



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

Ecohidrología de la “montaña
sagrada” de la cultura Teotihuacana

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

Presenta

AIDEE NADXIELII GARCÍA PLATA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN REYES ÁNGELES CERVANTES



CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2017



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.

ECOHIDROLOGÍA DE LA MONTAÑA SAGRADA DE LA CULTURA TEOTIHUACANA

RESUMEN

El Parque Estatal Cerro Gordo fue para la cultura Teotihuacana una montaña sagrada, por el gran número de manantiales que existían y los cuales proveían de agua al pueblo. Una hipótesis es que el mal manejo de los bosques ocasionó cambios ambientales y la decadencia del pueblo teotihuacano. Los bosques contribuyen a la captación de lluvia y el suelo a conducirlo a los mantos acuíferos, al fragmentarlo esta función, así, como los manantiales se pierden, sin embargo, las propiedades hídricas del suelo de los bosques y los efectos de la fragmentación se desconocen, por lo cual, esto fue parte de los objetivos de este trabajo. En la cumbre de esta montaña sagrada aún existen encinares en buen estado de conservación, y encinares fragmentados con menor densidad arbórea, así, como sitios desprovistos de vegetación con tepetates descubiertos. En estos tres sitios se obtuvieron registros de la tasa de infiltración, conductividad hidráulica saturada y potencial de flujo mátrico por medio del Permeámetro Guelph 2800K1, con cilindros se obtuvo el % de humedad y la densidad aparente, por el método WDPT se registró la hidrofobicidad del suelo. Además, se tomaron muestras de suelo para determinar las propiedades químicas y para el análisis micromorfológico (forma, tamaño, tipo de poros, % de espacio poroso). En este estudio se obtuvo que la montaña sagrada presenta la mayor tasa de infiltración (R_2) y la conductividad hidráulica (K_{fs}) (21520 y 2759 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente) registradas a nivel nacional e internacional para Andosoles en bosques de coníferas e incluso superiores a las registradas en zonas tropicales. La alta K_{fs} indica que esta montaña tiene la capacidad de dar origen a manantiales, sin embargo, la fragmentación del ecosistema y el alto contenido de arcillas 2:1 del suelo, intensificó los procesos de contracción y expansión, lo cual, alteró los procesos hidrológicos, la estructura y la porosidad de los suelos, esto favoreció el arrastre y erosión de grandes bloques de suelo y ocasionó la presencia de los tepetates y desaparición de manantiales.

Palabras clave. Ecohidrología, montaña sagrada, cultura Teotihuacana, propiedades hídricas y fragmentación.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
Concepto de ecohidrología.....	2
Cultura Teotihuacana.....	2
Montañas sagradas.....	3
Suelos volcánicos.....	4
Propiedades hídricas del suelo.....	4
Micromorfología del suelo.....	6
Propiedades químicas del suelo.....	8
Mineralogía de Andosoles.....	9
3. OBJETIVOS	10
Objetivo general.....	10
Objetivos particulares.....	10
4. MÉTODO	10
Selección de sitios de estudio.....	13
Evaluación de las propiedades hídricas.....	14
Evaluación de las propiedades químicas.....	16
Análisis micromorfológico.....	17
Análisis estadístico.....	17
5. RESULTADOS	18
Diagnóstico de las propiedades hídricas.....	18
Perfiles de infiltración.....	20
Diagnóstico de la micromorfología y porosidad del suelo.....	23
Diagnóstico de las propiedades químicas.....	27

6. DISCUSIÓN.....	30
Estructura vegetal del bosque conservado y fragmentado.....	30
Propiedades hídricas del suelo del bosque conservado y efectos de la fragmentación.....	31
Propiedades físicas.....	33
Propiedades hídricas del suelo de la montaña sagrada en el contexto nacional e internacional.....	34
Origen de manantiales.....	37
Efectos de la fragmentación de bosques sobre las propiedades hídricas y la pérdida de manantiales.....	40
Diagnostico hídrico del bosque fragmentado.....	41
7. CONCLUSIONES.....	42
8. LITERATURA CITADA.....	43

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal.....	1
2. Variación de las propiedades hídricas del bosque conservado, fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	18
3. Densidad aparente, porcentaje de humedad e hidrofobicidad superficial del bosque conservado, del fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	19
4. Valores de la tasa de infiltración en diferentes perfiles de suelo del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	20
5. Valores de la tasa de infiltración en diferentes perfiles de suelo del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	20
6. Micromorfología de los suelos del bosque conservado y fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	24
7. Propiedades químicas de los suelos de bosques conservado, fragmentado y de tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo.....	28
8. Tasas de infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (Kfs) a nivel nacional.....	34
9. Tasas de infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (Kfs) a nivel internacional.....	35

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación geográfica del Parque Estatal Cerro Gordo.....	11
2. Flujos superficiales del Cerro Gordo, según el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) de CONAGUA.....	12
3. Sitios de estudios en el Cerro Gordo, Estado de México.....	14
4. Permeámetro Guelph 2800K1.....	15
5. Variaciones de los perfiles de infiltración del suelo del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	21
6. Variaciones de los perfiles de infiltración del suelo del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	22
7. Secciones del suelo del Bosque Conservado (A, C, E) y Fragmentado (B, D, F) del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	25
8. Microfotografías de la estructura y porosidad del suelo del bosque conservado (a, c, e) y del bosque fragmentado (b, d, f) del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	26
9. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 del bosque conservado y fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	29
10. Vegetación del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	30

11. Diámetro de la base de los encinos del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	30
12. Vegetación del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.....	31
13. Variación de la tasa de infiltración (R2) del bosque conservado (BC) y bosque fragmentado (BF) del Parque Estatal Cerro Gordo, con respecto al promedio de la temperatura ambiental.....	32
14. Macroestructura de los tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo.....	33
15. Tasas de Infiltración superficial y de conductividad hidráulica saturada (Kfs) en varios bosques templados a nivel nacional e internacional.....	35
16. Infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (Kfs) nacional e internacional de bosques tropicales.....	36
17. Parte alta del sistema montañoso del Ajusco.....	37
18. Corte en el suelo de la parte alta del sistema montañoso del Ajusco.....	38
19. Cambio de capas en el perfil suelo-roca y manantial.....	38
20. Perfil de suelo del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	39
21. Perfil de suelo del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.....	39
22. Estructura de bloques columnares en los tepetates.....	40

1. INTRODUCCIÓN

La ecohidrología es la comprensión de las interacciones funcionales entre los procesos hidrológicos, la vegetación y el suelo a diferentes escalas (Vose *et al.*, 2011). Cada ecosistema tiene diferentes procesos hidrológicos, los cuales se explican al evaluar las propiedades hídricas (tasa de infiltración, conductividad hidráulica saturada, potencial de flujo mátrico, porosidad, densidad aparente, humedad e hidrofobicidad) del suelo.

Los bosques de las montañas permiten la recarga de acuíferos, la formación de ríos y de manantiales; por lo cual, han sido vistas como portadoras de vida, agua, alimento, dadores de lluvia y maíz desde tiempos prehispánicos (Broda, 2003).

La montaña sagrada de los teotihuacano es el volcán Cerro Gordo, y se mencionan que existía un gran número de manantiales, que proveían de agua al pueblo para satisfacer sus necesidades, además, la productividad de sus suelos permitió el desarrollo de la agricultura y por tal razón, fue considerado montaña sagrada para la cultura Teotihuacana. Al respecto, Fernández-Galán (2013) reporta por primera vez la presencia de Andosoles en la cima de esta montaña. Sin embargo, las propiedades hídricas de la montaña sagrada son desconocidas, lo cual no permite conocer la función hidrológica de esta montaña y comprender la importancia que tuvo para el desarrollo de la cultura Teotihuacana.

En la cima de la montaña sagrada, existe aún un bosque de encino con árboles adultos de troncos muy gruesos (dap \pm 140 cm) que permiten suponer una edad de aproximadamente 1500 años, y por lo tanto, pueden representar los suelos y la vegetación original. Pero la fragmentación y el aflore de tepetates en este cerro, es un problema que puede alterar la calidad de suelos.

Se ha sugerido que la destrucción de los bosques de Teotihuacán y aledaños, causó el decline de la ciudad, sin embargo, faltan más investigación al respecto.

Por lo anterior surgen las siguientes interrogantes:

¿Qué propiedades hídricas tienen los suelos de esta montaña?

¿Las propiedades hídricas del suelo pueden generar manantiales?

¿La fragmentación de los ecosistemas alteraron los procesos hidrológicos?

La respuesta a estas interrogantes permitirá explicar la función hidrológica de la montaña sagrada de los teotihuacanos, en la formación de manantiales.

2. MARCO TEÓRICO

Concepto de ecohidrología

En la Conferencia Internacional sobre el Agua y Medio Ambiente, efectuada en Dublín, 1992, surgió la ecohidrología, cuyo nombre surge de la fusión de los términos "hidrología" y "ecología". Y se define como la comprensión integrada de los procesos biológicos e hidrológicos que ocurren en una cuenca de drenaje (UNESCO, 2010).

Vose *et al.*, (2011) mencionan que la ecohidrología es la comprensión de las interacciones funcionales entre los procesos hidrológicos, la vegetación y el suelo a diferentes escalas.

Cultura Teotihuacana

Es considerada una de las culturas más importantes del Altiplano Central del periodo clásico, con sede de su poder político en la gran urbe de Teotihuacán. Se ubica en el valle del mismo nombre, con orientación Noreste-Sureste de 15 km de largo por 7 km de ancho, al norte el Cerro Gordo y el cerro Malinalco, al sur por el cerro Patlachique, al Este el cerro Cuauhtlanzingo y al Oeste el cerro Tlahuilco. Según Heyden (1973) (citado en Flores-Herrera, 2013) la elección del valle seguramente se debió a las excelentes condiciones ambientales para la supervivencia.

La fase Cuanalán (500-150 a. C.) marca los inicios de la civilización Teotihuacana, con los primeros asentamientos en planicies aluviales. A finales de esta etapa, se detectan varios núcleos de población: un pequeño asentamiento en el área de manantiales en el sudoeste de Teotihuacán y algunos núcleos de agricultores asentados en el norte del valle, además, del núcleo de asentamiento más antiguo en la Sierra del Patlachique (Sanders *et al.*, 1979:105-108 en Moragas, 2013).

