Ca^{2+} juega un papel importante en el complejo de cambio. Una alta concentración de calcio resulta en una relación Ca/Mg desfavorable y ocasiona desbalances nutricionales en las plantas al interferir en la asimilación de Mg. De acuerdo a (Bertsch, 1988) la relación óptima Ca/Mg (expresados ambos en cmol/kg) debe estar alrededor de 5, si ésta es mayor a 10 es posible que se produzca una deficiencia de Mg. Por otro lado la relación K/Mg debe estar comprendida entre 0.2 y 0.3, si esta relación es mayor de 0.5 pueden producirse deficiencia de magnesio por efecto antagónico de K, en cambio si la relación es de alrededor de 0.1 se puede producir una deficiencia de potasio inducida por el magnesio (Chávez, 2012).

Con base en lo anterior y analizando los resultados de las relaciones de cationes básicos (*Cuadro 3*), se observó para la relación Ca/Mg valores muy variables (2-200) que en su mayoría implica baja disponibilidad o deficiencia en la absorción de Mg, siendo esto un problema común en la cuenca independientemente de las unidades geomorfológicas y tipos de suelo. Igualmente la absorción de K por antagonismo de Mg es un problema común aunque menos acentuado. Ambas situaciones se tienen que tomar en cuenta para el uso del suelo con fines agrícolas, el cual, es más susceptible a los requerimientos de los nutrimentos que la vegetación natural.

Por otro lado, a medida que el proceso kárstico avanza se incrementan las geoformas con depósitos residuales producto de la disolución de las calizas (Ca^{2+} y arcillas) que influyen en las propiedades de los suelos, el drenaje se torna lento y la capacidad de aireación disminuye, este mismo patrón lo reporta Bautista *et al.*, (2005) en donde discute la diversidad geomorfológica de la Península de Yucatán, identificando siete niveles de evolución kárstica: reciente, reciente-juventud, juventud, juventud-madurez, madurez, madurez-tardía de relictos y tardía de relictos, mostrando un patrón morfológico de geoformas exocársticas en las cuales a mayor evolución kárstica, se incrementan las geoformas y depósitos residuales producto de la disolución de las calizas.

Las formaciones constituidas por suelos muy arcillosos se consideran de baja permeabilidad (CFE, 2012) y alta capacidad de retención de contaminantes, ya que de acuerdo a la evaluación edafocológica los suelos más profundos, diferenciados y con altos porcentajes de arcilla fueron evaluados con una CIC de alta a muy alta (*Cuadro 5*) tal es el caso de Feozem háplico, stágnico,

réndzico o lúvico y Vertisol stágnico; sin embargo, el desmedido consumo de agroquímicos es un grave problema que se debe controlar antes de que se superen las capacidades de amortiguamiento de los suelos ya que en la capa edáfica los contaminantes se pueden retener por algún tiempo, pero potencialmente se pueden filtrar a través de los conductos kársticos hacia el manto freático y viajar hacia el sistema Lagunar de Montebello, sobre todo en suelos someros de tipo Leptosol. Además el cambio de uso de suelo y la pérdida de la cobertura vegetal generan cambios en la estabilidad de agregados y estructura del suelo haciéndolos más vulnerables a los procesos erosivos que conllevan a la movilización de material edáfico a la base de la cuenca, siendo éste, una fuente potencial importante que genera modificación de la calidad del sistema lacustre como se muestra en el *Cuadro 8* que incluye un resumen de los suelos y los factores de riesgo que presentan para de modificación de la calidad del sistema lagunar de Montebello.

Finalmente con la información generada en este trabajo se construyó una base de datos junto con información proporcionada por INEGI (Carta Edafológica 1:250,000 del 2004. E15-11, E15-12 y D15) para la realización de un mapa edafológico (preliminar) a escala de cuenca (1:50,000) de la zona de estudio (*Figura 14*), el cual, a partir de posteriores muestreos y análisis de laboratorio será actualizado con la finalidad de contribuir a la modelación a través de software de áreas de recarga de mantos acuíferos y áreas de mayor susceptibilidad a la erosión del suelo, así como identificar el origen y las fuentes de contaminación del sistema Lagunar de Montebello.

Cuadro 8. Características de los suelos como factores de riesgo para la modificación de la calidad sistema lagunar de Montebello.

Leptosol	Procesos edafogenéticos dominantes	Factores de riesgo de modificación del sistema lagunar	Estrategia de manejo
Leptosol réndzico ¹	Suelo poco desarrollado limitado en profundidad por roca continua (caliza), acumulación de mantillo tipo mor y ligera pérdida de bases por lixiviación	Suelo somero ubicado en zona de alta precipitación. Alto riesgo de erosión si se cambia uso de suelo y se pierde M.O y estructura	Conservación de la vegetación natural (bosque de pino-encino)
Leptosol lítico ²	Suelo poco desarrollado, limitado en profundidad por roca continua (caliza), alta acumulación de M.O. humificada y ligera pérdida de bases por lixiviación.	Suelo somero con alta pedregosidad y fuerte pendiente que favorece la erosión. Alto riesgo de erosión si se pierde M.O y estructura del suelo	Conservación de la vegetación natural (matorral espinoso)
Cambisol háplico ²	Mineralización de M.O, pérdida de bases por lixiviación y horizonte (Cwk) poco intemperizado con acumulación de CaCO ₃	Suelo medianamente desarrollado. Alto riesgo si se utiliza para agricultura intensiva además de susceptibilidad a erosión por baja estabilidad de agregados	Para agricultura de temporal medidas de conservación de estructura y rotación de cultivos.
Leptosol mólico ³	Alto contenido de M.O hasta el horizonte C, acumulación de CaCO ₃ incipiente desarrollo de horizonte mólico, a partir de 15 cm presenta roca continua (caliza)	Suelo con alta pedregosidad, susceptible a la erosión por estructura granular fina y baja estabilidad de agregados. Alto riesgo de erosión si se cambia uso de suelo	Conservación de la vegetación natural (matorral espinos)
Feozem stágnico lúvico ⁴	Alta acumulación de M.O, procesos de iluviación de arcilla, desarrollo de propiedades stágnicas y acumulación de CaCO ₃ (mayor en los horizontes subsuperficiales)	Baja estabilidad de agregados en horizonte superficial que establece susceptibilidad a la erosión	Para agricultura de temporal: conservación de estructura, rotación de cultivos y dosificación en agroquímicos.
Feozem stágnico lúvico ⁵	Mineralización de M.O, acumulación de CaCO ₃ en horizonte subsuperficial, concreciones de Mn, incipiente iluviación de arcilla (cutanes) y patrón de color stágnico.	Estructura granular fina a muy fina en horizonte superficial que establece susceptibilidad a la erosión	Para agricultura de temporal: conservación de estructura, rotación de cultivos y dosificación en agroquímicos.
Feozem stágnico lúvico ⁵	Alta acumulación de M.O humificada, iluviación de arcilla (cutanes), desarrollo de propiedades stágnicas y acumulación de CaCO ₃ .	Bajo riesgo de erosión por buena estructura y estabilidad de agregados alta	Para agricultura de temporal: conservación de estructura, rotación de cultivos y dosificación en agroquímicos.
Gleysol álico ⁶	Alto contenido de M.O (hasta 11%), pérdida de bases por lixiviación y agricultura, fluctuación con nivel freático resultando en un patrón de color gléyico, procesos de iluviación de arcilla.	Por su localización cerca de sistema lagunar y fluctuación con el nivel freático tiene un alto riesgo de movilización de agroquímicos utilizados en la agricultura	Conservación de vegetación natural
Feozem háplico ⁷	Mineralización de M.O, acumulación de CaCO ₃ en horizonte subsuperficial	Baja estabilidad de agregados en el horizonte superficial que establece susceptibilidad a la erosión.	Para agricultura de temporal medidas de conservación de estructura, M.O y rotación de cultivos.
Vertisol stágnico ⁷	Mineralización de M.O, iluviación de arcilla, patrón de color stágnico y desarrollo de propiedades vérticas (slikensides)	Baja susceptibilidad a la erosión por estructura subangular con alta estabilización de agregados pero con susceptibilidad al anegamiento.	Utilización para cultivos que requieren buena retención del agua superficial. Las prácticas de manejo deben dirigirse al control del agua en combinación con conservación o mejora de la fertilidad del suelo.

Cuadro 8. Características de los suelos como factores de riesgo para la modificación de la calidad sistema lagunar de Montebello. Continuación....

Leptosol	Procesos edafogenéticos dominantes	Factores de riesgo de modificación del sistema lagunar de Montebello	Estrategia de Manejo
Feozem réndzico ⁷	Mineralización de M.O; concreciones de tipo Fe-Mg, acumulación de CaCO ₃ en horizonte superficial	Evidencia de erosión en cárcavas, mediana estabilidad de agregados. Alto riesgo de erosión si se cambia uso de suelo y se pierde M.O y estructura	Conservación de la vegetación natural (bosque de pino-encino)
Fluvisol stágnico ⁸	Mineralización de M.O, estratificación de material fluvico de origen lacustre, concreciones de Fe, patrón de color stágnico, acumulación de CaCO ₃	Alta susceptibilidad a la erosión por estructura masiva en horizonte superficial, sin estabilidad de agregados.	Conservación de la vegetación natural (pastizal)
Feozem réndzico ⁹	Mineralización de M.O, acumulación de CaCO ₃ en forma de concreciones de calcita	Susceptibilidad a la erosión por muy baja estabilidad de agregados en horizonte superficial	Para agricultura de temporal medidas de conservación de estructura, M.O y rotación de cultivos
Vertisol stágnico ⁹	Mineralización de M.O. presencia de facetas de ficción-presión, patrón de color stágnico, concreciones de Mn y pérdida de bases por lixiviación.	Buena estructura pero con mediana estabilidad de agregados en horizonte superficial, además de susceptibilidad al anegamiento lo que establece susceptibilidad a la erosión laminar	Utilización para cultivos que requieren buena retención del agua superficial. Las prácticas de manejo para producción de cultivos deben dirigirse al control del agua en combinación con conservación o mejora de la fertilidad del suelo. Igual al anterior
Vertisol stágnico ⁹	Mineralización de M.O, expansión y contracción de arcillas esmectíticas (slickensides), ligera pérdida de bases, concreciones de Fe-Mg y propiedades stágnicas	Buena estructura pero con susceptibilidad al anegamiento lo que establece susceptibilidad a la erosión laminar	
Regosol stágnico ⁹	El suelo poco desarrollado, ligera acumulación de M.O. y manchas y motas rojizas	Estructura granular fina que rompe a muy fina pero con alta estabilidad de agregados	Para la producción de cultivos las prácticas de manejo deben dirigirse a la conservación de la M.O y estructura.
Planosol háplico ¹⁰	Discontinuidad textural abrupta, alta pedregosidad, baja acumulación de materia orgánica y pérdida de bases por lixiviación.	Suelo con mediana estabilidad de agregados y evidencias de erosión, ubicado en colina fuertemente disectada	Conservación de vegetación natural (bosque de pino-encino) y enmiendas orgánicas para recuperar la M.O.
Feozem háplico ¹⁰	Mineralización de M.O, ligera pérdida de bases por lixiviación y acumulación de CaCO ₃	Bajo riesgo de erosión por buena estructura y alta estabilidad de agregados	Para producción agrícola: medidas de conservación de estructura, M.O y rotación de cultivos
Feozem lúvico ¹⁰	Mineralización de M.O, ligera pérdida de bases por lixiviación, desarrollo de patrón de color stágnico y acumulación iluvial de arcilla (cutanes).	Bajo riesgo de erosión por buena estructura y alta estabilidad de agregados	Para producción agrícola: medidas de conservación de estructura, M.O y rotación de cultivos

(1) Plegamientos de estructuras mesiformes, (2) Relieve mesiforme, (3) Mogotes, (4) Antigua planicie kárstica cubierta con material residual, (5) Planicie kárstica alta, (6) Planicie kárstica baja, (7) Valle fluvial alto, (8) Valle fluvial bajo, (9) Planicie de acumulación lacustre y (10) Lomerios de pendiente continua denudatoria.

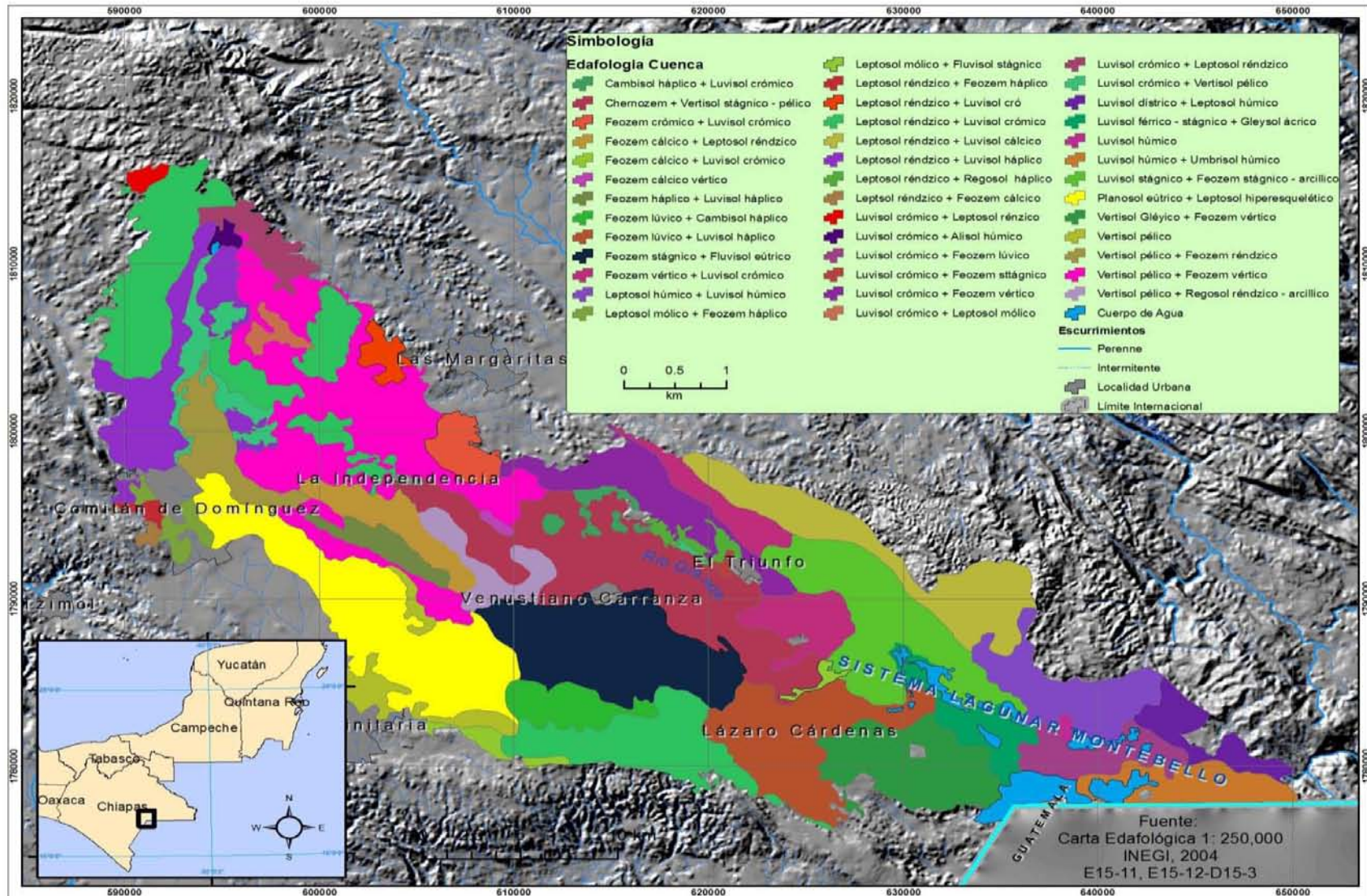


Figura 14. Mapa preliminar de asociaciones de suelo de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello (Pinales et al., 2014. En Prensa

X. CONCLUSIONES

La utilización de los patrones geomorfológicos en el estudio de los suelos facilita la comprensión de su distribución; lográndose una caracterización más útil y práctica para la toma de decisiones, relacionadas con el uso del recurso suelo.

En la cuenca se encontraron asociaciones de suelos con unidades geomorfológicas: Leptosol, Regosol y Cambisol se ubicaron sobre Plegamientos de estructuras mesiformes, Mogotes y Relieve mesiforme; Feozem (stágnico o réndzico), Vertisol stágnico y Fluvisol stágnico se encontraron asociados a Planicies de acumulación de origen lacustre, Planicies kársticas altas, Valle fluvial y Antigua planicie kárstica cubierta con material residual; Feozem (háplico o lúvico) y Planosol asociados a Lomeríos de pendiente continua denudatoria; finalmente Gleysol ubicado sobre las depresiones más bajas de la cuenca.

Los procesos pedogenéticos dominantes en la cuenca son: acumulación de materia orgánica sobre todo en suelos con coberturas de vegetación natural ya sea forestal, pastizal o matorral; desarrollo de propiedades stágnicas en donde la topografía plana contribuyen de manera importante a esta condición, además de la alta precipitación; acumulación de CaCO_3 , acumulación de arcilla iluvial y en menor proporción desarrollo de propiedades vérticas y propiedades gléyicas.

La cantidad de arcilla y CaCO_3 de los suelos está relacionado con los materiales geológicos y los procesos de karstificación. A medida que avanzan los procesos de disolución se va perdiendo CaCO_3 del suelo, mientras que éste se enriquece en arcilla y Ca^{+2} lo que influye en propiedades de los suelos, así se tienen pH neutros a ligeramente alcalinos debido al amortiguamiento del pH por el material calcárico, una alta reserva de cationes básicos enriquecida en Ca^{+2} (lo cual puede generar problemas de asimilación de Mg y K), altos porcentajes de arcilla que genera problemas de aireación y drenaje debido al desarrollo de capas impermeables.

A medida que el proceso kárstico avanza, se incrementan las geoformas con depósitos residuales producto de la disolución de las calizas, el drenaje se torna lento y la capacidad de aireación disminuye.

La precipitación, la posición de los suelos en el paisaje y los materiales geológicos influyen en la intensidad de los procesos de disolución y en la dinámica del flujo de agua repercutiendo en las propiedades de los suelos y por ende, en los potenciales de uso.

Los suelos de tipo Leptosol, Regosol, Cambisol y Gleysol muestran aptitudes marginales para la agricultura y están expuestos a degradación rápida, constituyendo un alto riesgo de contaminación al sistema lagunar con material erosionado. La aptitud natural de estos suelos se enfoca hacia la conservación de vegetación forestal, pastizal o matorral, dependiendo de las condiciones climáticas y edáficas, lo que permite a su vez la recarga del acuífero y captura de carbono, además de evitar la eutrofización del sistema lagunar.

Los Planosoles desarrollados a partir de materiales polimícticos, asociados a la unidad lomeríos de pendiente continua denudatoria poseen alta vulnerabilidad a la erosión lo que genera un riesgo de contaminación del sistema lagunar de Montebello con sulfatos, debido al material del que se originan estos suelos.

Los suelos de clasificados como Feozem (háplico, stágnico, réndzico o lúvico), Vertisol stágnico y Fluvisol stágnico fueron los más profundos y diferenciados con mayor capacidad de resiliencia, alta capacidad de retención de contaminantes y mejor aptitud agrícola. Sin embargo presentan como limitantes para el desarrollo de la vegetación baja permeabilidad y poca aireación.

El cambio de uso de suelo y la pérdida de la cobertura vegetal generan cambios en la estabilidad de agregados y estructura del suelo haciéndolos más vulnerables a los procesos erosivos que conllevan a la movilización de material edáfico y productos químicos a la base de la cuenca donde se ubica el sistema lagunar de Montebello.

Con la información recabada en este trabajo se generó una base de datos para la realización de un mapa preliminar de las unidades de suelo a escala de cuenca que a partir de posteriores muestreos y análisis de laboratorio será actualizado.

Cabe resaltar que la importancia de esta investigación está en que brinda información base para la realización a través de software de modelación de áreas de recarga de mantos acuíferos, áreas de mayor susceptibilidad a la erosión del suelo, así como identificar las fuentes de contaminación y su dinámica de flujo.

XI REFERENCIAS

- Aguilera, H. N. 1959. Suelos. Los recursos naturales del Sureste y su aprovechamiento. En: Beltrán, E. (Ed.). Pub. Inst. Mex. Rec. Nat. Re-nov. II (2):177-212, México.
- Arp, P. A., H. H. Krause. 2006. Forest soil properties and site productivity. En: R. Lal (Editor), Encyclopedia of soil science, Second edition 1:1 729-732.
- Arriaga Cabrera, L., V. Aguilar Sierra, J. Alcocer Durand, R. Jiménez Rosenberg, E. Muñoz López, E. Vázquez Domínguez (coords.). 1998. Regiones hidrológicas prioritarias. Escala de trabajo 1:4 000 000. 2ª. edición. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Bautista, F. E., Batllori-Sampedro, G. Palacio, M. Ortíz-Pérez y M. Castillo-González. 2005. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. p. 33- 58. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 pp.
- Bautista, F., G. Palacio-Aponte, M. Ortíz-Pérez, E. Batllori-Sampedro y M. Castillo-González. 2005. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán, p. 21- 32. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 pp.
- Bautista, F., Gerardo Palacio-Aponte, Patricia Quintana, y Joseph Alfred Zinck. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Península of Yucatán, México. *Geomorphology* 135, 2011: 308–321.
- Bertsch, F. 1988. Potasio, calcio y magnesio en el sistema suelo café. En: Curso Regional sobre Nutrición Mineral del Café. San José, Costa Rica. Programa Cooperativo para la protección y modernización de la Caficultura (PROMECAFE), noviembre, pp 83-98.
- Bonh, H. 1993. Química del suelo. México: Editorial Limusa. 370 pp.
- Bonifaz, R., L. Mora, L. Vázquez-Selem, D. Pinales-Bravo. 2014. Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca Río Grande-Lagunas Montebello. Instituto de Geofísica, UNAM. En Prensa.

- Boul, S. W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniel, P.A. 2011. Soil genesis and classification. 6th Edition. Wiley-Blackwell. 560 pp.
- Cepeda, J. M. 1991 Química de suelos. México: Editorial Trillas. 168 pp.
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2012. Estudio para conocer la calidad de agua de las Lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo I. Hidrometeorología.
- Chávez, S. M. 2012. Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. DIECA-LAICA.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006. Acta constitutiva y de instalación del Comité de Cuenca Lagunas de Montebello. En la subregión Chixoy, estado de Chiapas, CONAGUA, Lagunas de Montebello.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009. Plan de Gestión de la Cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello. México, Chiapas: 168 pp.
- Cortés, A. y D. Malagón. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- Cotler, Helena (Compiladora). 2004. Manejo Integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Instituto Nacional de Ecología- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT). Primera edición. México, D.F. 264 pp.
- Day, R.P. 1965. Hydrometer method of particle size analysis. pp. 545-552. In: Methods of soil analysis. Agronomy 9. ASA. USA.
- Del Coro, A. M., Márquez L. M. 2000. Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves en México. México D. F. 440 pp.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), 16 de diciembre de 1959. Decreto que declara necesaria y de utilidad pública la creación de un Parque Nacional en la región conocida con el nombre de Lagunas de Montebello, ubicada en Independencia y La Trinitaria, Chiapas.
- Dourojeanni Axel, Andrei Jouravlev, Guillermo Chávez, 2002, Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. CEPAL - SERIE Recursos Naturales e Infraestructura. Num. 47. Santiago de Chile.
- Durán, Calderón Juana Iisel. 2013. Análisis geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería geológica. Ciudad Universitaria. México, D.F.

- Eslava, J., S. Bahamón & M. Romero. 2000. Clasificación Climática de los Karst. Meteorología Colombiana. 2:67-72. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. Colombia.
- FAO-ISRIC-ISSS. World reference base for soil resources. Rome. 1988. Disponible en: www.fao.org/docrep/W8594E/W8594E00.htm Fecha de consulta: 19-03-2014
- Faustino Jorge y Selma García, (s/f). Manual de manejo de cuencas. World Vision. 1ra. Edición. 104 pp.
- Fernández, E., Herrero, N., Lario J. 1995. Introducción a la geología kárstica. Texto homólogo por la Escuela Española de Espeleología.
- Foth, H.D. 1980. Fundamentos de la ciencia del suelo. 5a edición. Compañía Editorial Continental. México. 527 pp.
- Galán, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y silíceas: un estudio comparado. MUNIBE (Ciencias Naturales), 1991: 43-72.
- García, E. (2004), Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Goeppert, Nadine. 2011. Karst geomorphology of carbonatic conglomerates in the Folded Molasse zone of the Northern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology*, 2011: 289-298
- Hammond, E.H. 1964. Classes of landsurface form in the forty eight states USA. Editorial Annual Association of American Geographers. Washington.
- Hernández, X. E. 1959. La agricultura en la Península de Yucatán.» En: Beltrán, E. (Ed.). Los recursos naturales del Sureste y su aprovechamiento. Publ. IMRNR, año 1959, Vol. 3, pp. 3-57
- Huddart, D. y Stott, Tim. 2010. Earth environments: past, present and future. Malasia: Wiley-BlackWell. 895 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007a. Guía para la interpretación de Cartografía-edafología. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/edafo/EdafIII.pdf
- INEGI. 2007b Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional). México.
- INEGI. 1985. Carta Geológica. Las Margaritas. 1:250,000. (E15-12-D15-3).

- Ingelmo, S. F. y S. Cuadrado. 1986. El agua y el medio físico del suelo. Temas monográficos No. 18. Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca. 102 p.
- Jackson, M. L. 1964. Análisis Químico de Suelos. Traducción al español de J. Beltrán. Omega. Barcelona, España.
- Jaramillo, Daniel F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 613 pp.
- Jiménez, F. 2005. Gestión integral de cuencas hidrográficas. Enfoques y estrategias actuales. CATIE Recursos, Ciencia y decisión. No.2.
- Juma, N.G. 1999. Introduction to Soil Science and Soil Resources. Volume I in the Series "The Pedosphere and its Dynamics: A Systems Approach to Soil Science". Salman Productions, Sherwood Park. 335 pp.
- Kaufmann, Georg. 2009. Modelling karst geomorphology on different time scales. *Geomorphology*, 106 (2009): 62-77 pp.
- Londoño, C. H. 2001. Cuencas hidrográficas: bases conceptuales-caracterización planificación-administración. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. Departamento de ingeniería. Ibagué. 359 pp.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. Volum 1. Chapter 22. Dryland Systems. USA.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Norlex Internacional, S.A. de C.V.
- Ordoñez, J.J. 2011. Cartilla técnica: Aguas subterráneas-Acuíferos. 1ra. Edición, Sociedad Geográfica de Lima, Perú. 43 pp.
- Ortega, F. F. 2000. El Karst en Cantabria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2000: 2-12.
- Palacio-Aponte, A. G., Medina-Medina V., Bautista F. 2005. Diagnóstico ambiental de la Costa del Estado de Campeche: enfoques geomorfológico y geopedológico, p. 59 - 72. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 pp.