Numerosos autores han participado en los procesos que explican el desarrollo de la ciudad y de la sociedad Teotihuacana. René Millon (1964) con el *mapping project* aporta una hipótesis del crecimiento poblacional, con un máximo de 85 000 habitantes y una extensión máxima de 22 km² de superficie de la ciudad. Para dicho crecimiento poblacional y abastecer la demanda alimenticia, Parlerm y Wolf (1972) (citado en Huerta, 2000) mencionan que el sistema de riego del valle de Teotihuacán tuvo su origen en el periodo prehispánico; Huerta (2000) menciona que este sistema se compone por una serie de arroyos que bajan por el norte del Cerro Gordo y otras serranías, así, como de numerosos manantiales.

Según Bradbury (1989) las aguas que infiltran en tierras altas, emergen en una serie de manantiales que fluyen a tasas casi constantes de 600 l/s en el valle de Teotihuacán.

Los manantiales son puntos o zonas de un terreno en los que una cantidad apreciable de agua fluye a la superficie de modo natural, procedente de un acuífero o depósito subterráneo (ATL, 2008). Son surgencias cuyas características hidrogeológicas evidencian la implicación de flujos regionales (Sánchez *et al.* 1998).

Montañas sagradas

En México se conoce que la montaña fue sagrada, y aún lo es para muchos, porque guarda una relación con lo divino, o al menos, así lo demuestran los hallazgos de ofrendas y reliquias depositadas en sus laderas y cimas (Montero, 2002).

En náhuatl *Altepetl* de *alt=agua* y *tepetl=cerro, montaña*; como lo cita el Códice Florentino (XI: VII, parag.. 9) que se refiere a su carácter como dador de vida a través del agua que contiene, del agua que derrama para que los hombres puedan beneficiarse, para tener la posibilidad de regar sus campos y sustentarse. Además, las montañas se asociaron con deidades como Tláloc, que incluso en la cosmovisión prehispánica habitan la montaña sagrada. Por lo anterior, en las culturas prehispánicas se le otorga simbolismo y veneración a las montañas, algunas de las más conocidas en México son, el Popocatepetl, el Pico de Orizaba, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca, el Xitlé, la Malinche, el Tláloc y el Ajusco.

A nivel internacional, se tiene registro de que las etnias prehispánicas andinas, como los incas, veían las montañas como la materialización de sus deidades, por tal motivo y desde siempre le rindieron tributo, brindándoles ofrendas y plegarias (Vitry, 2008).

Ceruti (2012) explica que en la mitología Cherokee las montañas eran concebidas como sagradas al ser habitadas por la gente sabia y espiritual; también, asociadas simbólicamente con el agua y reptiles, lo cual pone de manifiesto una vinculación con el sustrato de creencias mesoamericanas.

Los hallazgos arqueológicos demuestran que la veneración de las montañas es recurrente en varias culturas, por ejemplo: las montañas de las Rocallosas y Sierra Nevada de California (Estados Unidos); los montes Olimpo, Licaón, Parnaso, Helicón, Citerón (Grecia); Monte Meru (India); Haraberezaiti (Irán); Monte Nemrut (Turquía); El Kilimanjaro (África); entre otros.

Suelos volcánicos

Los Andosoles son suelos de origen volcánico; donde la alteración de los materiales parentales piroclásticos y vítreos, se debe a un proceso continuo y estable de meteorización, que favorece la síntesis de los aluminosilicatos amorfos y la formación de humus. La andolización depende de un clima húmedo, donde la precipitación excede a la evapotranspiración y la temperatura promedio no es mayor a 25°C.

La presencia de materiales no cristalinos y humus en los Andosoles genera propiedades hídricas, químicas y físicas particulares, que los hace altamente productivos. Pese a ello, los suelos ándicos pueden verse afectados por importantes procesos erosivos, en particular cuando se dan cambios en su uso o manejo (Mora *et al.*, 2003), ya que periodos de desecación prolongados provocan la pérdida de estructura y su consistencia pulverulenta en seco favorece la erosión de la zona.

Propiedades hídricas del suelo

Para evaluar cuantitativamente los recursos hídricos del suelo y determinar la disponibilidad de agua para los procesos biológicos y servicios ambientales del ecosistema, así, como el efecto de las perturbaciones naturales o antropogénicas es necesario medir o evaluar las propiedades del suelo que se relacionan con el agua.

Estas propiedades son: la tasa de infiltración superficial (R2), la subsuperficial (R1), la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), el potencial de flujo mátrico (Φ_m), la densidad aparente (D_a), el porcentaje de humedad (%H) y la hidrofobicidad; las cuales, tienen la función de transmitir, conducir y almacenar agua en el suelo.

a) *Infiltración*. Es la entrada de agua al perfil de suelo a velocidad constante por unidad de tiempo, se rige por la intensidad de lluvia y la capacidad máxima que el suelo tiene de infiltrar agua y se expresa en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. En Andosoles Hernández-Ordoñez (2015) ha encontrado que la infiltración es mayor en suelos forestales, menor en bosques fragmentados, y menor en tepetates. Por su parte, Neris *et al.* (2013) en Islas Canarias en bosque conservado y en bosque talado (suelo compactado) registró 796 y 67 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente.

b) *Conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs})*, es la capacidad que tiene el sistema poroso de conducir el flujo de agua a lo largo de una columna saturada de suelo, en tiempo y área. Reichardt y Timm (2004) mencionan que depende del tamaño, número, orientación, distribución, continuidad de los poros, tamaño de las partículas, tipo de fluido y cantidad relativa del fluido presente en la matriz del suelo.

Los desmontes disminuyen la Kfs, como lo demuestran los siguientes estudios: en Mineral del Monte, González-Montiel (2013) registró que la Kfs en suelos de plantaciones forestales, presentan una disminución de más del 50% respecto al bosque original. Gómez-Tagle (2008) para bosque de pino-encino y en una parcela abandonada del sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Morelia registró una Kfs de 1578 y 99 mm·h⁻¹, respectivamente. A nivel internacional, Oyarzún *et al.* (2011) en la Cordillera de la Costa sur de Chile en bosque nativo encontraron valores de 703.3 mm·h⁻¹, mientras, que en plantaciones de *E. globulus* registró 6.7 mm·h⁻¹. Hayashi *et al.* (2006) en Japón registró en suelo no perturbado y perturbado 5450 y 1490 mm·h⁻¹, respectivamente. Estos estudios indican que el cambio de uso de suelo afecta la conductividad hidráulica, y por ende, limita la recarga de acuíferos, formación de manantiales y cuerpos loticos, así, como los servicios ambientales del ecosistema.

c) *Potencial de flujo mátrico* (Φ_m), Reynolds y Elrick (1990) lo definen como la medida de la capacidad del suelo de atraer agua por fuerza capilar, atravesando una sección de área en una unidad de tiempo (cm²·s⁻¹). También, Reynolds *et al.* (2002), mencionan que es un indicador de la fuerza capilar de los poros en condiciones insaturadas de agua, durante un proceso de drenaje o infiltración; en donde las texturas gruesas, estructuradas o porosidades con agua, tienden a tener baja capilaridad en comparación a texturas finas, desestructuradas o porosidades secas.

El potencial de flujo mátrico presenta variabilidad por el tipo de agregados y porosidad del suelo. A nivel nacional, en Andosoles Mora-Santiago (2015) en el Parque Nacional Pico de Orizaba bajo bosques de *Abies religiosa*, *P. hartwegii* y *P. montezumae* registró valores de 0.067, 0.061 y 0.030 cm²·s⁻¹, respectivamente; por su parte, Castro-Alonso (2009) en una pradera de alta montaña del Parque Nacional Izta-Popo encontró valores de 0.217 cm²·seg⁻¹, mientras que Jiménez-Cruz (2011) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco reportó valores de 0.003 cm²·s⁻¹.

d) *Densidad aparente* (Da), se expresa como el peso del suelo seco que posee un determinado volumen de dicho suelo. Los estudios nacionales e internacionales muestran un intervalo de 0.44 a 1.55 gr·cm³ en suelos forestales; Mora-Santiago (2015) en el Parque Nacional Pico de Orizaba reportó valores de 0.77; 0.81 y 1.09 gr·cm⁻³; González-Montiel (2013) en Mineral del Monte registró 0.44 gr·cm³. A nivel internacional, Coello (2007) en siete zonas del Austro Ecuatoriano registró valores entre 1.32 y 1.44 gr·cm³, indicativo del elevado contenido de arcilla en los suelos, mientras que

Rodríguez-Vásquez *et al.*, (2008) en 40 puntos de suelos ándicos del Centro Agropecuario Marengo, Colombia, registraron valores de entre 0.86 y 1.55 gr·cm³. En general esta propiedad es susceptible a variaciones en la estructura, textura, humedad, materia orgánica del suelo; por lo tanto, altos valores de Da, reflejan una baja infiltración y escasa aireación.

e) *Hidrofobicidad*, es el grado de repelencia que el suelo presenta al agua; se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos en la capa superficial de suelo (DeBano *et al.* 1998). Estos compuestos pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000). Según Regalado *et al.* (2003), la hidrofobicidad de los suelos puede afectar a las propiedades hidrológicas de la zona no saturada, reduciendo la capacidad de infiltración y aumentando la escorrentía y las pérdidas de humedad debido a procesos de evaporación. Para su evaluación Dekker y Jungerius (1990) desarrollaron el método Water Drop Penetration Time (WDPT) que mide el tiempo (s) de penetración de una gota de agua en el suelo y lo clasifica en una escala, de no repelente (<5 s) a extremadamente repelente (>3600 s).

En Mineral del Monte, González-Montiel (2013) encontró en bosque conservado y en plantaciones, valores extremadamente repelente (>3600 s). Mientras, que Duque *et al.* (2004), en Andosoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Medellín, Colombia, bajo cobertura de *Q. humboldtii*, registraron una hidrofobicidad fuertemente repelente (223.7 s).

Micromorfología del suelo

Es la descripción, interpretación y principalmente la medición de los componentes, rasgos y fábricas de los suelos a un nivel microscópico (Bullock *et al.*, 2004). La técnica implica el análisis de secciones delgadas de suelo, para determinar la estructura, la macro, meso y micro porosidad del suelo. Además, se puede considerar que el tamaño, la forma y la organización del conjunto de poros y agregados son factores clave de la calidad del suelo (Meza y Geissert, 2003).

Estructura. Se relaciona con el tamaño, la forma y el arreglo de las partículas primarias y con los poros, tanto en agregados como en materiales no agregados y con el tamaño, forma y arreglo de cualquier agregado presente en el suelo (Bullock *et al.* 2004). La estructura del suelo es responsable de los flujos de aire y agua dentro de él, y de la

retención de humedad necesaria para los procesos vitales que se dan dentro del suelo (Zapata-Hernández, 2006).