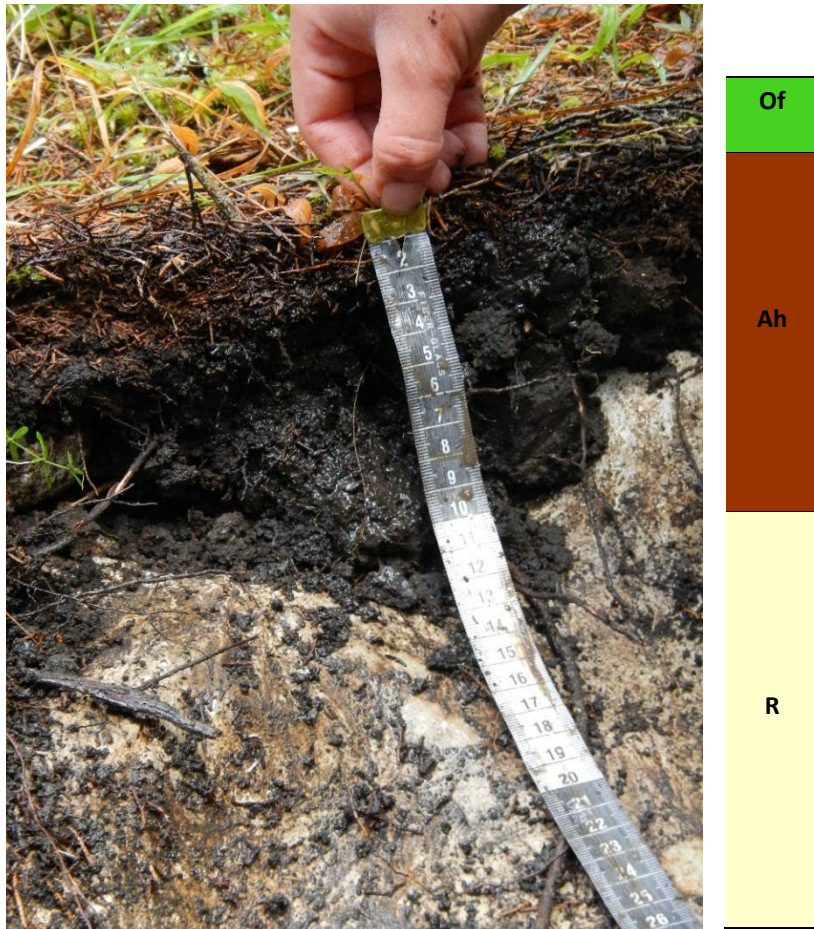
- Pérez, L. H., Pérez L. G., Pérez L. M. 2007. Caracterización y diagnóstico del río Grande de Comitán, Estado de Chiapas en la Región Frontera Sur, Comité de Cuenca Río Grande Lagunas de Montebello, México.
- Peña Ramírez, V. M. 2012. Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pinales, D., R. Bonifaz. 2014. Mapa preliminar de asociaciones de suelo de la cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello. Instituto de Geología. UNAM. En Prensa.
- RENAMECA (Red Nacional de Medición de calidad del agua), 2008. Informe anual. México.
- Rucks, L., García F., Kaplán A., Ponce de León J., Hill M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Departamento de suelos y aguas. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- SAGARPA-FIRCO (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Fideicomiso de Riesgo Compartido). 2007. Plan Rector de Producción y Conservación, Microcuenca Juznajib La Laguna, Comitán Chiapas.
- Sánchez, P. A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. 1ª. Ed. en español. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 534 pp.
- Schaetzl, Randall J., and Sharon Anderson. 2005. Soils. Genesis and geomorphology. Cambridge University Press. 817 pp.
- Schlichting, E., H.-P Blume y Stahr, K. 1995. Bodenkundliches Praktikum, Pareys Studentexte 81. 2da. edition. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlín.
- SEMARNAT-CONANP. 2007. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello. 1a. edición. México, Chiapas. 194 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 1997. Carta Geológica Minera 1:250,000. E15-11, E15-12, D15-3.
- Siebe, Christina, Reinhold Jahn, y Karl Stahr. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo. Segunda edición.
- Siebe, Cristina, Gerardo Bocco, José Sánchez, y Alejandro Velázquez. 2003. Suelos: distribución, características y potencial de uso. Instituto Nacional de Ecología. México.

- Smithson, Peter, Ken Adisson, Ken Atkinson. 2002. Fundamentals of physical environment. Third edition. Routledge. 656 pp.
- Solís-Castillo B, Ortiz-Pérez M, Solleiro-Rebolledo E. 2014. Unidades geomorfológico-ambientales de las Tierras Bajas Mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: Un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 66, Núm. 2, 2014, 279-290 pp.
- Summer. 2000. Malcolm E. Handbook of Soil Science. CRC Press.
- Ugalde, Txomin. 2009. El mundo subterráneo. La espeleología, Parte I. Nuestra tierra No. 12, 2009: 2-16.
- Utomo, W. H. and A. R. Dexter. 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. Journal of Soil Sci. 33: 623-637 pp.
- Vázquez, M. A., E. Méndez. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales. Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas.
- Verstappen, H. T. y R.A. Van Zuidam. 1991. The ITC System of Geomorphology Survey: A basis for the evaluation natural resources and hazards, Publication ITC num. 10, The Netherlands, ITC, 89 pp.
- Zapata, Hernández Raúl D. 2006. Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia, SEDE Medellín.
- WRB-IUSS Working Group. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.

REFERENCIAS ELECTRONICAS

- Esquema de evolución del paisaje kárstico. Disponible en: <<http://slideplayer.es/slide/321871/>> Fecha de consulta: enero 1014.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). CONAGUA. Normales Climatológicas, periodo 1981-2010, Chiapas: (a) La Esperanza 7374, (b) Las Margaritas 7104, (c) La Trinitaria 7190, (d) Comitán 7205 y (e) Paso del Soldado 7127. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28> Fecha de consulta: mayo 2014.

XII. ANEXOS



A. Localidad

- a. Perfil: 1
- b. Nombre: Carrizal-PA (parte alta)
- c. Clasificación de suelo: Leptosol réndzico (eútrico)
- d. Fecha de descripción: 21 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 626438 Y: 1785603
- g. Altitud: 1487 msnm
- h. Forma del terreno: Lomerío, parteaguas (superficie cumbrial)
- i. Pendiente: 0-2°
- j. Uso del suelo y vegetación: Bosque de pino-encino, uso potrero
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional)

B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Roca sedimentaria, caliza
- b. Drenaje natural: Bueno
- c. Condiciones de humedad del perfil: Fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: Laminar, ligera
- f. Influencia humana: No

C. Descripción del perfil.

Cuadro 9. Descripción y evaluación de perfil Carrizal-parte alta

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Of	-2-0	1 cm de mantillo fresco 1 cm de mantillo fermentado
Ah	0-11	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; alto a muy alto contenido de M.O. (15.1%); ligeramente ácido (pH 6.4 en CaCl ₂); estructura angular en bloques, fuertes, bien desarrollados; pocos poros finos, vesiculares y tubulares, in-ped; densidad de raíces alta; límite abrupto, uniforme.
R		Roca caliza



A. Localidad

- a. Perfil: 2
- b. Nombre: San Antonio, La Patria
- c. Clasificación de suelo: Leptosol lítico (eútrico)
- d. Fecha de descripción: 20 de diciembre del 2012
- e. Autor: Daniel Bravo, Carolina
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 618368 Y: 1793221
- g. Altitud: 1497 m snm
- h. Forma del terreno: Ladera baja de lomerío
- i. Pendiente: 25°
- j. Uso del suelo y vegetación: Matorral
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Roca sedimentaria, caliza
- b. Drenaje natural: Bueno
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca
- d. Presencia de rocas superficiales: 10%
- e. Evidencias de erosión: Laminar-baja
- f. Influencia humana: No

C. Descripción del perfil.

Cuadro 10. Descripción y evaluación de perfil San Antonio, La Patria

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-5	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; alto contenido de M.O. (12.4%); ligeramente ácido (pH 6.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques grandes, fuertes; pedregosidad baja (10%); muchos poros finos y muy finos, intersticiales y tubulares, in-ped; densidad de raíces mediana; límite difuso
AC	5-29	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR 3/4); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (7.6%); muy ligeramente ácido (pH 6.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos, moderado; alta pedregosidad (>75%); poros comunes, finos y muy finos, intersticiales y tubulares, in-ped; baja densidad de raíces



A. Localidad

- a. Perfil: 3
- b. Nombre: Parcela Venustiano Carranza
- c. Clasificación de suelo: Cambisol háplico (húmico, eútrico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 20 de diciembre del 2012
- e. Autor: Daniel Bravo, Carolina
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 618241 Y: 1793113
- g. Altitud: 1496 m snm
- h. Forma del terreno: Parte baja-pie de monte
- i. Pendiente: 1-2°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola de temporal (maíz y frijol)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional).

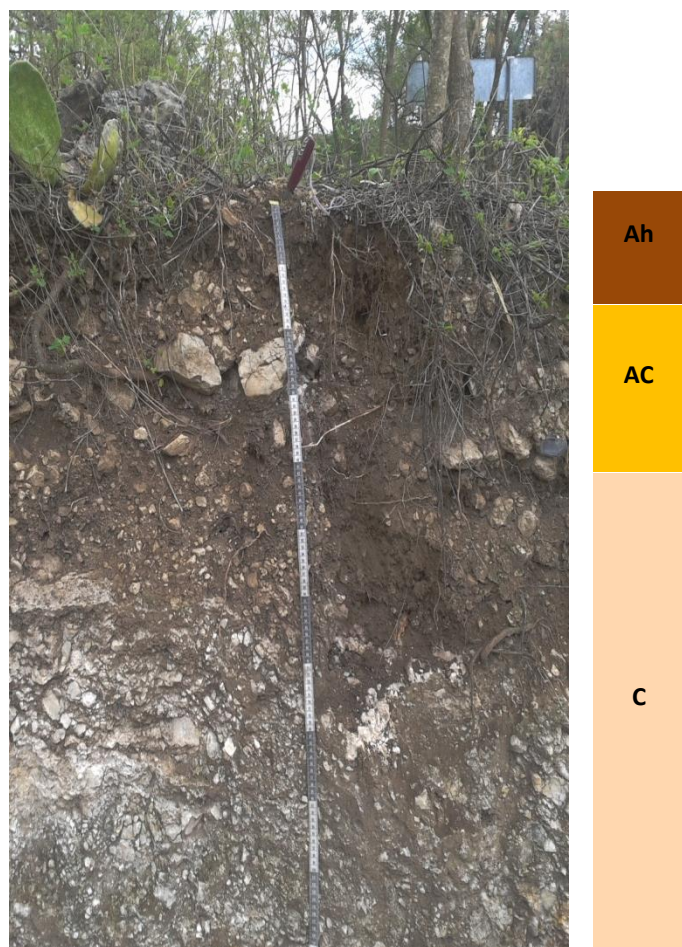
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Roca sedimentaria, caliza
- b. Drenaje natural: Moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca en profundidad
- d. Presencia de rocas superficiales: 5%
- e. Evidencias de erosión: Laminar
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 11. Descripción y evaluación de perfil Parcela Venustiano Carranza

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-5	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.8%); moderadamente ácido (pH 5.6 en CaCl ₂); estructura granular, fina y muy fina, grado débil; pedregosidad baja (5%); muchos poros intersticiales, finos, exped; densidad de raíces baja; límite difuso, uniforme.
Ah	5-15/24	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.4%); moderadamente ácido (pH 5.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, grado fuerte a moderado; pedregosidad baja (5%); muchos poros finos y muy finos; densidad de raíces alta; límite difuso, irregular. Rasgos pedológicos: muy pocas concreciones de manganeso (7.5YR 2.5/1), pequeñas, esféricas, suaves.
Bcw	15/24-50	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR 3/6); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.3%); moderadamente ácido (pH 5.2 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, grado moderado; pedregosidad baja (5%); poros comunes (vesiculares, finos, in-ped), tubulares (pocos, finos, in/exped); densidad de raíces baja; límite claro, uniforme.
Cwk	50-65	No se describió



A. Localidad

- a. Perfil: 4
- b. Nombre: San Miguel Tinajab
- c. Clasificación de suelo: Leptosol mólico (calcárico, esquelético)
- d. Fecha de descripción: 29 de mayo del 2013
- e. Autor: Lucy Mora/Montserrat Martínez
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 595489 Y: 1800122
- g. Altitud: 1596 m snm
- h. Forma del terreno: Piedemonte, ladera recta
- i. Pendiente: 10°
- j. Uso del suelo y vegetación: Matorral
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,109.4mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 19.8°C (datos provenientes de la estación meteorológica Comitán del Servicio Meteorológico Nacional).