Porosidad. Es una indicación del volumen total de espacios porosos discernibles con una lupa x10; se mide por área y se registra como el porcentaje de superficie ocupada por poros (FAO, 2009). Depende del material de origen, grado de desarrollo y acomodo de los agregados en el suelo. Los poros se describen de acuerdo al tipo, tamaño y abundancia, las cuales, condicionan el flujo hídrico, ya que el agua y el aire ocupan el espacio de poros del suelo, en el estado de saturación todos los poros están llenos de agua líquida. La importancia de conocer el tamaño de los poros radica en que las características de los procesos de transporte y absorción en el interior del poro están fuertemente influenciadas por su tamaño (Horacio, 2004). Según la IUPAC (1972), los poros se clasifican de acuerdo a su dimensión transversal (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal

Tipo de poro	Dimensión transversal (nm)
Microporo	Menor a 2
Mesoporo	Entre 2 a 5
Macroporo	Mayor a 5

Los estudios de Nissen *et al.* (2006), en tres suelos ándicos de Chile, muestran valores de porosidad total; Z1 (65 y 56.7 %); Z2 (73.9 y 63.6 %) y Z3 (72.5 y 66.9 %), lo que demuestra que el manejo agropecuario modifica esta propiedad, además, limita el flujo hídrico y afecta la estructura y aireación del suelo. En tanto, que Broquen *et al.* (2000), registro en Andosoles de la provincia del Neuquén, Argentina una porosidad total bajo vegetación natural, de aproximadamente 70%.

Propiedades químicas del suelo

Son un indicativo de la fertilidad del suelo. Las propiedades más importantes son:

a) *Materia orgánica (MO) y Carbono del suelo (COS)*. La MO está formada por restos orgánicos (plantas, animales y microorganismos) y por sustancias húmicas; esta fase sólida del suelo juega un papel significativo en la formación y estabilización de los agregados, en el control de la acidez, en el reciclaje de elementos nutritivos y en la fertilidad de este. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico. Su efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo (Martínez *et al*, 2008).

b) *Potencial de hidrógeno (pH)*. El tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos, la concentración de sales, la relación suelo solución, la presión parcial del bióxido de carbono, entre otros factores determinan la actividad del ion hidronio (H^+), y por lo tanto, la acidez o alcalinidad de un suelo. Esta propiedad, puede influir directamente en la absorción nutritiva y crecimiento vegetal.

c) *Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Porcentaje de saturación de bases (PSB)*. La materia orgánica y las clases y cantidades de arcillas presentes en el suelo determinan los niveles de la CIC. Además, el grado de intemperismo de los suelos puede afectarla y a su vez, limitar la reserva nutrimental.

d) *Cationes intercambiables*. Son absorbidos por los constituyentes arcillosos y orgánicos del suelo presentes en la solución del suelo:

Calcio (Ca^{2+}). Es el mineral más abundante en la mayoría de los suelos, y forma junto con el Mg el complejo más importante del intercambio catiónico. La deficiencia de este afecta la estructura del suelo y limita la presencia de Mg, K y Na.

Magnesio (Mg^{2+}). El Mg intercambiable se encuentra en la solución del suelo, disponible para las plantas, sin embargo, entre otros factores un pH bajo limita su adsorción. La alta proporción de Mg en los sitios de intercambio resulta en la dispersión de las arcillas, condición que reduce la porosidad y la tasa de infiltración en el suelo (Mikkelsen, 2010).

Potasio (K^+). Este es un ion poco abundante en la solución del suelo. Las cantidades encontradas van de 1 a 3% del cual entre el 90-98% forma parte de minerales primarios, de 1 a 10% se encuentra fijado entre las láminas de arcilla 2:1 (Roldán *et al*, 2004).

Sodio (Na⁺). Es un dispersante natural del suelo, en equilibrio favorece los procesos del mismo, mientras que en altas concentraciones, se relaciona con un alto pH y procesos de desertificación.

Fósforo disponible (P). Se considera un elemento nutricional primario para la vegetación, sin embargo, los suelos tropicales como los Andosoles por su naturaleza química presentan problemas para fijar este elemento. Entre los principales factores que afectan la disponibilidad de P se encuentran: pH, intemperización, humedad, propiedades mineralógicas del suelo, temperatura (Barroso, 1999).

Nitrógeno total (N). El nitrógeno del suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica. La determinación de este elemento es necesaria para estudiar la evolución del suelo.

Mineralogía de Andosoles

Consiste en el análisis de la fracción fina y gruesa del suelo. La fracción coloidal de los Andosoles contiene cantidades significativas de minerales no cristalinos como alofana, imogolita, ferrihidrita y/o complejos de Al-humus. Dahlgren, *et al.* (2004) sugieren además que los andosoles se dividen con frecuencia en dos grupos con base en su composición mineralógica: andosoles alofánicos dominados por alofana e imogolita y andosoles no alofánicos dominados por complejos aluminio-humus y filosilicatos 2:1.

Aluminosilicatos. Las altas concentraciones de Si(OH)₄ y Al(OH)₃ facilitan la formación de formas metaestables de aluminosilicatos no cristalinos que se acumulan en el suelo dando origen a alofano e imogolita. Una vez que la capacidad quelatante de la materia orgánica es saturada, el Al liberado por meteorización está disponible para formar aluminosilicatos.

Filosilicatos. Del tipo 2:1 están formadas por dos láminas tetraédricas de silicio (Si⁺⁴) y en medio de estas una capa octaédrica de aluminio (Al⁻³) o magnesio (Mg⁻²), además, en su mayoría son de origen secundario. Desde el interés forestal las más representativas son las arcillas illita, montmorilonita y vermiculita, con capacidades de expansión y contracción.

La determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo, son importantes para determinar el papel de la vegetación sobre el transporte de agua, la formación de manantiales, así, como para explicar la pérdida de los nutrientes y la capacidad productiva del suelo.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la ecohidrología de la montaña sagrada de la cultura teotihuacana

Objetivos particulares:

- ✓ Evaluar las propiedades hídricas (infiltración R1 y R2, Kfs, Φ_m , Da, %H e hidrofobicidad), químicas, físicas (DA, micromorfología) de los suelos del bosque conservado, del fragmentado y de los tepetates en el Parque Estatal Cerro Gordo.
- ✓ Determinar la capacidad de estos suelos para dar origen a manantiales, por medio de un perfil de infiltración.
- ✓ Evaluar los efectos de la fragmentación del Cerro Gordo sobre las propiedades hídricas.

4. MÉTODO

Zona de estudio

El Parque Estatal Cerro Gordo se localiza al noroeste del Estado de México, en las coordenadas geográficas 19° 43' 51.03" y 19° 46' 38.32" Latitud Norte y 98° 46' 29.84" y 98° 51' 57.90" Longitud Oeste, a una máxima de 3 050 msnm. Al Norte colinda con el poblado de San Cristóbal Colhuacán, al Sur con Santa María Palapa, al Este con Santiago Tolmán y al Oeste con Tezompa (Figura 1). La totalidad del área pertenece a tres municipios del estado de México: Axapusco (55.53%), San Martín de las Pirámides (42.65%) y Temascalapa (0.31%) y la superficie total es de 3 027 hectáreas y conforme al polígono resultante de la verificación de sus límites, es de 2 915 hectáreas (Plan de Manejo del Parque Estatal Cerro Gordo, 2000).



Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Estatal Cerro Gordo (Google Earth).

a) *Geología.* Se ubica dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano, surgió a lo largo del Cuaternario. Según el PMPECG (2000) su litología superficial está constituida por basalto (46%), toba básica (30%), brecha volcánica (13%) y aluvión (11%).

b) *Hidrología.* El Cerro Gordo se localiza en el Valle de México en la región hidrológica 26 -Panúco” y en la cuenca del Río Moctezuma. Según el PMPECG (2000) el 67.7% de la superficie del parque drena a la vertiente Sur de la subcuenca del Lago Texcoco-Zumpango y el 32.3% a la vertiente Norte de la subcuenca del Río Tezontepec, además, se considera al cerro como una importante zona de recarga.

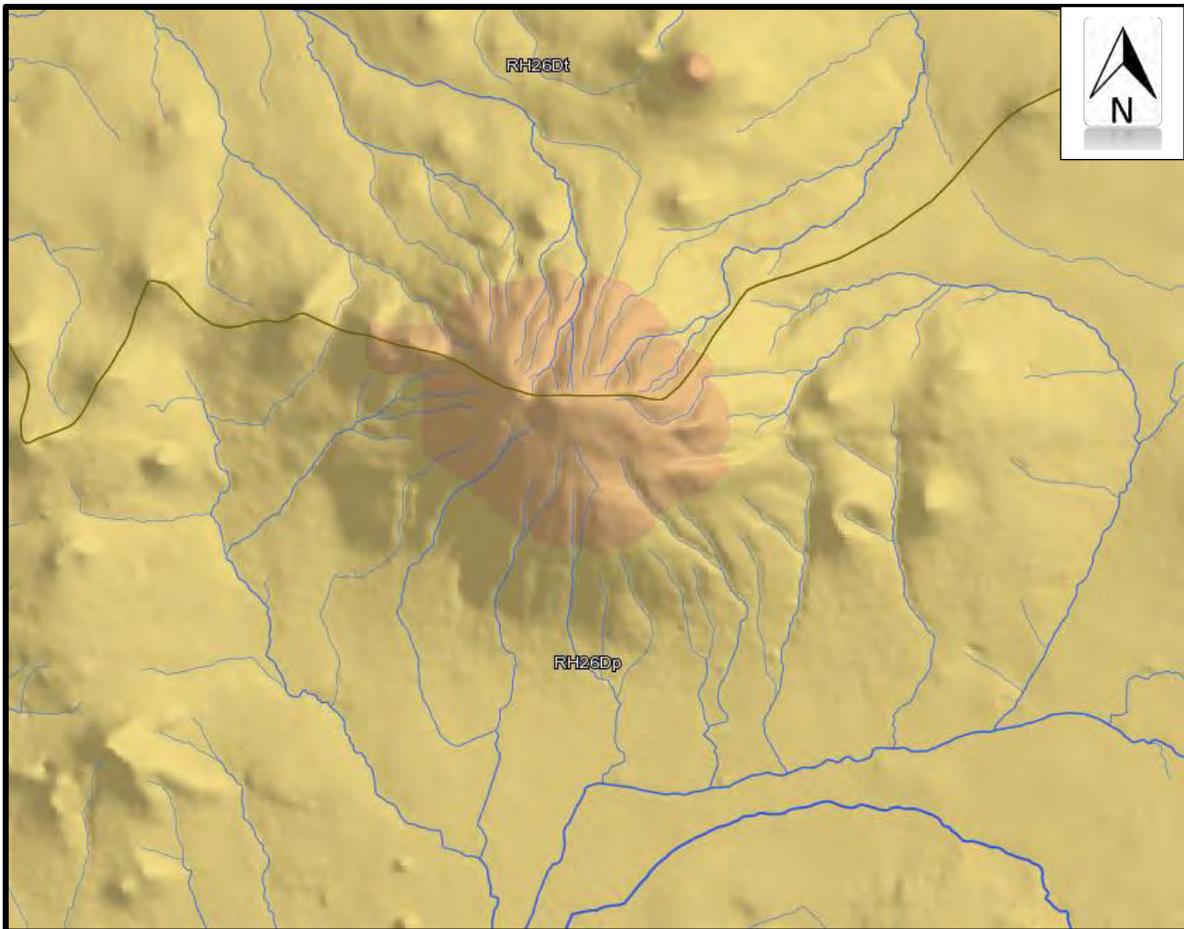


Figura 2. Flujos superficiales del Cerro Gordo según el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) de CONAGUA, 2017

c) *Edafología.* La porción Sur del cerro presenta erosión severa, por el cambio de uso de suelo a terrenos agrícolas y ganaderos, además, pronunciadas barrancas que favorecen el arrastre del suelo con las intensas lluvias; al Norte se ubica un terreno menos pronunciado y conservado, en donde Fernández-Galán (2013) reporta por primera vez la presencia de Andosoles.