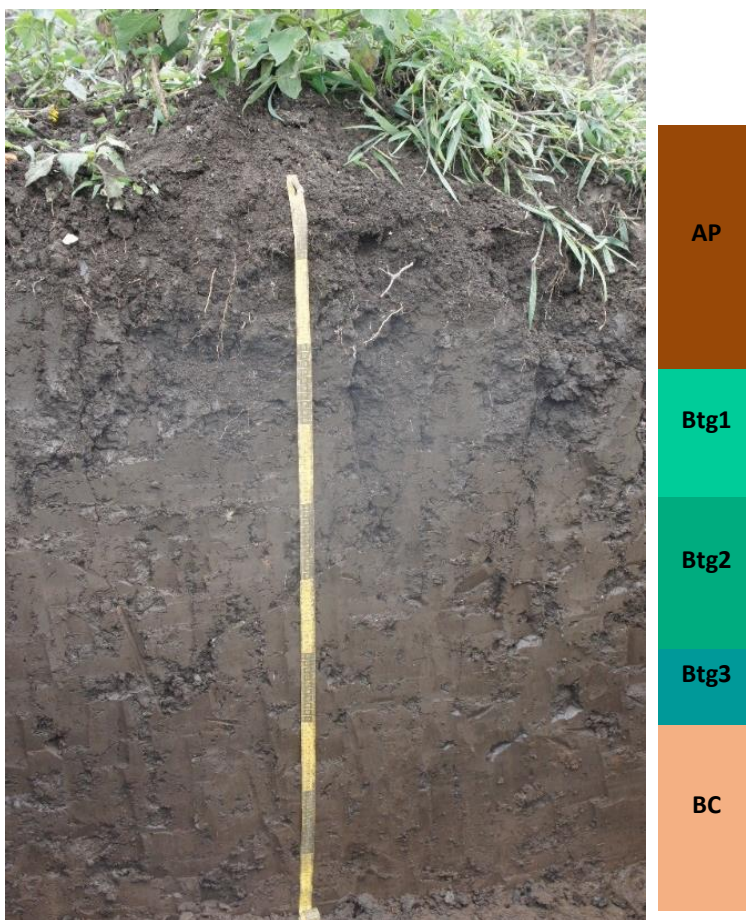
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Caliza
- b. Drenaje natural: Bueno
- c. Condiciones de humedad del perfil: Fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: 40%
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 12. Descripción y evaluación de perfil San Miguel Tinajab

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-15	Color en húmedo pardo oscuro (10YR 3/3); textura franca; alto contenido de M.O. (11.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura granular fina; poros comunes, finos, vesiculares, esféricos, exped; densidad de raíces alta; límite difuso.
AC	15-51	Color en húmedo pardo oscuro (10YR 3/3); textura franca; alto contenido de M.O. (12.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura granular fina; poros comunes, finos, vesiculares, esféricos, exped; densidad de raíces alta; límite difuso.
C	51-70	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura franca limosa; alto contenido de M.O. (11.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura granular fina; poros comunes, finos, vesiculares, esféricos, exped; densidad de raíces mediana.
	70-110	Material parental: Caliza



A. Localidad

- a. Perfil: 5
- b. Nombre: Los Higos
- c. Clasificación de suelo: Feozem stágnico lúvico (calcárico, páquico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 30 de mayo del 2013
- e. Autor: Sara López/ Luis Aragon
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 594112 Y: 1803595
- g. Altitud: 1609 m snm
- h. Forma del terreno: Piedemonte
- i. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (jitomate).
- j. Clima: Precipitación media anual: 1,109.4mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 19.8°C (datos provenientes de la estación meteorológica Comitán del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Material coluvial, caliza-lutita
- b. Drenaje natural: Deficiente

- c. Condiciones de humedad del perfil: Fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: 5%
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 13. Descripción y evaluación de perfil Los Higos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25/28	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (7%); ligeramente alcalino (pH 7.6 en CaCl ₂); estructura granular y subangular en bloques medianos y gruesos grado moderado; baja a mediana estabilidad de agregados; muchos poros ex-ped, intersticiales, finos y muy finos, así como muchos poros in-ped, vesiculares, intersticiales, medianos y finos; densidad de raíces muy alta; límite claro, ondulado.
Btg1	21/28-48	Color en húmedo gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (4.1%); ligeramente alcalino (pH 7.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos a gruesos de grado débil; estabilidad de agregados alta; poros ex-ped, comunes, intersticiales, finos, así como in-ped, comunes, intersticiales y vesiculares, muy finos; densidad de raíces mediana; límite claro, irregular. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla en caras de agregados, 20% de manchas rojizas (óxidos de Fe), delgadas, en caras de agregados.
Btg2	48-74	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.0%); ligeramente alcalino (pH 7.7 en CaCl ₂); estructura granular y angular en bloques medianos a gruesos de grado moderado; pocos poros ex-ped, intersticiales y finos, así como poros in-ped, comunes, vesiculares y finos; densidad de raíces mediana; límite claro, irregular. Rasgos pedológicos: pocas manchas rojizas, distribuidas en todas partes y manchas de carbón. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla en caras de agregados, 7% de manchas rojizas (óxidos de Fe), delgadas, en canales de raíces y en caras de agregados.
Btg3	74-91	Color en húmedo pardo olivo oscuro (2.5Y 3/3); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (4.4%); ligeramente alcalino (pH 7.7 en CaCl ₂); estructura angular en bloques gruesos grado moderado; pocos poros in-ped/ex-ped, intersticiales y finos; densidad de raíces mediana; límite claro, irregular. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla en caras de agregados y manchas (óxidos de Fe) delgadas, en canales de raíces.
BC	91-110	Color en húmedo pardo olivo oscuro (2.5Y 3/3); textura arcillosa; ligeramente alcalino (pH 7.8 en CaCl ₂); estructura angular en bloques gruesos grado moderado; pocos poros exped, vesiculares e intersticiales, finos, así como pocos poros in-ped, vesiculares, muy finos; densidad de raíces baja.



A. Localidad

- a. Perfil: 6
- b. Nombre: La Esperanza, San Martín-El Encierro
- c. Clasificación de suelo: Feozem stágnico lúvico (glósico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 21 de diciembre del 2012
- e. Autor: Daniel Bravo, Blanca Prado
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 621394 Y: 1786198
- g. Altitud: 1505 m snm
- h. Forma del terreno: Pie de monte coluvial
- i. Pendiente: 4-9°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola de temporal (maíz)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre);
Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional)

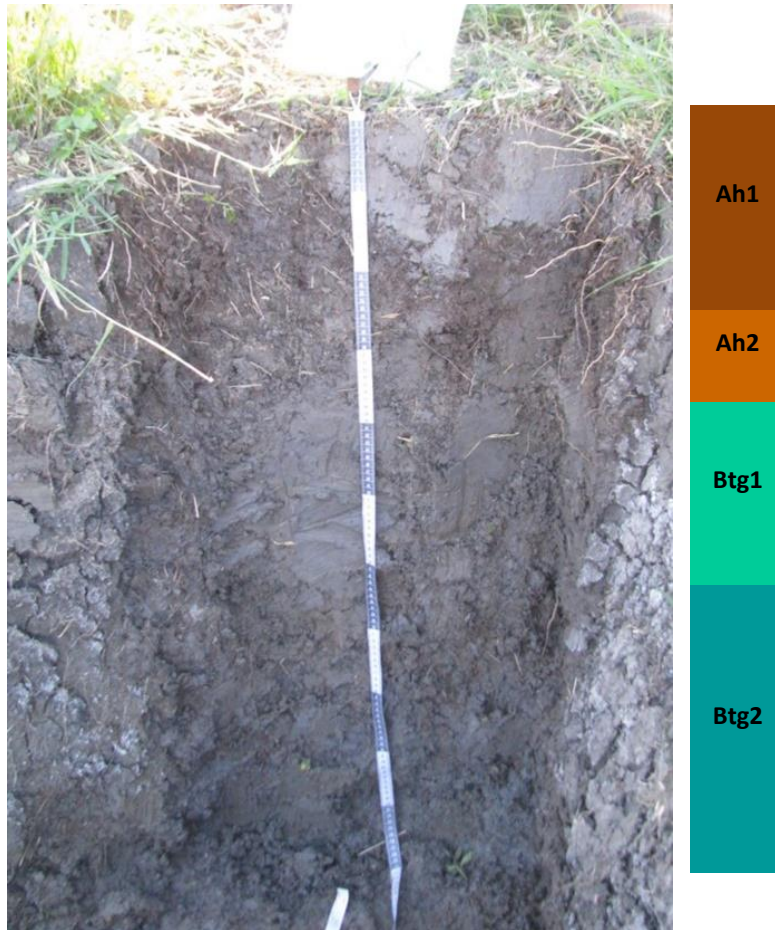
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Caliza
- b. Drenaje natural: Moderado a deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca en profundidad
- d. Presencia de rocas superficiales: 3%
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 14. Descripción y evaluación de perfil La Esperanza, San Martín-El Encierro.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-2	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (4.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura granular, tamaño medio a fino; pedregosidad baja (3%); poros tubulares, intersticiales, medianos, finos, in/exped; densidad de raíces alta; límite abrupto, uniforme.
Ah1	2-10	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (4.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, muy gruesos; pedregosidad baja (7%); muchos poros intersticiales, algunos tubulares, vesiculares, medianos y finos; densidad de raíces alta; límite claro, uniforme.
Ah2	10-26	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.8%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesos y medianos; pedregosidad baja (7%); muchos poros tubulares medianos, micro, vesiculares e intersticiales finos; densidad de raíces alta; límite gradual, ondulado.
ABg	26-40	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.3%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesos; pedregosidad baja (10%); muchos poros intersticiales muy finos, pocos tubulares finos; densidad de raíces alta; límite difuso, irregular. Rasgos pedológicos: 25% de manchas y motas (10YR 6/6), grandes, irregulares, con límite difuso, in/exped.
Bt	40-70	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.6%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, muy gruesos; pedregosidad baja (5%); muchos poros tubulares finos, muchos vesiculares muy finos; densidad de raíces mediana; límite difuso, irregular. Rasgos pedológicos: muchos cutanes de arcilla, delgados, exped.
Ck	70->105	Color en húmedo pardo (10YR 5/3); textura arcillosa; muy ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesos, grado moderado; pedregosidad alta (30%); poros comunes, tubulares, finos, muchos intersticiales muy finos; no hay presencia de raíces. Rasgos pedológicos: 2% de concreciones negras (2.5YR 2/0), grandes (1-2mm), esféricas, fuertes, in-ped; 8% de manchas y motas (10YR 6/8), grandes (2mm), irregulares y circulares, in/exped, con límite claro.



A. Localidad

- a. Perfil: 7
- b. Nombre: Carrizal-Bambus
- c. Clasificación de suelo: Feozem stágnico lúvico (calcárico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 20 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 626817 Y: 1785254
- g. Altitud: 1464 m snm
- h. Forma del terreno: Llanura alta
- i. Pendiente: 0°
- j. Uso del suelo y vegetación: Cambio de pastizal a sembradío de bambú
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,861.0mm (mayor en los meses junio a octubre-enero); Temperatura media anual: 17.9°C (datos provenientes de la estación meteorológica Paso del Soldado del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Caliza
- b. Drenaje natural: Moderado a deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: Ninguna
- f. Influencia humana: Cambio de pastizal a sembradío de bambú

C. Descripción del perfil.

Cuadro 15. Descripción y evaluación de perfil Carrizal-Bambus

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah1	0-21	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; alto contenido de M.O. (11.2%); reacción neutra (pH 7.0 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos y finos, fuertes, bien desarrollados; poros comunes, finos y muy finos, tubulares, intersticiales, in/exped; densidad de raíces muy alta; límite claro, horizontal.
Ah2	21-30/34	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura arcillosa; alto contenido de M.O. (10.7%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura angular en bloques, medianos y gruesos, fuertes, bien desarrollados; pocos poros, muy finos, micro, tubulares, in/exped; densidad de raíces mediana; límite claro, ondulado.
Btg1	30/34-59	Color en húmedo pardo grisáceo (10YR 5/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.5%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura angular en bloques medianos y pequeños grado fuerte; poros comunes, finos, muy finos, micro, tubulares, intersticiales, in/exped; densidad de raíces mediana; límite difuso, horizontal. Rasgos pedológicos: pocas manchas rojizas, distribuidas en todas partes y manchas de carbón.
Btg2	59-105	Color en húmedo pardo (10YR 5/3); textura arcillosa; bajo contenido de M.O. (1.7%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura angular en bloques medianos y pequeños grado medianamente fuerte; poros comunes, finos, muy finos, micro, tubulares, intersticiales, in/exped; densidad de raíces mediana. Rasgos pedológicos: manchas rojizas más frecuentes, distribuidas en caras de agregados; cutánes de arcilla.

A. Localidad

- a. Perfil: 8
- b. Nombre: Potrero, ojo de agua
- c. Clasificación de suelo: Gleysol álico (dístrico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 01 de junio del 2013
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 633705 Y: 1783411
- g. Altitud: 1456 m snm
- h. Forma del terreno: Planicie kárstica baja
- i. Pendiente: Plano
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (maíz, tomate, frijol, pepino)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,861.0mm (mayor en los meses junio a octubre); Temperatura media anual: 17.9°C (datos provenientes de la estación meteorológica Paso del Soldado del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

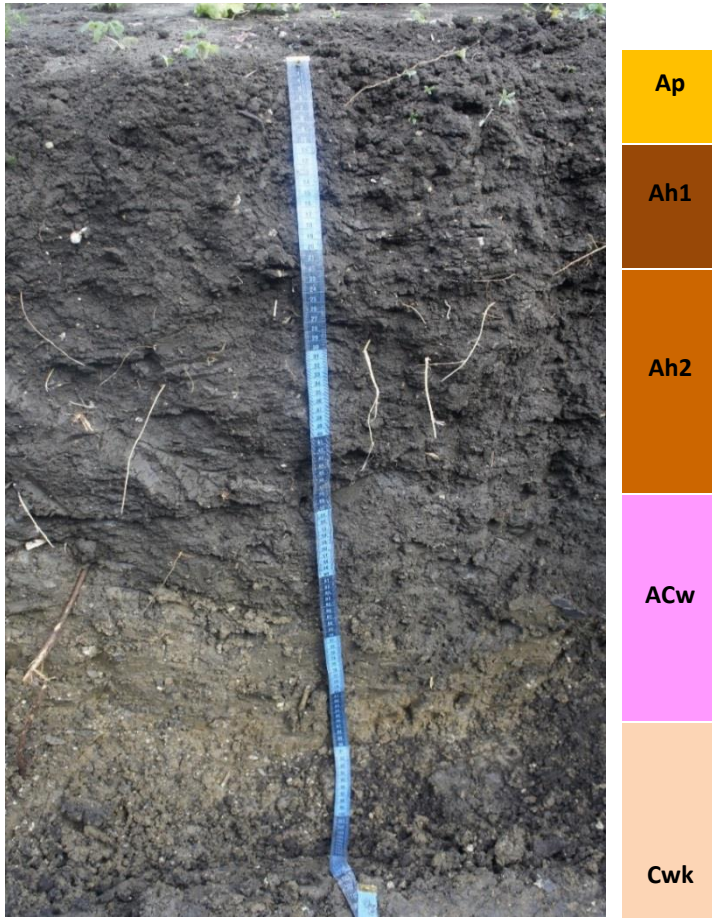
- a. Material parental: Caliza-dolomia, sedimentos lacustres
- b. Drenaje natural: Deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Fresca a húmeda
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 16. Descripción y evaluación de perfil El Potrero-ojo de agua

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-13/20	Color en húmedo negro (2.5Y 2.5/1); textura arcillosa; alto contenido de M.O. (11.1%); fuertemente ácido (pH 4.7 en CaCl ₂); estructura granular de tamaño medio y grado fuerte, así como estructura subangular en bloques medianos de grado moderado; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos a medianos, in/exped, vesiculares; densidad de raíces alta; límite difuso, ondulado.
AB	13/20-19/24	Color en húmedo gris olivo oscuro (5Y 3/2); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (6.3%); fuertemente ácido (pH 4.2 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos de grado moderado; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos, medianos, exped, así como vesiculares y tubulares, in-ped; densidad de raíces mediana; límite difuso, ondulado.

Btg1	19/24-31/34	Color en húmedo pardo (10YR 5/3); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.6%); fuertemente ácido (pH 4.0 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos de grado débil; estabilidad de agregados mediana; pocos poros, finos y muy finos, tubulares, in-ped; densidad de raíces mediana; límite difuso, ondulado. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla sobre agregados de tamaño fino; manchas rojizas, difusas y alargadas.
Btg2	31/34-45	Color en húmedo pardo (7.5YR 5/2); textura arcillosa; bajo contenido de M.O. (1.7%); fuertemente ácido (pH 4.1 en CaCl ₂); estructura subangular y angular en bloques gruesos de grado moderado; estabilidad de agregados alta; pocos poros, muy finos, tubulares, in-ped; densidad de raíces baja. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla sobre agregados de tamaño fino (en mayor cantidad); manchas rojizas.



A. Localidad

- a. Perfil: 9
- b. Nombre: Sociego
- c. Clasificación de suelo: Feozem háplico (arcílico)
- d. Fecha de descripción: 19 de diciembre del 2012
- e. Autor: Daniel Bravo, Blanca Prado
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 593394 Y: 1800906
- g. Altitud: 1572 m snm
- h. Forma del terreno: Planicie, terraza baja
- i. Pendiente: 0°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (rotación de lechuga, flores)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,109.4mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 19.8°C (datos provenientes de la estación meteorológica Comitán del Servicio Meteorológico Nacional).

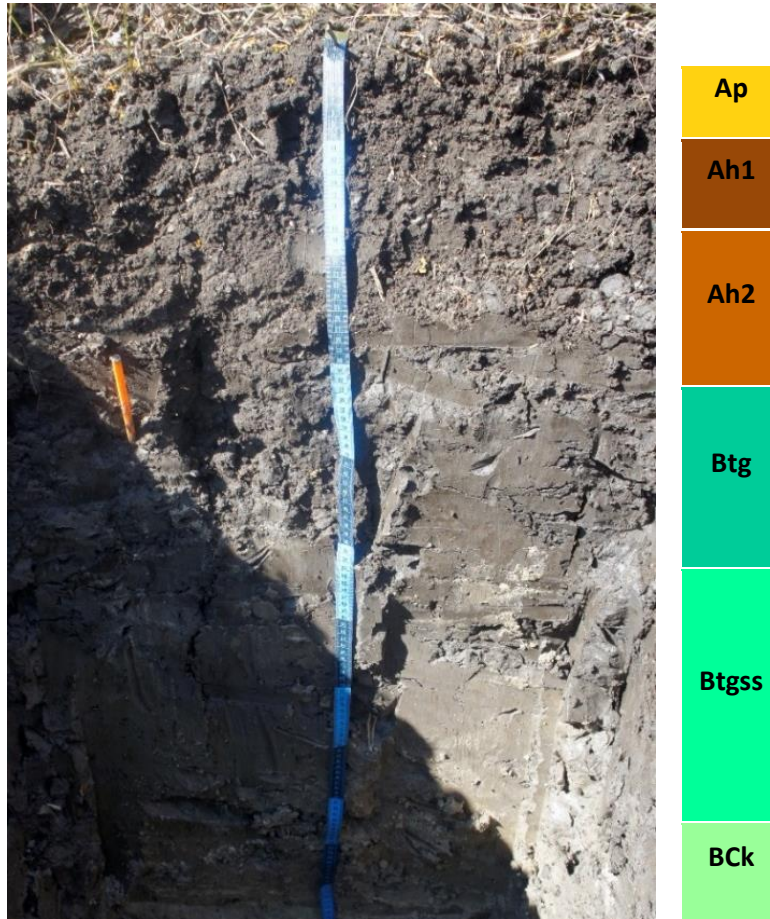
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Roca sedimentaria, caliza
- b. Drenaje natural: Bueno a moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: 10% de gravas
- e. Evidencias de erosión: Laminar
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 17. Descripción y evaluación de perfil El Sociego

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-2	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.3%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, finos, moderado; pedregosidad baja (10%); muchos poros finos y muy finos, intersticiales, exped y comunes, medianos, intersticiales, exped; baja densidad de raíces; límite regular, difuso.
Ah1	2-18	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, moderado; pedregosidad baja (10%); muchos poros grandes, intersticiales, exped; baja densidad de raíces; límite claro, regular.
Ah2	18-41	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.4%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, moderado; pedregosidad baja (10%); poros comunes, medianos, intersticiales in/exped; baja densidad de raíces; límite difuso, regular.
ACw	41-74	Color en húmedo gris oscuro (10YR 4/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.0%); ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura angular en bloques, grandes, fuerte; pedregosidad baja (10%); pocos poros muy finos, vesiculares, in-ped; baja densidad de raíces; límite claro, regular.
Cwk	74-95	Color en húmedo pardo (10YR 5/3); textura arcillosa; ligeramente alcalino (pH 7.7 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, moderado; pedregosidad baja (10%); poros comunes, muy finos, vesiculares, exped; no hay presencia de raíces



A. Localidad

- a. Perfil: 10
- b. Nombre: Cuajilote
- c. Clasificación de suelo: Vertisol stágnico (hipereútrico)
- d. Fecha de descripción: 19 de diciembre del 2012
- e. Autor: Blanca Prado/Daniel
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 593106 Y: 1800470
- g. Altitud: 1569 msnm
- h. Forma del terreno: Planicie
- i. Pendiente: No
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (maíz de temporal)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,109.4mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 19.8°C (datos provenientes de la estación meteorológica Comitán del Servicio Meteorológico Nacional).

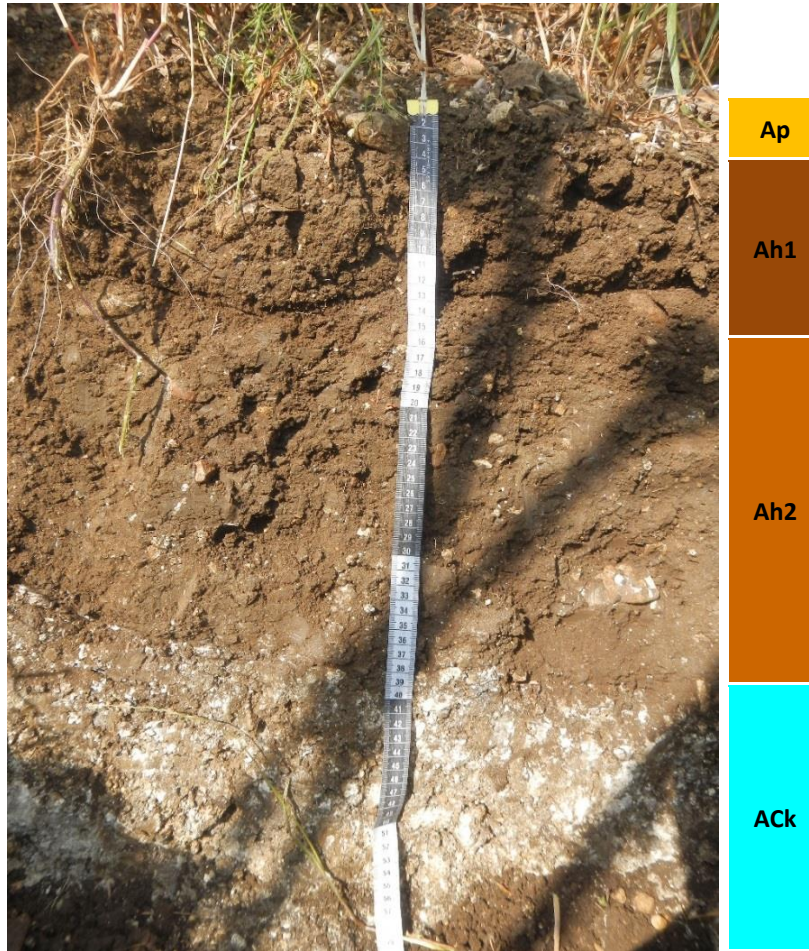
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Roca sedimentaria, caliza
- b. Drenaje natural: Moderado a deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: Ligera, laminar
- f. Influencia humana: Agricultura.

C. Descripción del perfil.

Cuadro 18. Descripción y evaluación de perfil Cuajilote.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción del perfil
Ap	0-5	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.9%); moderadamente ácido (pH 5.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, media, fuerte; muchos poros finos y muy finos intersticiales, in/exped; baja densidad de raíces; límite gradual, uniforme
Ah1	5-13	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.1%); moderadamente ácido (pH 5.7 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, media, moderado; muchos poros finos, intersticiales, in/exped; mediana densidad de raíces; límite gradual, uniforme
Ah2	13-29	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.9%); moderadamente ácido (pH 5.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes y fuertes; poros comunes, finos, vesiculares in/exped y grietas; mediana densidad de raíces; límite gradual, uniforme
Btg	29-50	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.5%); reacción neutra (pH 7.0 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes y fuertes; pocos poros finos, vesiculares, in-ped; no hay presencia de raíces; límite difuso, irregular. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla en caras de agregados de grosor moderado; manchas y motas, comunes, rojizas, finas, irregulares, con límite claro, en caras de agregados
Btgss	50-88	Color en húmedo gris oscuro (10YR 4/1); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.3%); ligeramente ácido (pH 6.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, fuertes; muy pocos poros finos, vesiculares, in-ped; no hay presencia de raíces; límite claro, uniforme. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla en caras de agregados de grosor moderado; manchas y motas, comunes, rojizas, finas, irregulares, con límite claro, en caras de agregados. Presencia de slickensides
Bck	88-105	Color en húmedo gris pardusco claro (10YR 6/2); textura arcillosa; muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, moderado; poros comunes, finos, vesiculares, in/exped; no hay presencia de raíces; límite claro, uniforme.



A. Localidad

- Perfil: 11
- Nombre: Juxnajal
- Clasificación de suelo: Feozem réndzico arcílico
- Fecha de descripción: 18 de diciembre del 2012
- Autor: Montserrat Martínez, Sara López, Daniel Bravo
- Localización (coordenadas UTM): X: 593615 Y: 1800837
- Altitud: 1570 m snm
- Forma del terreno: Transición valle-pie de monte
- Pendiente: 2-5°
- Uso del suelo y vegetación: Agrícola (maíz y frijol)
- Clima: Precipitación media anual: 1,109.4mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 19.8°C (datos provenientes de la estación meteorológica Comitán del Servicio Meteorológico Nacional).