En general, en las faldas del cerro se observa el afloramiento de tepetate, los cuales están constituidos por una mezcla de material volcánico fresco, fragmentos de horizontes de suelo redepositado y rasgos relacionados con la pedogénesis (Escamilla *et al.*, 2002). El agente cementante determina la clasificación de los tepetates, y puede ser: sílice, carbonato de calcio, yeso, sales, hierro o arcillas.

d) *Clima*. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (2004), el clima es C(w₁), templado subhúmedo con lluvias en verano; la temperatura media anual es de 12° a 18 °C y presentan por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia del mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco (precipitación menor de 40 mm).

e) *Vegetación*. Según el PMPECG (2000) se pueden encontrar 4 de los 10 tipos de vegetación reconocidos por Rzedowski (1978) para la cuenca de México: Matorral xerófilo (48.57%), Chaparral o matorral de encino (7.97%), Pastizal (10.14%) y Bosque de encino (2.97%).

Selección de sitios de estudio

Con imágenes satelitales (Figura 3) de Google Earth se ubicaron dentro del parque tres sitios de estudio: i) Bosque conservado (BC) se ubica en promedio a los 3 000 msnm; ii) Bosque fragmentado (BF) se ubica en promedio a los 2 800 msnm y iii) Tepetates (Tp) faldas del cerro.

Los sitios se ubican en la porción Norte del cerro; según el PMPECG (2000) esta presenta más humedad como consecuencia de los vientos dominantes del Norte que proporcionan 50 mm más de precipitación, menos días con granizadas, más días nublados y con niebla.

En las siguientes imágenes satelitales se observa las diferencias en las condiciones de humedad de la zona en cada mes y año de muestreo (Figura 3).

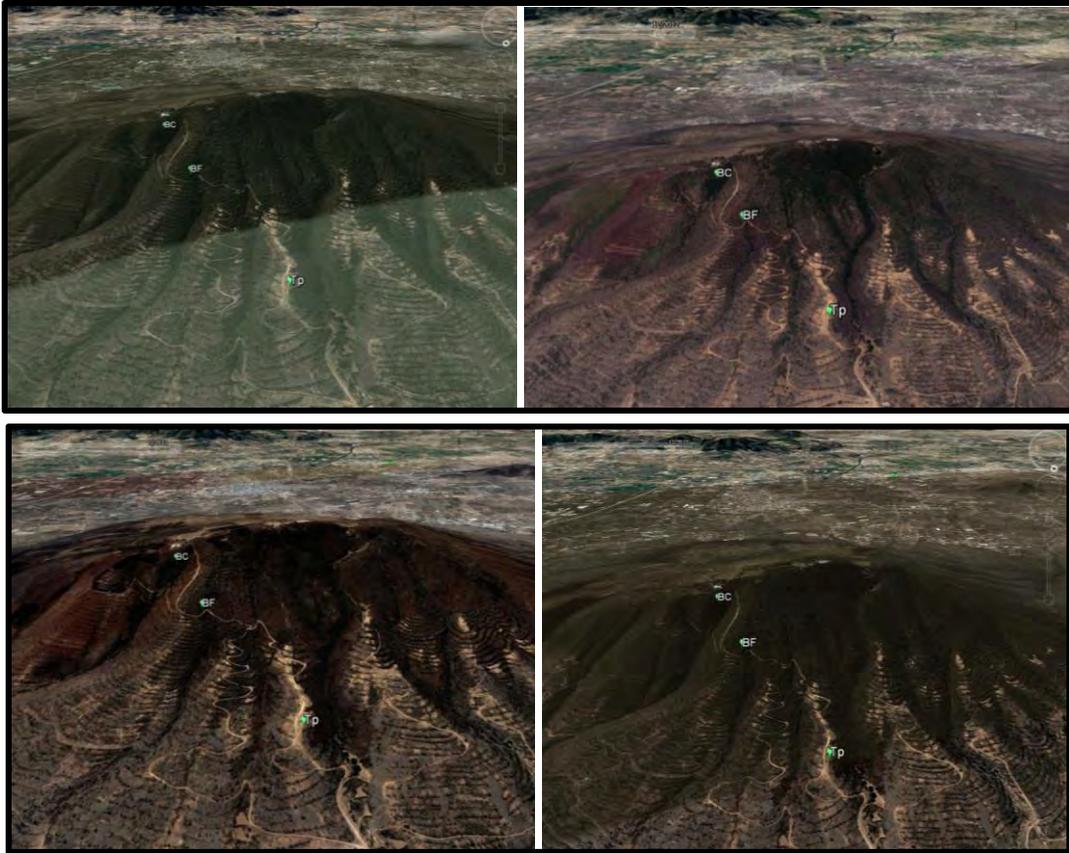


Figura 3. Sitios de estudios en el Cerro Gordo, Estado de México (Google Earth). Muestreos marzo y abril 2012 (*arriba*); febrero y abril 2013 (*abajo*).

Evaluación de las propiedades hídricas

En cada sitio de estudio se evaluaron la tasa de infiltración (R_1 y R_2), la K_{fs} y el Φ_m , con el Permeámetro de Guelph 2800K1 (Figura 4) cuyo fundamento teórico se basa en el principio de Mariotte. Según Reynolds *et al.*, 2002 (citado en Gabriels *et al.* 2006) este método se sustenta en los análisis efectuados por Richards, que encontró una solución efectiva al cálculo de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), considerando el flujo tridimensional del agua en el suelo, en un hoyo en donde se mantiene una carga hidráulica constante.

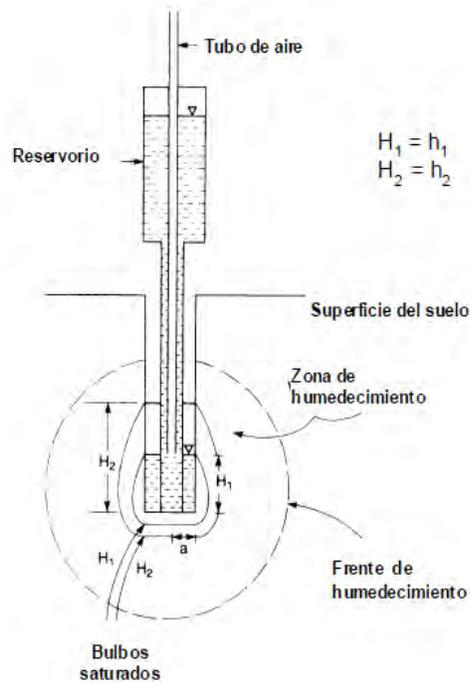


Figura 4. Permeámetro Guelph (Elrick y Reynolds 1992 en gabriels *et al.*, 2006).

Tasa de infiltración. Se calcula al promediar los últimos tres intervalos entre el tiempo en que se realizaron (cm / s).

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs}):

$$K_{fs} = [(0.0041) (X) (R_2')] - [(0.0054) (X) (R_1')]$$

Potencial de flujo mátrico (Φ_m):

$$\Phi_m = [(0.0572) (X) (R_1')] - [(0.0237) (X) (R_2')]$$

Dónde:

R1 = lectura constante a un nivel de 5 cm

R2 = lectura constante a un nivel de 10 cm

X= 35.22= cte. del reservorio (proporcionado por el permeámetro).

Se realizaron en total cuatro muestreos, durante marzo y abril 2012 y en febrero y abril 2013; en cada sitio de estudio se hicieron 3 evaluaciones a 2 profundidades (0 a 10 y 10 a 15 cm de profundidad), lo que da 6 registros por sitio, por muestreo, para un total de 24 registros. Además, se realizó un perfil de infiltración de 30 cm de profundidad, en el

cual se registró la infiltración de 0 a 10, 10 a 20 y de 20 a 30 cm. Y para los tepetates, se realizó un muestreo, con 6 registros en marzo 2013.

Densidad aparente (Da). En cada sitio se colectaron 5 muestras a diferentes profundidades a lo largo del perfil de suelo; el método del cilindro consiste en enterrar horizontalmente un cilindro de cobre hasta que se sature de suelo, se retira y se cubre con cinta para evitar pérdidas.

En el laboratorio se hizo un pesaje inicial y se dejó secando en la estufa a 70 °C, diariamente se registró el peso de los tubos hasta que fue constante. Esta propiedad es un indicador de la compactación del suelo y se calculó con la fórmula ($Da=m/V$), se expresa en $g\ cm^{-3}$.

Para tepetates se utilizó el método de la parafina. Se colectaron tres terrones de suelo, se dejó secar y en laboratorio cada uno se pesó, posteriormente se cubrió con parafina líquida y se introdujo a un vaso de precipitados con agua sobre una báscula analítica, para medir (gr) peso final y volumen.

Porcentaje de humedad (%H). A partir del método anterior, se obtuvo mediante la fórmula (peso inicial del suelo - peso seco del suelo * 100)

Hidrofobicidad. La repelencia al agua se determinó en campo con 4 repeticiones en cada sitio; con el método WDPT, el cual consiste en remover la hojarasca del suelo, aplicar una gota de agua sobre suelo y registrar el tiempo (segundos) que esta tarda en penetrar. El grado de hidrofobicidad se clasificó según lo propuesto por Dekker y Jungerius (1990).

Evaluación de las propiedades químicas

Se realizó un perfil de suelo en el BC y otro en el BF; se colectaron 3 muestras en cada perfil (1 kg) a 0-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad y para tepetates se recolectó una muestra en terrones (1 kg aproximadamente). Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y fueron tamizadas en la malla de 2 mm.