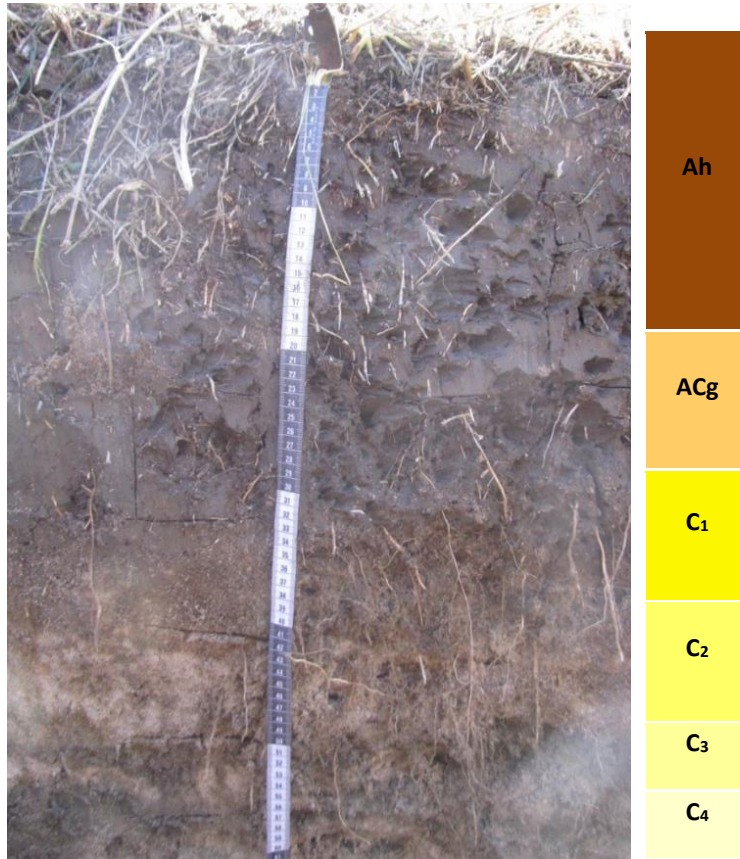
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Coluvial, caliza
- b. Drenaje natural: Moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Muy seca a seca
- d. Presencia de rocas superficiales: 2-10% de gravas. Clase 1
- e. Evidencias de erosión: Ligera, laminar, clase 1
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 19. Descripción y evaluación de perfil Juznajal.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción del perfil
Ap	0-3	Color en húmedo pardo oscuro (10YR3/3); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.2%); ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, finos y muy finos, de grado débil; muy baja estabilidad de agregados; pocas concreciones de tipo Fe-Mn, mayores a 1mm, redondeadas; 2-10 % de gravas y cantos; muchos poros, finos, exped, intersticiales; no hay presencia de raíces; límite claro, uniforme.
Ah1	3-11/14	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.5); ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques muy gruesos; alta estabilidad de agregados; pocas concreciones de tipo Fe-Mn, mayores a 1mm, redondeadas; 2-10 % de gravas y cantos; muchos poros, muy finos, intersticiales, exped, grandes, intersticiales, vesiculares, im/exped; densidad de raíces mediana; límite gradual, ondulado.
Ah2	11/14-38	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (1.8); ligeramente alcalino (pH 7.6 en CaCl ₂); estructura angular y subangular en bloques muy gruesos; alta estabilidad de agregados; pocas concreciones de tipo Fe-Mn, mayores a 1mm, redondeadas; 2-10 % de gravas y cantos; pocos poros tubulares; densidad de raíces baja; límite claro, uniforme.
ACk	38-60	No se describió.



A. Localidad

- a. Perfil: 12
- b. Nombre: Carrizal
- c. Clasificación de suelo: Fluvisol stágnico (calcárico, eútrico)
- d. Fecha de descripción: 20 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 626128 Y: 1785210
- g. Altitud: 1466 m snm
- h. Forma del terreno: Llanura de inundación
- i. Uso del suelo y vegetación: Pastizal
- j. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre); temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

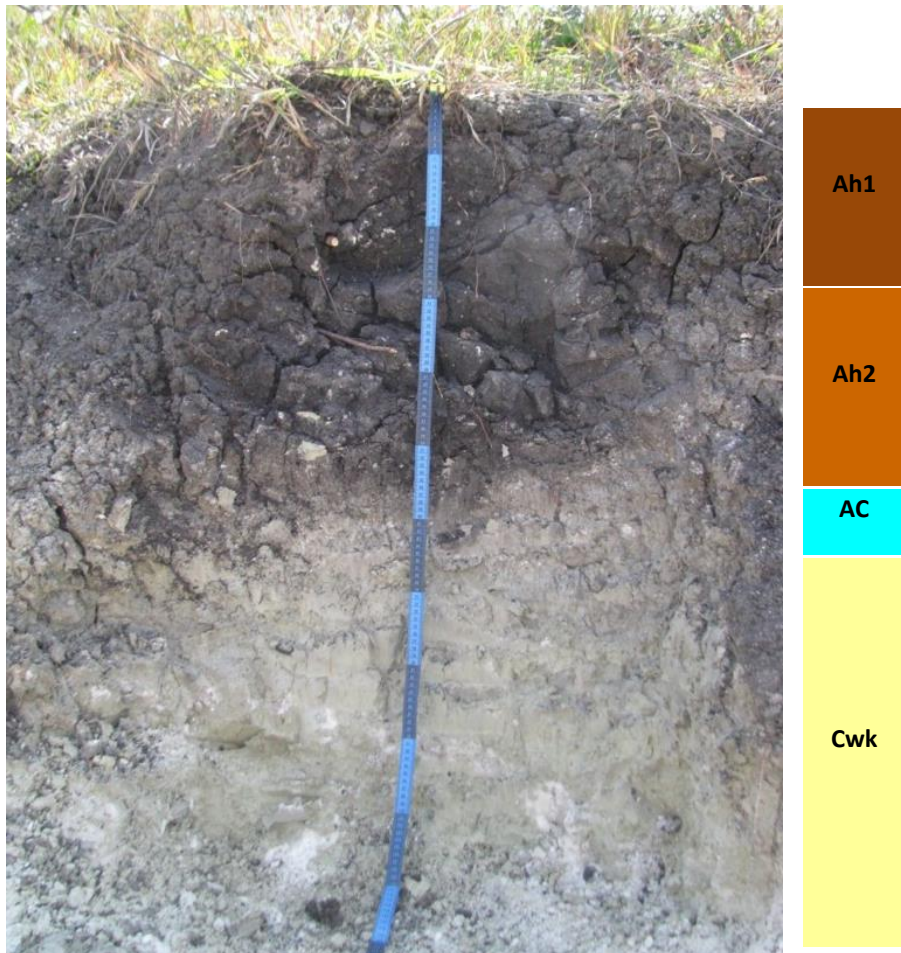
- a. Material parental: Sedimentos lacustres
- b. Drenaje natural: Moderado

- c. Condiciones de humedad del perfil: Húmeda a fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: No

C. Descripción del perfil.

Cuadro 20. Descripción y evaluación de perfil Carrizal

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-22/24	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (6.6%); muy ligeramente ácido (pH 6.7 en CaCl ₂); suelo sin estructura (masiva); pocos poros muy finos, tubulares; densidad de raíces muy alta; límite claro, uniforme. Rasgos pedológicos: pocas manchas rojas en canales de raíces.
ACg	22/24-31	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); textura arcillo arenosa; contenido medio de M.O. (2.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.1 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques fuertes; pocos poros, muy finos, tubulares, in-ped; densidad de raíces muy alta; límite claro, uniforme. Rasgos pedológicos: concreciones rojizas, en canales de raíces, redondeadas, muy frecuentes, grandes, duras, de óxido de hierro; pocas manchas rojas en canales de raíces.
C1	31-41	Color en húmedo pardo (10YR 4/3); textura arenosa franca; muy bajo contenido de M.O. (0.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura bloques redondeados, medianos y finos de grado moderado; poros abundantes, finos y muy finos, intersticiales, tubulares; densidad de raíces mediana; límite claro, uniforme.
C2	41-51	Color en húmedo pardo muy pálido (10YR 8/2); textura arenosa; muy bajo contenido de M.O. (0.3%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura migajón muy fino; poros muy finos y gruesos, exped, vesiculares, in-ped, tubulares; densidad de raíces mediana; límite claro, uniforme.
C3	51-58	Color en húmedo pardo olivo (2.5Y 4/3); textura franco arcillo arenosa; reacción neutra (pH 7 en campo con CaCl ₂); estructura en bloques redondeados, gruesos y moderados; muchos poros micro, tubulares, in-ped; densidad de raíces mediana; límite claro, uniforme.
C4	58-65	Color en húmedo pardo muy pálido (10YR 8/2); textura arenosa; reacción neutra (pH 7 en campo con CaCl ₂); estructura migajon muy fino; poros comunes, finos y muy finos, tubulares, in-ped, vesiculares; densidad de raíces baja; límite claro, uniforme
C5	65-100	Color en húmedo pardo olivo (2.5Y 4/3); textura franco arcillo limosa; reacción neutra (pH 7 en campo con CaCl ₂); estructura en bloques subangulares, muy gruesos y medianos; densidad de raíces baja



A. Localidad

- a. Perfil: 13
- b. Nombre: Prado Zapata
- c. Clasificación de suelo: Feozem réndzico (páquico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 18 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 608442 Y: 1789853
- g. Altitud: 1536 m snm
- h. Forma del terreno: Planicie, relleno laguna paleolacustre
- i. Pendiente: 2.5°
- j. Uso del suelo y vegetación: Bosque perturbado de pino-encino
- k. Clima: Precipitación media anual: 908.2mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 18.7°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Trinitaria del Servicio Meteorológico Nacional).

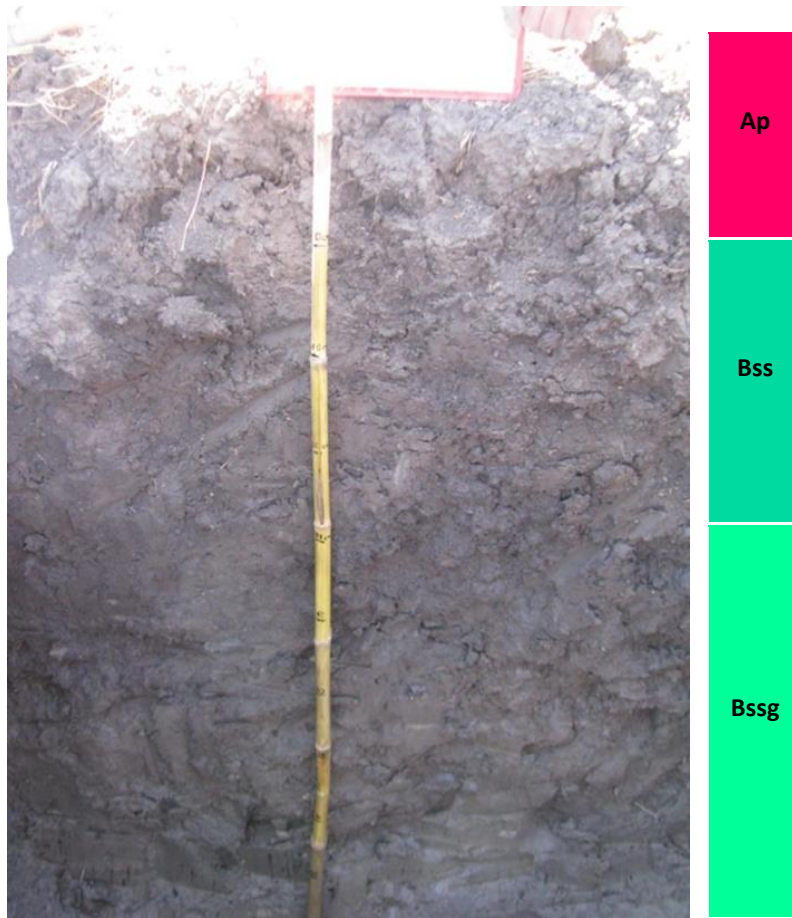
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Sedimentos lacustres
- b. Drenaje natural: Moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Muy seca a húmeda
- d. Presencia de rocas superficiales: 5% (tipo pedernal, rojizas)
- e. Evidencias de erosión: Cárcavas
- f. Influencia humana: No

C. Descripción del perfil.

Cuadro 21. Descripción y evaluación de perfil Prado Zapata

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-25	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.7%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesa, fuerte; estabilidad de agregados mediana; pedregosidad baja (5%); poros comunes, micros, dentro del agregado; densidad de raíces mediana. Rasgos pedológicos: concreciones frecuentes, color blanco, pequeñas, duras, de tipo calcita
Ah2	25-51	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.7%); muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesa, fuerte; estabilidad de agregados mediana; pedregosidad baja (5%); pocos poros, micro, dentro de agregados; baja densidad de raíces; límite gradual, horizontal. Rasgos pedológicos: concreciones dominantes, grandes, suaves, de tipo calcita
AC	51-60	Color en húmedo gris (5YR 5/1); textura arcillosa; contenido muy bajo de M.O. (0.6%) muy ligeramente alcalino (pH 7.4 en CaCl ₂); estructura masiva; pedregosidad baja (5%); pocos poros, finos, vesiculares, elongados; baja densidad de raíces; límite gradual, horizontal
Cwk	60-105	Color en húmedo gris claro (10YR 7/1); textura arcillosa; Contenido muy bajo de M.O. (0.6%) muy ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura masiva; pedregosidad baja (5%); pocos poros finos, vesiculares, elongados; baja densidad de raíces. Rasgos pedológicos: concreciones dominantes, muy grandes, de tipo calcita



A. Localidad

- a. Perfil: 14
- b. Nombre: Llanura grande, Venustiano Carranza
- c. Clasificación de suelo: Vertisol stágico (húmico, mesotrófico)
- d. Fecha de descripción: 19 de diciembre del 2012
- e. Autor: Sara López
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 611972 Y: 1789918
- g. Altitud: 1501 m snm
- h. Forma del terreno: Llanura plana, parte baja. Valle aluvial
- i. Pendiente: 0-2°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola, maíz de temporal y arado con maquinaria
- k. Clima: Precipitación media anual: 908.2 mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 18.7°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Trinitaria del Servicio Meteorológico Nacional).