El trabajo se realizó de acuerdo con el Manual de Procedimientos propuesto por Van Reeuwijk (1999). Los análisis efectuados fueron:

pH. Con el potenciómetro, en una mezcla suelo:líquido (agua destilada) en proporción 1:2 se midió la actividad del ion H^+

Materia orgánica. Con el método de Walkley-Black.

CIC. Con acetato de amonio 1N, pH 7, como solución saturante, y para la cuantificación, el producto de la destilación se recoge en un matraz que contenga 10 ml de mezcla de indicador y ácido bórico; se titula con HCl 0.01N.

Cationes intercambiables. Se midió en el percolado de acetato obtenido para CIC. El Ca_{2+} y el Mg_{2+} solubles se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica a una longitud de onda de 422.7 y 285.2 nm; mientras que el Na_{+} y el K_{+} mediante espectrofotometría de emisión de flama, en extractos diluidos.

Fósforo extraíble. Con el método de Bray y Kurtz no.1.

Nitrógeno total. Con el método de extracción de micro-Kjeldahl.

Análisis micromorfológico

Se tomaron seis muestras de suelo en cajas tipo Kubiena, a diferentes profundidades del perfil (0 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm), estas muestras se dejaron secar a temperatura ambiente por dos semanas y posteriormente se procesaron en el taller de micromorfología del Colegio de Postgraduados, campus Montesillo, para obtener las secciones delgadas, con la muestra fijada con resinas en un portaobjetos.

La descripción de las secciones delgadas se realizó con el método propuesto por Bullock *et al.*, (2004) y Stoops (2003). En específico se determinó la porosidad y la estructura de los suelos.

Para la cuantificación de la porosidad se procesaron las microfotografías de las secciones delgadas y se obtuvo el porcentaje de porosidad total con el programa Image Pro. *Versión 5.*

Análisis estadístico

Para detectar diferencias significativas entre las propiedades hídricas del suelo entre los sitios de BC y BF se realizó un análisis de varianza (ANOVA), además, de una prueba t^2 de student, con un nivel de significancia ($p < 0.05$), en el programa Excel2010.

5. RESULTADOS

Diagnóstico de las propiedades hídricas

Las propiedades hídricas (infiltración R1 y R2, K_{fs} y Φ_m) del bosque conservado, bosque fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Variación de las propiedades hídricas del bosque conservado, fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.

sitio	año	mes	R2	R1	K _{fs}	Φ_m
			-----	mm h ⁻¹	-----	cm ² s
BC	2012	Marzo	11400 ^a (±4157)	1040 ^a (±661)	1448 ^a (±475)	0,203 ^a (±0,08)
		Abril	21520 ^a (±13342)	1833 ^a (±1710)	2759 ^a (±1622)	0,382 ^a (±0,24)
	2013	Febrero	2662 ^a (±2736)	742 ^a (±995)	243 ^a (±216)	0,053 ^a (±0,06)
		Abril	5940 ^a (±764)	756 ^a (±51)	714 ^a (±121)	0,112 ^a (±0,01)
BF	2012	Marzo	31337 ^a (±9404)	3048 ^a (±3841)	3735 ^a (±552)	0,535 ^a (±0,17)
		Abril	5143 ^b (±2182)	744 ^a (±826)	616 ^b (±137)	0,089 ^b (±0,04)
	2013	Febrero	38520 ^a (±21892)	5160 ^a (±339)	5095 ^a (±3823)	0,684 ^a (±0,36)
		Abril	33152 ^a (±11512)	5700 ^a (±3407)	4217 ^a (±1514)	0,637 ^a (±0,26)
T	2013	Marzo	1075 (±581)	1453 (±1060)	-127.2	0,0004 (±0,002)

Letras diferentes por año indican diferencias significativas a un nivel de $P \leq 0.05$ ($\pm D.E$): desviación estándar.

BC= Bosque conservado; BF= Bosque fragmentado; Tp= Tepetates

R2= tasa de infiltración de 0-10 cm de profundidad; R1= tasa de infiltración de 10-15 cm de profundidad;

K_{fs}=conductividad hidráulica saturada en campo; Φ_m = potencial de flujo mátrico.

En el bosque conservado los valores de las propiedades hídricas se incrementaron de los meses de febrero y marzo al mes de abril en 2012 y 2013. Mientras que en el bosque fragmentado se registró lo contrario en 2012 y 2013, a excepción de R1 en 2013 que aumenta. Y al comparar los valores anuales de las propiedades hídricas, se observa que durante el mes de abril, en el BC disminuyen y en el BF aumentan.

En el Cuadro 3 se muestran las propiedades físicas del suelo como la densidad aparente, la cual no muestra variación en el BC y el BF en 2012 y 2013. El porcentaje de humedad, en todos los casos mostró valores mayores en el BC en comparación a los valores del BF. La hidrofobicidad superficial, mostro tener valores menores en el BC y mayores en el BF, sin embargo ambos estan clasificados como suelos fuertemente repelente al agua.

Cuadro 3. Densidad aparente, porcentaje de humedad e hidrofobicidad superficial del bosque conservado, del fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.

sitio	año	mes	D _{ap}	Humedad	Hidrofobicidad superficial
			gr cm ³	%	s
BC	2012	Marzo	0.9 (±0.056)	28	174
		Abril	1 (±0.151)	21	174
	2013	Febrero	0.9 (±0.545)	17	174
		Abril	N.D	N.D	174
BF	2012	Marzo	1 (±0.082)	24	346
		Abril	1 (±0.155)	19	346
	2013	Febrero	1 (±0.068)	16	346
		Abril	N.D	N.D	346
T	2013	Marzo	1.37 (±0.072)	9	0

BC= Bosque conservado; BF= Bosque fragmentado; Tp= Tepetates; D_{ap} = Densidad aparente, (±D.E): desviación estándar; %= porcentaje; s= segundos; N.D= No determinado

Perfil de infiltración

Bosque conservado. En el Cuadro 4 y Figura 5 se muestra el comportamiento del perfil de infiltración con respecto a la profundidad del suelo; el cual, varía anual y mensualmente.

La tasa de infiltración, en la capa superficial (10 cm), anualmente disminuye casi un 50%, mientras que la capa de 10 a 20 cm de profundidad presenta elevación y una gran disminución en abril de 2013. En contraste de 20 a 30 cm la tasa de infiltración permanece casi constante a lo largo del tiempo. Mensualmente de Febrero a abril de 2013, en los primeros 20 cm tiende a disminuir, sin embargo de 20 a 30 cm tiende a permanecer casi constante. En general se observa que a la profundidad de 10 y mayor aun a los 20 cm ocurren fuertes disminuciones en la infiltración.

Cuadro 4. Valores de la tasa de infiltración en diferentes perfiles de suelo del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo.

Profundidad (cm)	Tasa de infiltración		
	abril 2012 (mm·hr ⁻¹)	feb 2013 (mm·hr ⁻¹)	abril 2013 (mm·hr ⁻¹)
0 a 10	21520	10280	6300
10 a 20	7200	10280	540
20 a 30	3600	3760	3760

Bosque fragmentado. En el Cuadro 5 y Figura 6 se describe el comportamiento del perfil de infiltración con respecto a la profundidad del suelo.

La tasa de infiltración en los primeros 20 cm, aumenta hasta ocho veces de 2012 a 2013, y en febrero se registraron los valores más altos. Mensualmente en los primeros 20 cm la tasa de infiltración disminuye hasta siete veces, y en febrero y abril 2013 de 20 a 30 cm aumenta. En general y a lo largo del perfil se observa que existe una capa a los 10-20 cm que registra la menor tasa de infiltración, actuando como una capa semipermeable.

Cuadro 5. Valores de la tasa de infiltración en diferentes perfiles de suelo del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.

Profundidad (cm)	Tasa de infiltración		
	abril 2012 (mm·hr ⁻¹)	feb 2013 (mm·hr ⁻¹)	abril 2013 (mm·hr ⁻¹)
0 a 10	4800	36000	33600
10 a 20	660	5820	5400
20 a 30	_____	12800	12860

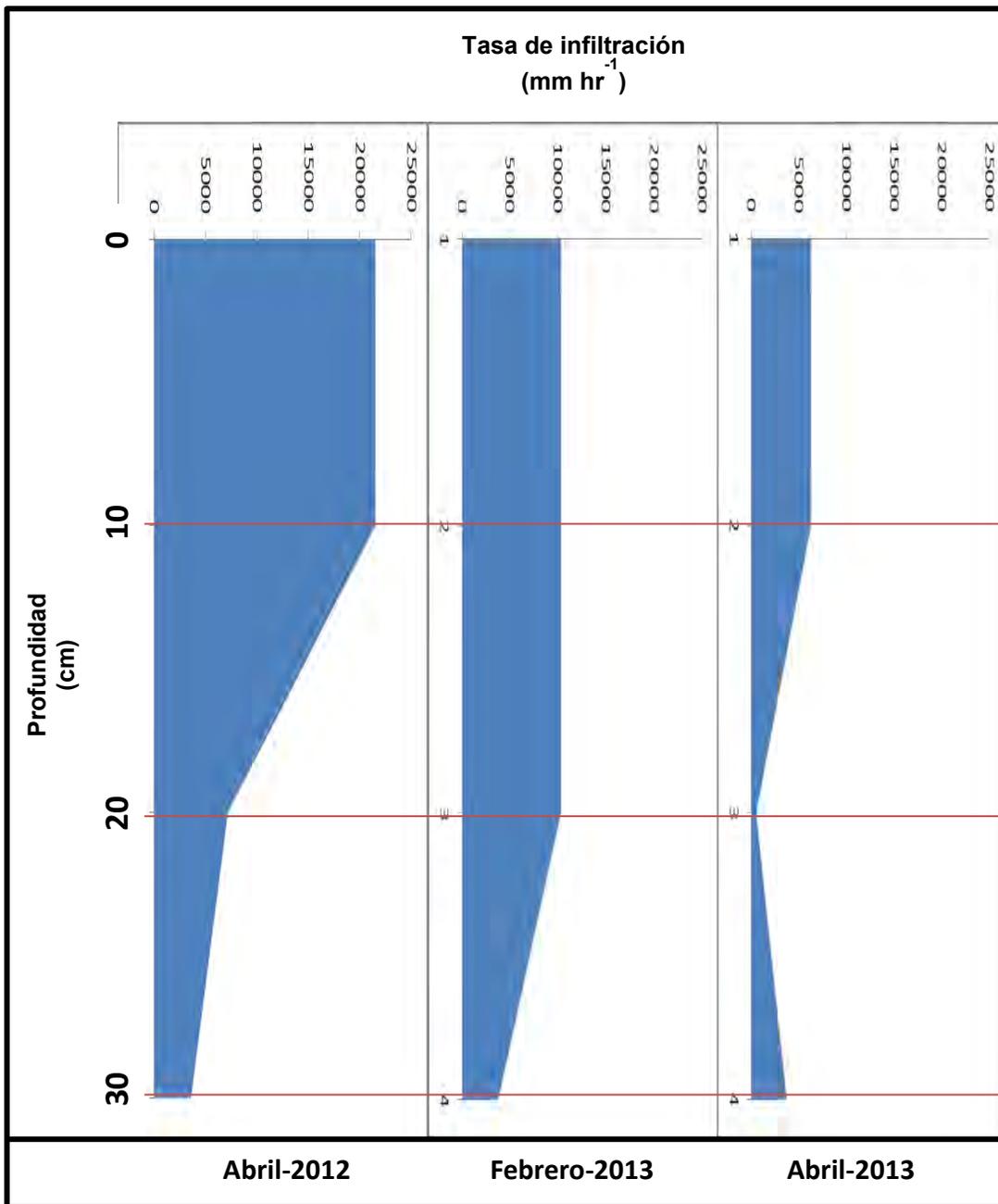


Figura 5. Variaciones de los perfiles de infiltración del suelo del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo.

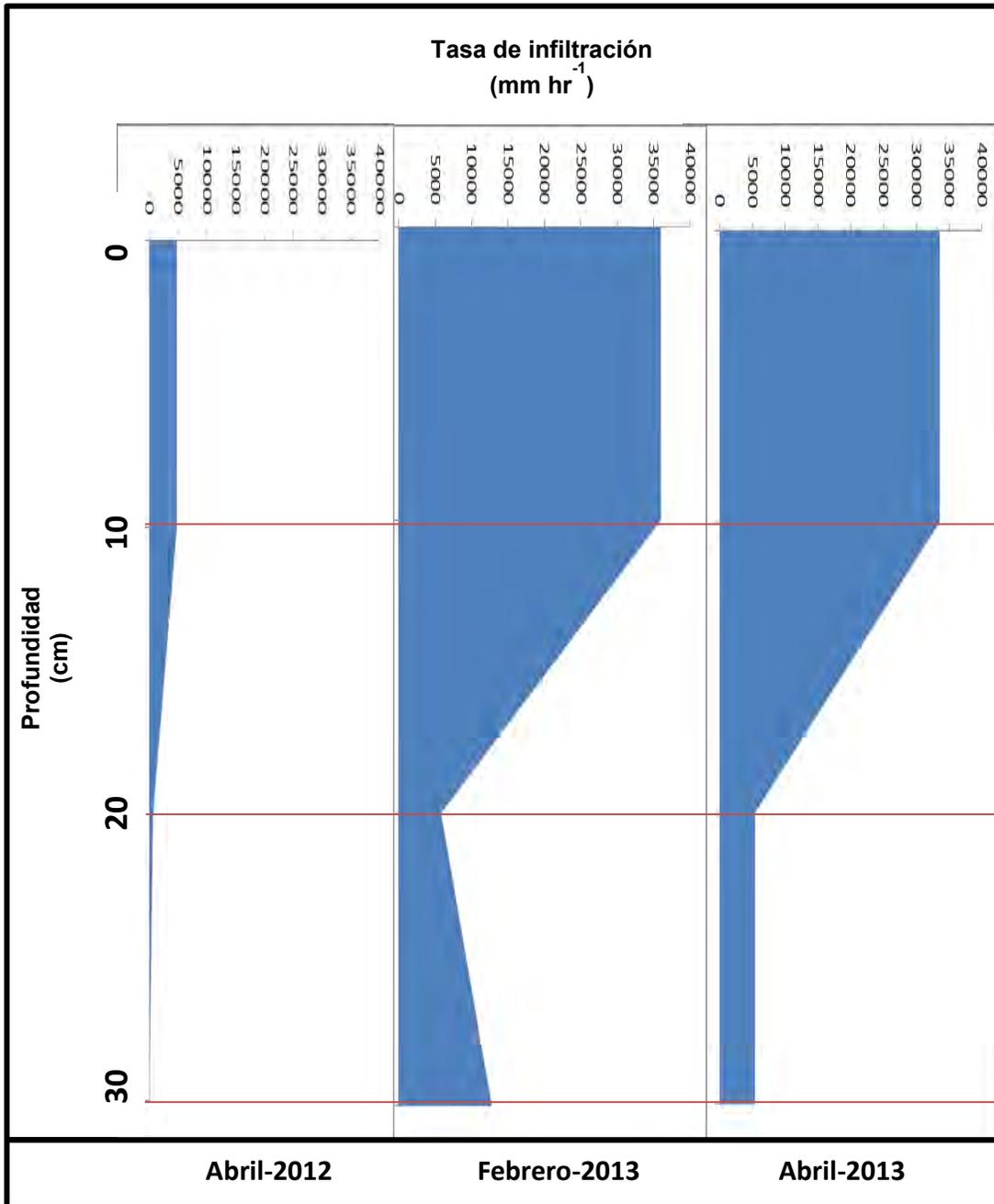


Figura 6. Variaciones de los perfiles de infiltración del suelo del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo.

Diagnóstico de la micromorfología y porosidad del suelo

Los datos de la micromorfología del suelo del BC y BF del Parque Estatal Cerro Gordo se reportan en el Cuadro 6.

Bosque conservado. Estos suelos presentan textura franco arcillo limoso a excepción de la capa media que es de textura arcillo limoso. Los poros horizontales se pueden observar en las secciones delgadas (Figura 7 A, C, E), y más abundantes en la muestra de 10 a 15 cm de profundidad.

La estructura muestra cuatro tipos: migajosa, bloques subangulares y bloques angulares en las tres muestras del perfil, y de tipo granular, a excepción de los 10 a 15 cm de profundidad. En las microfotografías (Figura 8 a, c, e) se puede observar tres tipos de poros, de mayor abundancia los poros de empaquetamiento compuesto, después de tipo cavidad y en menor porcentaje de tipo canal. La porosidad total es de 46 a 51% de 20 a 0 cm, es decir, que la mayor porosidad se registró en la parte superficial.

Bosque fragmentado. Estos suelos presentan textura franco limoso, arcillo limoso y franco arcillo limoso. Los poros horizontales se pueden observar en las secciones delgadas (Figura 7 B, D, F), y más abundantes en la muestra superficial.

La estructura es de tres tipos: bloques subangulares, migajosa y de bloques angulares en diferente proporción en cada una de las muestra del perfil. En las microfotografías (Figura 8 b, d, f) se pueden observar los tipos de poros que presentan estos suelos, principalmente poros de empaquetamiento compuesto, después de tipo canal y en menor porcentaje de tipo cavidad. La porosidad total es de 44 a 53% de 0 a 20 cm, es decir, la mayor porosidad se registró en la parte baja.

Cuadro 6. Micromorfología de los suelos del bosque conservado y bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo

SITIO	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	ESTRUCTURA	TIPO DE PORO	POROSIDAD TOTAL (%)
Bosque Conservado	0 a 10	Franco Arcillo Limoso	Migajosa 40%, granular 30%, bloques subangulares 25% y angulares 5%	Poros de empaquetamiento compuesto 65%, canal 25% y cavidad 10%	51
	10 a 15	Arcillo Limoso	Migajosa 70%, bloques subangulares 25% y angulares 5%	Poros de empaquetamiento compuesto 30%, cavidad 50% y canal 20%	49
	15 a 20	Franco Arcillo Limoso	Granular 30%, migajosa 20%, bloques subangulares 30% y angulares 10%	Poros de empaquetamiento compuesto 70%, cavidad 20% y canal 10%	46
Bosque Fragmentado	0 a 10	Franco Limoso	Bloques subangulares 70%, migajosa 20% y angulares 10%	Cavidad 40%, poros de empaquetamiento compuesto 30%, canal 25% y fisura 5%	44
	10 a 15	Arcillo Limoso	Migajosa 55%, bloques subangulares 40% y angulares 5%	Poros de empaquetamiento compuesto 45%, canal 25%, cavidad 25% y fisura 5%	47
	15 a 20	Franco Arcillo Limoso	Migajosa 45%, bloques subangulares 40% y angulares 15%	Poros de empaquetamiento compuesto 40%, canal 40%, cavidad 15% y fisura 5%	53

Profundidad de la
toma de muestra

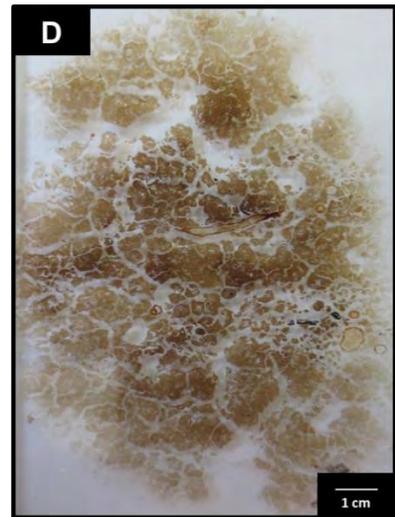
Bosque Conservado

Bosque Fragmentado

0 a 10 cm



10 a 15 cm



15 a 20 cm

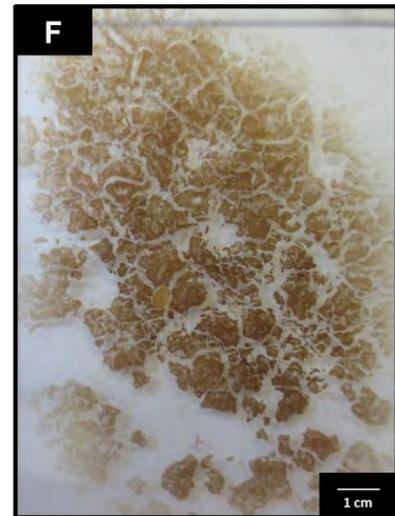


Figura 7. Secciones delgadas del suelo del Bosque Conservado (A, C, E) y Fragmentado (B, D, F) de la Montaña sagrada en el Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México