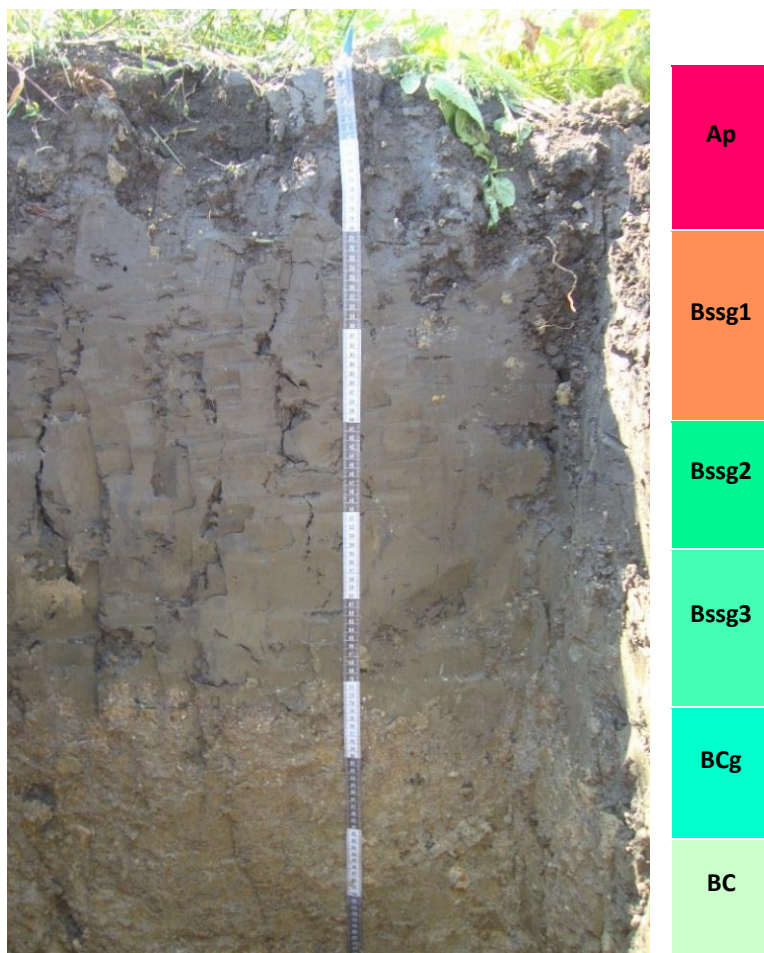
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Sedimentos aluviales, carbonatos
- b. Drenaje natural: Moderado a deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a mojada
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 22. Descripción y evaluación de perfil Llanura grande, Venustiano Carranza

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.0%); fuerte a moderadamente ácido (pH 5.0 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques muy gruesos, bien desarrollados; estabilidad de agregados mediana; poros gruesos, comunes, in/exped, tubulares y vesiculares, muy gruesos; densidad de raíces alta; límite difuso, horizontal. Rasgos pedológicos: presencia de slickensides (+).
Bss	20-60	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.4%); fuertemente ácido (pH 4.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos y gruesos; estabilidad de agregados mediana a alta; poros comunes, muy finos, pocos vesiculares, in-ped; densidad de raíces muy baja; límite claro. Rasgos pedológicos: presencia de slickensides (++)
Bssg	60-90	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.1%); moderadamente ácido (pH 5.3 en CaCl ₂); suelo sin estructura (masiva); no hay presencia de raíces. Rasgos pedológicos: concreciones de manganeso, abundantes, duras, esféricas e irregulares, grandes y pequeñas; presencia de slickensides (+++).



A. Localidad

- a. Perfil: 15
- b. Nombre: El Triunfo 1
- c. Clasificación de suelo: Vertisol stágico (mesotrófico, hipereútrico, pélico)
- d. Fecha de descripción: 19 de diciembre del 2012
- e. Autor: Mario Cayetano, Montserrat Martínez, Carolina
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 620340 Y: 1790341
- g. Altitud: 1484 m snm
- h. Forma del terreno: Pie de monte alargado
- i. Pendiente: 1-2°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (maíz, jitomate, frijol)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre);
Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional).

B. Información general acerca del suelo

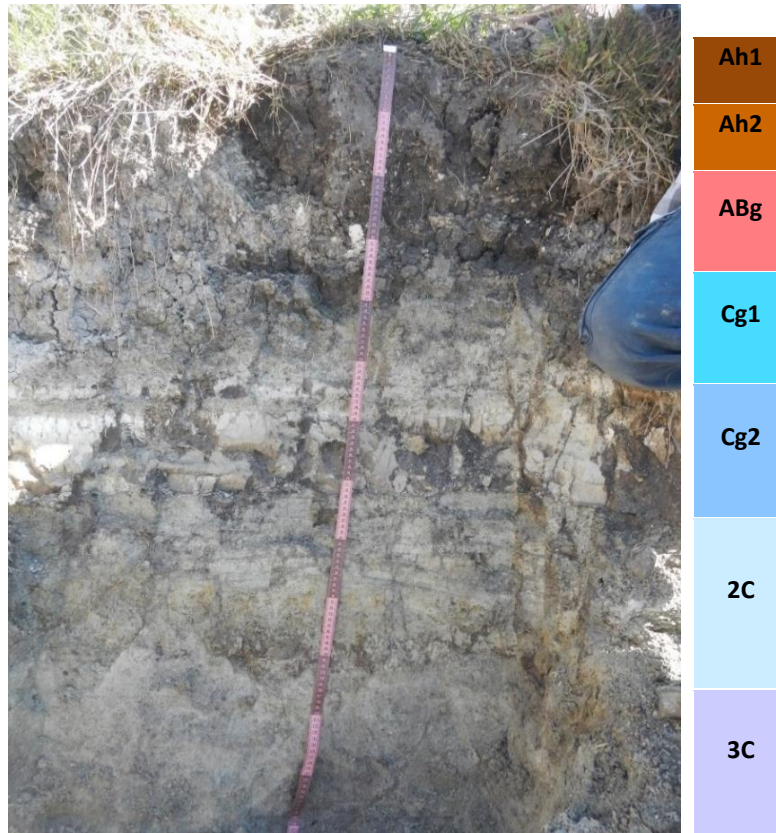
- a. Material parental: Caliza-lutita
- b. Drenaje natural: Deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a húmeda
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: Ligera, laminar, clase 1
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 23. Descripción y evaluación de perfil El Triunfo 1.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo gris muy oscuro (5Y 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.5%); moderadamente ácido (pH 5.2 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos y gruesos, grado fuerte; estabilidad de agregados alta; muchos poros finos y medianos, tubulares, vesiculares e intersticiales; densidad de raíces extremadamente alta; límite claro, uniforme. Rasgos pedológicos: 1% de concreciones rojas (2.5YR 5/8), grandes (1-2mm), esféricas, suaves; 1% de manchas rojas (5YR 6/8).
Bssg1	20-40	Color en húmedo gris muy oscuro (5Y 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.7%); moderadamente ácido (pH 5.1 en CaCl ₂); estructura angular en bloques medianos y gruesos con grado fuerte; estabilidad de agregados alta; muchos poros finos, tubulares, vesiculares e intersticiales; densidad de raíces alta; límite difuso, uniforme. Rasgos pedológicos: 1% de concreciones rojas (2.5YR 5/8), grandes (1-2mm), esféricas, suaves; 1% de manchas rojas (5YR 6/8); presencia de slickensides (+).
Bssg2	40-55	Color en húmedo gris olivo oscuro (5Y 3/2); textura arcillosa; bajo contenido de M.O. (1.5%); moderadamente ácido (pH 5.7 en CaCl ₂); estructura angular en bloques grandes y fuertes; estabilidad de agregados alta; muchos poros finos y muy finos, vesiculares y tubulares; densidad de raíces alta; límite gradual, uniforme. Rasgos pedológicos: 1% de concreciones rojas (2.5YR 5/8), grandes (1-2mm), esféricas, suaves y 1% de concreciones (10YR 1.7/8), grandes (2-4mm); 25% de manchas y motas rojas (5YR 6/8); presencia de slickensides (+++).
Bssg3	55-70/76	Color en húmedo gris olivo oscuro (5Y 3/2); textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.6%); ligeramente ácido (pH 6.1 en CaCl ₂); estructura angular en bloques gruesos, fuertes; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros finos, tubulares, vesiculares e intersticiales; densidad de raíces alta; límite abrupto, ondulado. Rasgos pedológicos: 1% de concreciones rojas (2.5YR 5/8), grandes (1-2mm), esféricas, suaves y 1% de concreciones (10YR 1.7/8), grandes (2-4mm), suaves, oscuras; 20% de manchas y motas rojas (5YR 6/8); presencia de slickensides (+++).

BCsbg1	70/76-93	Color en húmedo gris olivo (5Y 4/2); textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos a grandes, grado moderado; estabilidad de agregados mediana; pedregosidad mediana (30%); muchos poros tubulares, intersticiales, finos; densidad de raíces muy baja; límite difuso, irregular. Rasgos pedológicos: 1% de concreciones rojas (2.5YR 5/8), grandes (1-2mm), esféricas, suaves; 20% de manchas rojas (5Y 7/6); presencia de slickensides (+).
BCsbg2	93-110	Color en húmedo olivo (5Y 4/3); textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques medianos, grado débil-moderado; pedregosidad mediana (15%); muchos poros tubulares, intersticiales, finos y medianos; densidad de raíces muy baja. Rasgos pedológicos: 20% de manchas rojas (5Y 7/6).



A. Localidad

- a. Perfil: 16
- b. Nombre: El Triunfo 2
- c. Clasificación de suelo: Regosol stágnico (eútrico, arcílico)
- d. Fecha de descripción: 20 de diciembre del 2012
- e. Autor: Mario Cayetano, Sara López
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 620876 Y: 1791432
- g. Altitud: 1494 m snm
- h. Forma del terreno: Pie de monte alargado
- i. Pendiente: 0-2°
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola de temporal (maíz y frijol)
- k. Clima: Precipitación media anual: 1,211.1mm (mayor en los meses mayo a octubre);
Temperatura media anual: 17.2°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Esperanza del Servicio Meteorológico Nacional)

B. Información general acerca del suelo

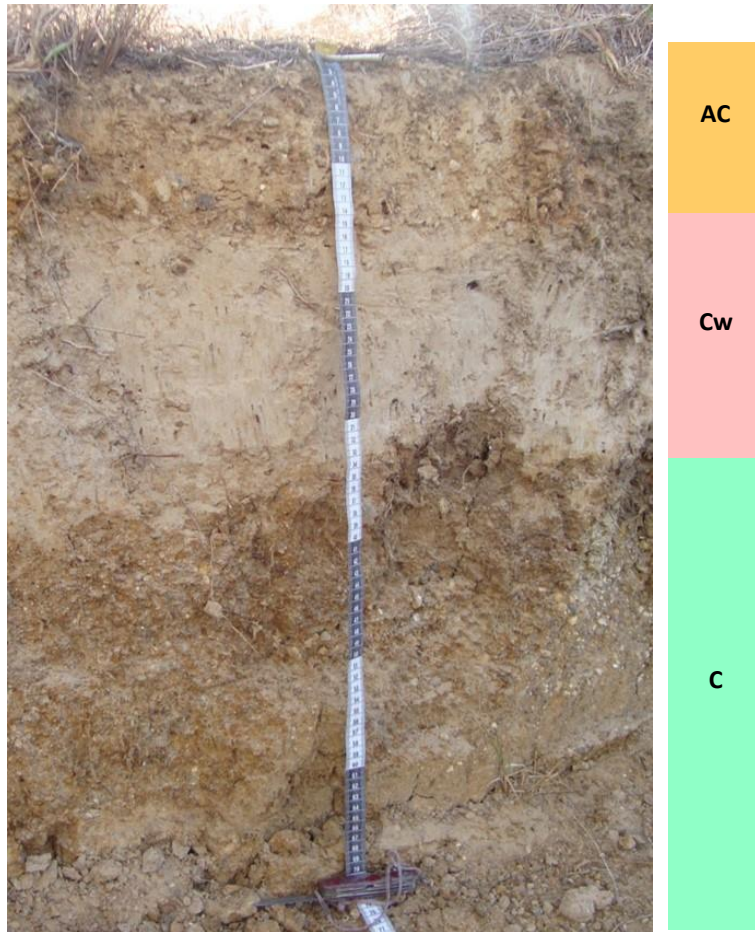
- a. Material parental: Sedimentos lacustres
- b. Drenaje natural: Moderado a deficiente
- c. Condiciones de humedad del perfil: Muy seca a fresca
- d. Presencia de rocas superficiales: <1%

- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

D. Descripción del perfil.

Cuadro 24. Descripción y evaluación de perfil El Triunfo 2.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah1	0-1	Color en húmedo pardo rojizo oscuro (5YR 2.5/2); textura (en campo) franco arcillo arenosa; contenido medio de M.O. (2.6%); muy ligeramente ácido (pH 6.8 en CaCl ₂); estructura granular, fina, fuerte; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros finos y muy finos, tubulares, intersticiales, vesiculares, in/exped; densidad de raíces muy alta; límite claro, uniforme.
Ah2	1-17	Color en húmedo gris muy oscuro (5YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.3%); muy ligeramente ácido (pH 6.7 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, muy fuertes; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros finos, vesiculares e intersticiales, in/exped; densidad de raíces muy alta; límite gradual, uniforme
ABg	17-32	Color en húmedo pardo fuerte 7.5YR 4/6; textura arcillosa; bajo contenido de M.O. (1.7%); muy ligeramente ácido (pH 6.9 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, muy grandes, fuertes; estabilidad de agregados alta; muchos poros intersticiales, pocos tubulares, finos, in/exped; densidad de raíces muy alta; límite claro, ondulado. Rasgos pedológicos: 15% de manchas y motas, color (2.5Y 5/4), de tamaño 2-5 mm, irregulares, in/exped, límite difuso.
Cg1	32-51/54	Color en húmedo olivo pálido (5Y 6/4); textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.7%); muy ligeramente ácido (pH 6.8 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, débiles; estabilidad de agregados mediana; muchos poros finos, intersticiales, in/exped; densidad de raíces alta; límite claro, uniforme.
Cg2	51/54-73	Sedimento; límite claro, abrupto. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla o M.O. entre las caras de los sedimentos; 20% de manchas y motas, naranjas (7.5YR 5/8), tamaño 2-15mm, irregulares, in/exped, límite claro y difuso.
2C	73-105/120	Color en húmedo pardo (7.5YR 5/2); textura franco arcillo limosa; muy bajo contenido de M.O. (0.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, débiles; estabilidad de agregados baja; poros comunes, intersticiales, finos, in/exped; baja densidad de raíces; límite claro, ondulado. Rasgos pedológicos: Cutanes de arcilla, delgados, exped; 3% de manchas y motas, grises (7.5YR 5/0), irregulares, in/exped.
3C	105/120-138	Color en húmedo pardo fuerte 7.5YR 4/6; textura arcillosa; muy bajo contenido de M.O. (0.3%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura angular en bloques, medianos, moderados; estabilidad de agregados mediana; poros comunes, intersticiales, vesiculares, finos, in/exped; densidad de raíces nula. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla, continuos, delgados, in/exped.