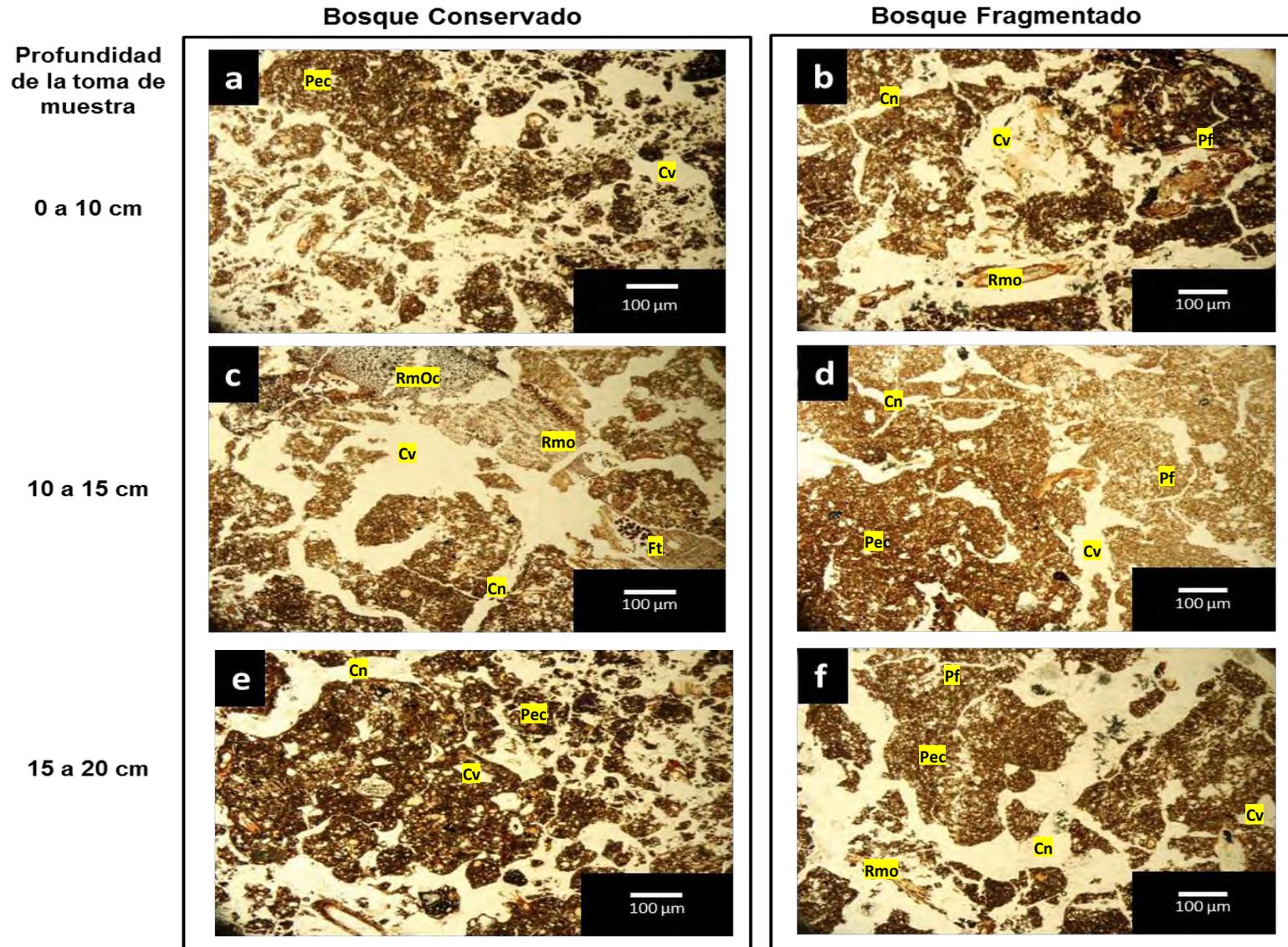


Figura 8. Microfotografías de la estructura y porosidad del suelo del bosque conservado (a, c, e) y del bosque fragmentado (b, d, f) del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México. Se observan poros Pec= de empaquetamiento compuesto; Cn= canal; Cv= cavidad; Pf= fisura; Rmo= restos de materia orgánica; RmOc= restos de materia orgánica carbonizada y Ft= fitolitos.

Diagnóstico de las propiedades químicas.

Se reportan los valores de las propiedades químicas en el Cuadro 7 y en la Figura 10 se muestran los valores según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

pH. En los suelos del BC es moderadamente ácido; el BF tiende a neutro, y en Tp es medianamente alcalino.

Materia orgánica. En la capa superficial del BC el contenido es medio y en el BF es alto, además, en ambos sitios reduce con la profundidad, pero en Tp se clasifica como muy bajo.

Nitrogeno total. El contenido registrado en suelos del BC y BF disminuye con la profundidad, sin embargo, solo la muestra superficial de ambos sitios se clasifica como de contenido medio y los demás incluyendo Tp como de bajo contenido.

Fosforo disponible. El contenido en los suelos del BF es de más del doble que lo registrado en el BC y en ambos disminuye con la profundidad, sin embargo, los tres sitios se clasifican con bajo contenido.

CIC. Los suelos de todos los sitios están ubicados dentro de la categoría media, con excepción de la capa de suelo de 15 a 20 cm de profundidad del BC, la cual se clasifica como baja.

Bases intercambiables. Los suelos de los bosques en general presentan un bajo contenido (menos de 50%), a excepción del BF a nivel superficial que presenta más del 60% y en Tp del 100%, dominadas por Ca^{++} en bosques y Mg^{++} en Tp.

Calcio. Los suelos de los bosques registraron bajo contenido, a excepción de la capa superficial del BF y de Tp.

Magnesio. Los suelos del BC registraron contenido medio, a excepción de la capa de 10 a 15 cm de profundidad, la cual es alta. El BF registró alto contenido a excepción de la capa de 15 a 20 cm de profundidad. Y los Tp muestran alto contenido.

Sodio. No son suelos salinos, sin embargo, los suelos del BF registraron valores más altos y que disminuyen con la profundidad en comparación con el BC, en el cual el contenido es constante. En Tp se registran los valores más altos de los tres sitios.

Potasio. Los suelos de los tres sitios registraron alto contenido, pero en la capa superficial el BF registró los valores más altos.

En general los suelos de la montaña sagrada se clasifican como ligeramente ácidos y de valores medios y bajos en su fertilidad.

Cuadro 7. Propiedades químicas de los bosques conservado, fragmentado y tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.

sitio	profundidad	pH	CO	MO	N _{TOTAL}	P _{DISP}	CATIONES INTERCAMBIABLES					
							Ca	Mg	K	Na	CIC	PSB
	cm	H ₂ O 2:1	-----	%	-----	mg·Kg ⁻¹	-----	cmol·kg ⁻¹	-----		%	
BC	0 a 10	6	8.4	14.5	0.31	1.3	3.5	2.2	0.86	0.15	19.6	34.4
	10 a 15	5.9	4.9	8.4	0.22	0.72	3.3	3.4	0.82	0.13	18.4	41.6
	15 a 20	5.2	1.9	3.2	0.07	0.30	1.9	1.9	0.67	0.15	14.2	33.1
BF	0 a 10	6.5	10.3	17.7	0.39	3.4	6.3	5	1.33	0.22	21.1	60.9
	10 a 15	6.6	8	13.8	0.20	2.2	3.7	3	1.08	0.18	20.8	38.3
	15 a 20	6.5	3.5	6	0.19	1.3	3.1	2.8	1.02	0.15	18.4	38.1
T	0 a 10	7.6	0.4	0.8	0.01	0.30	5.1	8.1	1.08	1.03	15.1	100

BC= Bosque de encinares conservado; BF= Bosque de encinares fragmentado; T= Tepetates.

CO= Carbono orgánico; MO= Materia Orgánica; Ntotal= Nitrógeno total; Pdisp= Fosforo disponible; Ca= Calcio; Mg= Magnesio; K= Potasio; Na= Sodio; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; PSB= Porcentaje de saturación de bases.

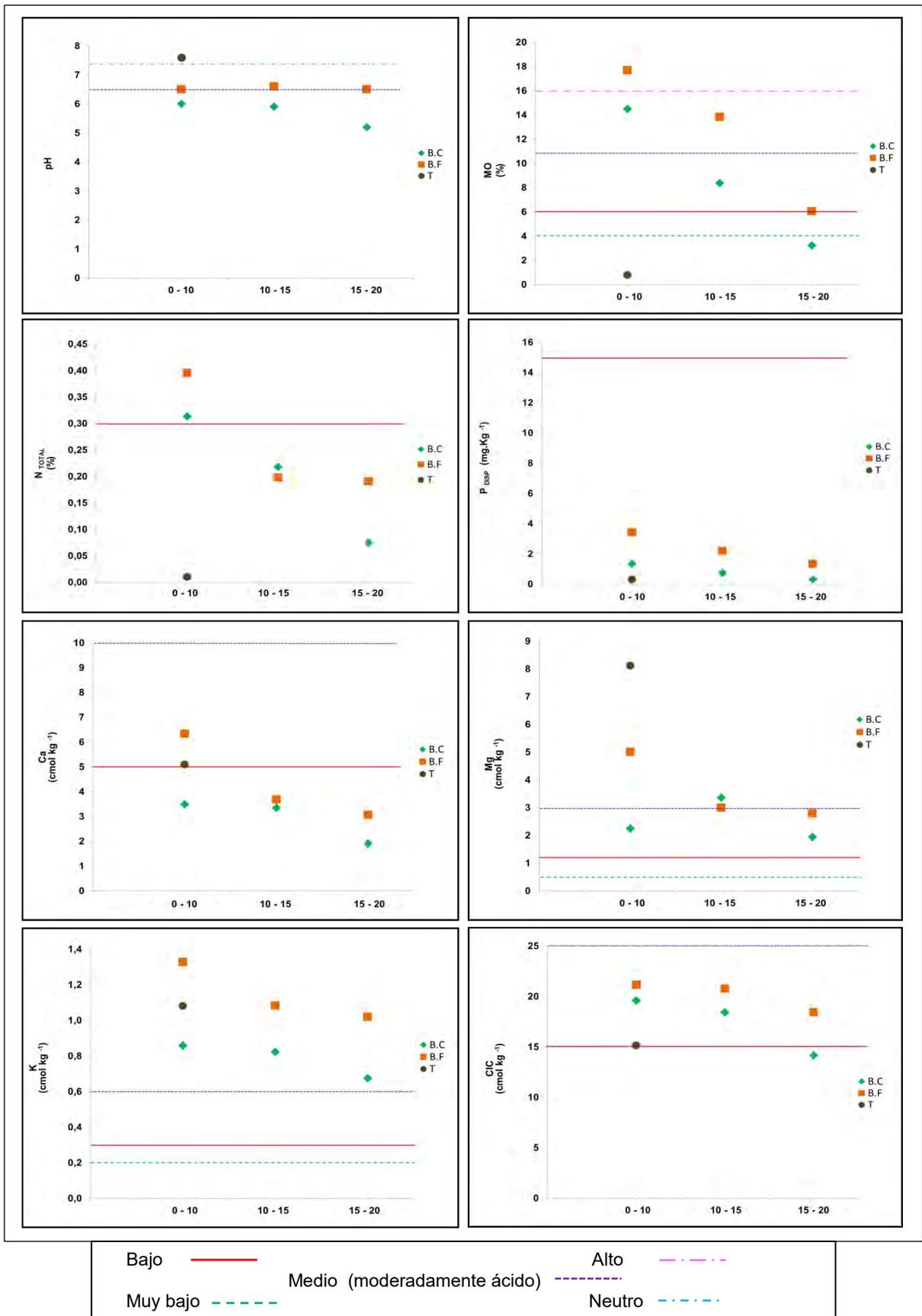


Figura 9. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 del bosque conservado y fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México. B.C= Bosque conservado; B.F= Bosque fragmentado; Tp= Tepetates

6. DISCUSIÓN

Estructura vegetal del bosque conservado y fragmentado

La vegetación del bosque conservado (Figura 10) se caracteriza por encinos (*Quercus* sp) de varias especies, de 5 a 10 m de altura, con diámetros de hasta 1.4 m (Figura 11). Los encinos son dominantes en el paisaje, aunque también, existen árboles de madroño (*Arbutus xalapensis* H.B.K.). El daño a la base de los encinos así como la presencia de *Arbutus* indican condiciones de antiguo aprovechamiento forestal.