A. Localidad

- a. Perfil: 17
- b. Nombre: Santa Rita, El Lavadero
- c. Clasificación de suelo: Planosol háplico (dístrico, arénico)
- d. Fecha de descripción: 21 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 610339 Y: 1784746
- g. Altitud: 1544 m snm
- h. Forma del terreno: Colina fuertemente disectada
- i. Pendiente: No
- j. Uso del suelo y vegetación: Bosque de pino-encino alterado
- k. Clima: Precipitación media anual: 908.2mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 18.7°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Trinitaria del Servicio Meteorológico Nacional)

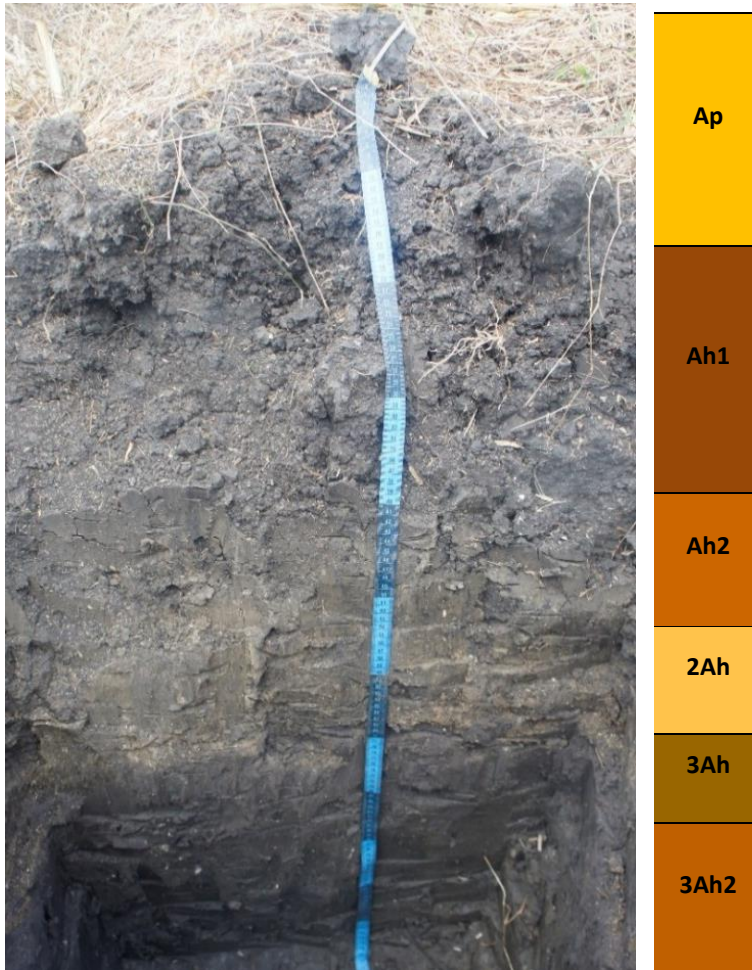
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Conglomerado
- b. Drenaje natural: Bueno
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca
- d. Presencia de rocas superficiales: 40-50%
- e. Evidencias de erosión: Cárcavas en los alrededores
- f. Influencia humana: Corte de carretera

C. Descripción del perfil.

Cuadro 25. Descripción y evaluación de perfil Santa Rita, El Lavadero

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
AC	0-15	Color en húmedo pardo olivo claro (2.5Y 5/6); textura franco arenosa; contenido bajo de M.O. (1.7%); fuertemente ácido (pH 4.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, pequeños, grado fuerte; estabilidad de agregados mediana; pedregosidad alta (40-50%); poros vesiculares, medianos, finos, comunes; densidad de raíces mediana; límite horizontal, claro.
Cw	15-34	Color en húmedo pardo amarillento (10YR 5/4); textura franco arcillo arenosa; muy bajo contenido de M.O. (1.0%); fuertemente ácido (pH 4.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, débiles; estabilidad de agregados mediana; pedregosidad baja (10%); pocos poros vesiculares, gruesos; densidad de raíces mediana; límite horizontal, claro.
C	34-70	Color en húmedo amarillo (10YR 7/6); textura franco arenosa; muy bajo contenido de M.O. (0.5%); fuertemente ácido (pH 4.1 en CaCl ₂); suelo sin estructura; pedregosidad extremadamente alta (70-80%); pocos poros, vesiculares, finos y medianos; densidad de raíces baja.



A. Localidad

- a. Perfil: 18
- b. Nombre: Ejido Santa Rita, Antonio López
- c. Clasificación de suelo: Feozem háplico (arcílico)
- d. Fecha de descripción: 21 de diciembre del 2012
- e. Autor: Daniel Bravo, Carolina
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 609820 Y: 1785154
- g. Altitud: 1542 m snm
- h. Forma del terreno: Valle-Terraza
- i. Uso del suelo y vegetación: Agrícola de temporal (maíz y frijol)
- j. Clima: Precipitación media anual: 908.2mm (mayor en los meses mayo a octubre);
Temperatura media anual: 18.7°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Trinitaria del Servicio Meteorológico Nacional).

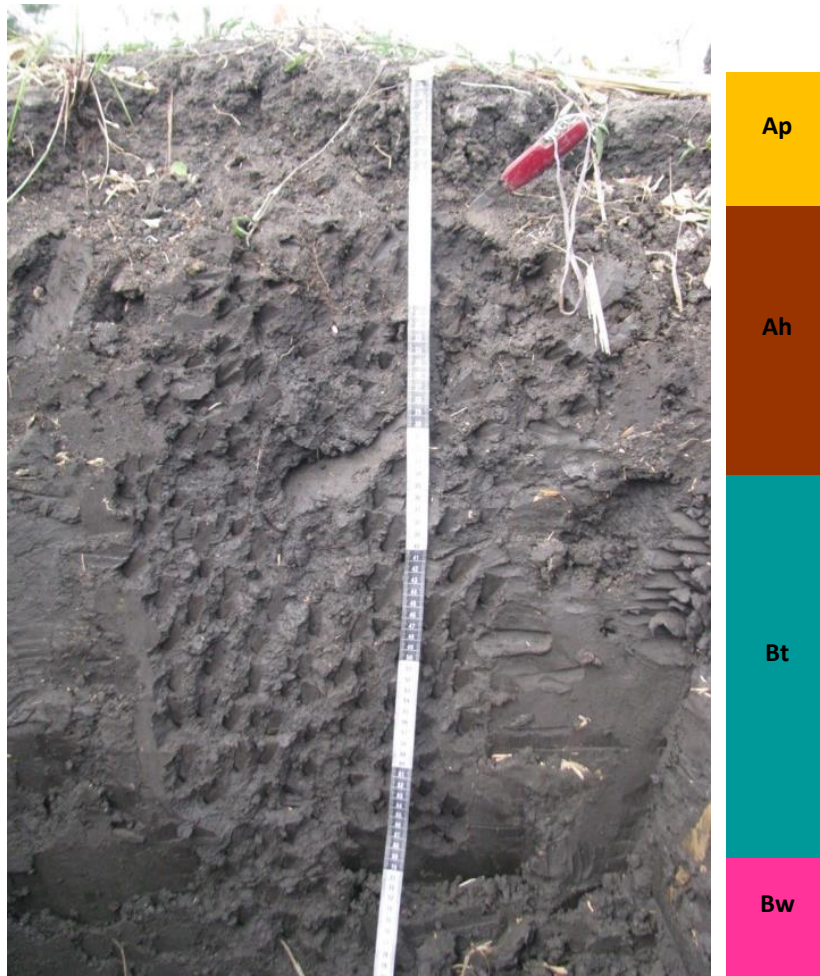
B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Caliza
- b. Drenaje natural: Bueno a moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca en profundidad
- d. Presencia de rocas superficiales: No
- e. Evidencias de erosión: Laminar
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 26. Descripción y evaluación de perfil Santa Rita, Antonio López.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (5.4%); moderadamente ácido (pH 5.7 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, fuertes; estabilidad de agregados muy alta; muchos poros finos y muy finos, vesiculares, intersticiales, in/exped; densidad de raíces alta; límite gradual, uniforme.
Ah1	20-40	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.9%); moderadamente ácido (pH 5.4 en CaCl ₂); estructura angular en bloques, grandes, fuertes; estabilidad de agregados alta; muchos poros, finos, vesiculares, in-ped; densidad de raíces alta; límite gradual, uniforme.
Ah2	40-49/59	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.5%); moderadamente ácido (pH 5.7 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, grado moderado; estabilidad de agregados alta; pocos poros, finos, vesiculares, tubulares, in-ped; densidad de raíces mediana; límite claro, irregular.
2Ah	49/59-70	Color en húmedo pardo olivo oscuro (2.5Y 3/3); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.5%); muy ligeramente alcalino (pH 7.3 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos, grado moderado; estabilidad de agregados baja; muchos poros finos y muy finos, intersticiales, in/exped; no hay presencia de raíces; límite claro, irregular.
3Ah	70-84	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura franco arcillo arenosa; contenido bajo de M.O. (1.1%); muy ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, grado fuerte; estabilidad de agregados alta; poros comunes, muy finos, vesiculares, in-ped; no hay presencia de raíces; límite gradual, regular.
3Ah2	84-120	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido bajo de M.O. (1.2%); muy ligeramente alcalino (pH 7.5 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, grandes, grado fuerte; estabilidad de agregados alta; pocos poros, muy finos, vesiculares, in-ped; no hay presencia de raíces.



A. Localidad

- a. Perfil: 19
- b. Nombre: Jobala
- c. Clasificación de suelo: Feozem lúvico (páquico, arcillo)
- d. Fecha de descripción: 21 de diciembre del 2012
- e. Autor: Lucy Mora
- f. Localización (coordenadas UTM): X: 609588 Y: 1784880
- g. Altitud: 1543 m snm
- h. Forma del terreno: Terraza alta
- i. Pendiente: No
- j. Uso del suelo y vegetación: Agrícola (maíz y frijol)
- k. Clima: Precipitación media anual: 908.2mm (mayor en los meses mayo a octubre); Temperatura media anual: 18.7°C (datos provenientes de la estación meteorológica La Trinitaria del Servicio Meteorológico Nacional)

B. Información general acerca del suelo

- a. Material parental: Caliza
- b. Drenaje natural: Moderado
- c. Condiciones de humedad del perfil: Seca a fresca en profundidad
- d. Presencia de rocas superficiales: 10% pequeñas y medianas
- e. Evidencias de erosión: No
- f. Influencia humana: Agricultura

C. Descripción del perfil.

Cuadro 27. Descripción y evaluación de perfil Jobala

Horizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap	0-13	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medianamente alto de M.O. (4.7%); moderadamente ácido (pH 5.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, gruesos, fuertes; estabilidad de agregados alta; pedregosidad baja (10%); poros frecuentes, muy finos a medios, vesiculares, tubulares, in/exped; densidad de raíces baja a mediana; límite abrupto, horizontal. Rasgos pedológicos: manchas rojizas, frecuentes, a lo largo de poros; nódulos de hierro frecuentes.
Ah	13-34	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (3.9%); moderadamente ácido (pH 5.6 en CaCl ₂); estructura subangular en bloques, medianos y pequeños, fuertes; estabilidad de agregados alta; pedregosidad baja (1%); pocos poros comunes, finos a medianos, vesiculares, tubulares, in-ped; densidad de raíces baja; límite difuso, horizontal. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla.
Bt	34-72	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; contenido medio de M.O. (2.0%); ligeramente ácido (pH 6.2 en CaCl ₂); estructura angular en bloques bien desarrollados, fuertes; estabilidad de agregados alta; pedregosidad baja (5-10%); pocos poros, muy finos, tubulares, in-ped; no hay presencia de raíces; límite difuso, horizontal. Rasgos pedológicos: cutanes de arcilla.
Bw	72-100	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1); textura arcillosa; bajo contenido de M.O. (1.4%); muy ligeramente alcalino (pH 7.2 en CaCl ₂); estructura angular y subangular en bloques, gruesos, desarrollados, fuertes; estabilidad de agregados mediana; pocos poros, micro, tubulares, in-ped; no hay presencia de raíces.