Figura 10. Vegetación del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.



Figura 11. Diámetro de la base de los encinos del bosque conservado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.

La vegetación del bosque fragmentado (Figura 12) se caracteriza por árboles jóvenes, menor densidad de encino y madroño, con una altura promedio de 2 a 4 m, y abundante presencia de arbustos y zacatonal.



Figura 12. Vegetación del bosque fragmentado del Parque Estatal Cerro Gordo, Estado de México.

Propiedades hídricas del suelo del Bosque Conservado y efectos de la fragmentación

Las propiedades hídricas del suelo (tasa de infiltración superficial, conductividad hidráulica y potencial de flujo mátrico), varían de un mes a otro y de un año a otro; esto no se atribuye al efecto que el incremento de la temperatura ambiental puede causar con en el movimiento del aire en el suelo, ya que en la estación invernal (febrero 2013) en el bosque conservado se registró una R2 y una Kfs de 2662 y 243 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente, a una temperatura del suelo de 9°C , mientras, que en el bosque fragmentado la R2 y la Kfs fue de 38520 y 5095 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente, a una temperatura del suelo de 7°C . En la estación primaveral (abril 2013) en el bosque conservado se obtuvo una R2 de 5940 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y una Kfs de 714 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a una temperatura de 14°C , mientras, que en el bosque conservado la R2 fue de 33152 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y la Kfs de 4217 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a una temperatura de 15°C . Por lo tanto, la temperatura del suelo no explica la gran cantidad de agua que infiltra.

El comportamiento de la temperatura ambiental tampoco tiene relación con la R2 y la Kfs, ya que estas propiedades en el BC en 2012 de un mes a otro aumentan más que en 2013, pero en el BF disminuyen drásticamente y en 2013 es mínima la disminución que registran (Figura 13).

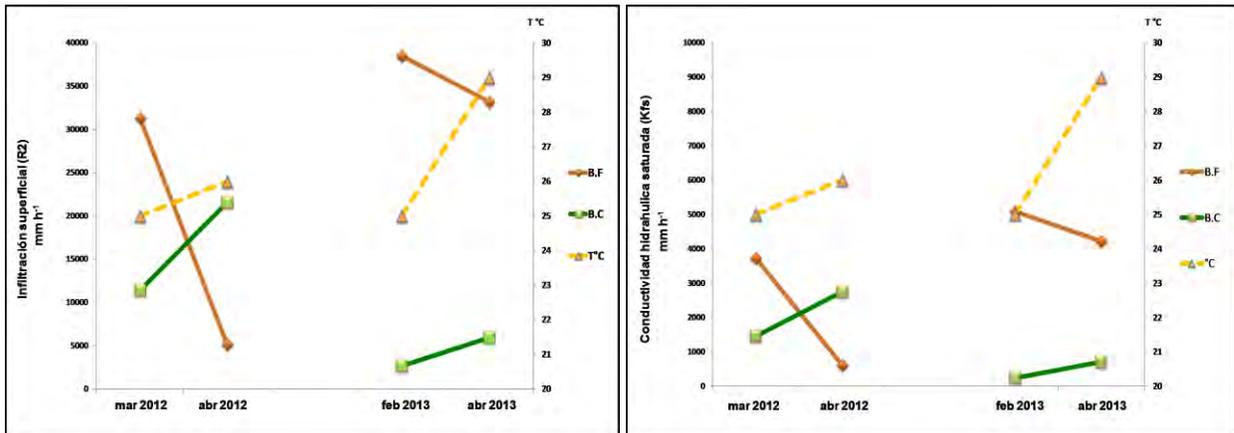


Figura 13. Variación de la tasa de infiltración (R2) del bosque conservado (BC) y bosque fragmentado (BF) del Parque Estatal Cerro Gordo, con respecto al promedio de la temperatura ambiental.

Lo anterior no explica los altos valores de las propiedades hídricas; por lo que al parecer se relaciona con la macroestructura del suelo, que en el bosque fragmentado es de tipo columnar, la cual se origina por la presencia de arcillas tipo 2:1 y sus procesos de contracción y expansión (Figura 14).

La contracción de los agregados sucede cuando se deshidratan y su volumen disminuye, lo que origina grietas. Mientras, que la expansión del suelo ocurre cuando se hidratan los minerales dominantes de arcilla. Este proceso de expansión contracción modifica la macroporosidad la estructura, infiltración y aireación del suelo (Coulombe *et al.* 1996; Gray & Allbrook 2002 en Castiglioni *et. al.*, 2005).

El bosque conservado registró un comportamiento de incremento de la Kfs, de un mes a otro ya que según Castiglioni (2005) en regiones con estaciones húmedas y de estiaje bien definidas los suelos se expanden y contraen en ciclos definidos. De esta forma cuando estos suelos están secos, que corresponden a la época de invierno y principios de primavera y llega a ocurrir una lluvia producto de los "torres" que afectan esta región del país, esta zona tiene una mayor capacidad de conducir agua a través del suelo (Kfs).



Figura 14. Macroestructura de los tepetates del Parque Estatal Cerro Gordo.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas muestran que una alta porosidad que se relaciona con una baja densidad aparente, la cual en el BC es constante ($0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$) tanto en 2012 como en 2013. Este valor se ubica dentro del rango nacional e internacional para suelos volcánicos registrado por Aviña-Hernandez (2015) en el Parque Nacional Cofre de Perote ($0.73 \text{ gr}\cdot\text{cm}^3$); González-Montiel (2013) en Mineral del Monte ($0.44 \text{ gr}\cdot\text{cm}^3$), Mora-Santiago (2015) en el Parque Nacional Pico de Orizaba en bosque de pino ($0.8 \text{ gr}\cdot\text{cm}^3$), Jiménez-Cruz (2011) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco ($0.87 \text{ gr}\cdot\text{cm}^3$), Oyarzún *et. al.*, (2011) registró $0.53 \text{ gr}\cdot\text{cm}^3$. En tanto que, la humedad (H%) registrada es variable de marzo a abril 2012 a febrero 2013 (28, 21 y 17%, respectivamente), y además, la textura arcillo limosa y franco arcillo limosa que presenta indican que este tiene la capacidad para conducir, almacenar y regular el flujo de agua.

La hidrofobicidad en el suelo del BC se clasifica como fuertemente repelente al agua (174 s), pero el valor es menor a lo registrado en suelos del BF, lo que indica que son aún más repelentes.

Propiedades hídricas del suelo de la montaña sagrada en el contexto nacional e internacional.

Los valores registrados en suelos del BC en abril 2012 de la tasa de infiltración (R_2) y de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) muestran ser valores muy altos con respecto a los registrados en otras zonas a nivel nacional e internacional; se pueden observar en los siguientes cuadros (8 y 9) estas propiedades hídricas en comparación a lo registrado en suelos de bosques templados y tropicales.

Cuadro 8. Tasas de infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) a nivel nacional.

Sitios	Autores	Infiltración superficial	Kfs
Nacional		(mm hr ⁻¹)	
PNCh	Ángeles-Cervantes (2010)	194	-----
PNCP	Aviña-Hernandez (2015)	504	-----
Papaloapan	Chávez-Barrera (2011)	14040	1368
El Triunfo	García-Castro (2011)	15000	1080
PNCh mant	García-Plata (2012)	-----	264
LCM	Gómez-Tagle (2008)	-----	1578
MM	González-Montiel (2013)	2790	317
PNDL	González-Vargas (2011)	2240	426
VC	Hernández-Ordoñez (2014)	2672	248
PNCA	Jiménez-Cruz (2011)	2916	8.88
PNPO Abies	Mora-Santiago (2015)	2448	228
PNPO Pinus	Mora-Santiago (2015)	1519	137
Lacandona	Poblano (2013)	18000	1368
BC abril 2012	García-Plata (2017)	21520	2759

PNCh= Parque Nacional El Chico; PNCP= Parque Nacional Cofre de Perote; PNChmant= Parque Nacional El Chico zona de manantiales; LCM= Lago de Cuitzeo, Morelia; MM= Mineral del Monte; PNDL= Parque Nacional Desierto de los Leones; VC= Villa del Carbón; PNCA= Parque Nacional Cumbres del Ajusco; PNPOAbies= Parque Nacional Pico de Orizaba, bosque de Abies; PNPOPinus= Parque Nacional Pico de Orizaba, bosque de Pinus; BC= Bosque Conservado Cerro Gordo abril 2012.

Cuadro 9. Tasas de infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (Kfs) a nivel internacional.

Sitios	Autores	Infiltración superficial (mm hr ⁻¹)	Kfs
Internacional		(mm hr⁻¹)	
Japón	Hayashi <i>et al.</i> (2006)	-----	291
España	Neris <i>et al.</i> (2012)	30	-----
ICc	Neris <i>et al.</i> (2013)	796	-----
IC Pinus	Neris <i>et al.</i> (2013)	188	-----
Chile	Oyarzún <i>et al.</i> (2011)	-----	703
Vietnam	Ziegler (2004)	-----	91
Malasia	Ziegler (2006)	-----	1443
Brasil	Zimmermann (2006)	1533	206
BC abril 2012	García-Plata (2017)	21520	2759

Japón= bosque de coníferas; España= Islas Canarias, bosque quemado; ICc= Islas Canarias, bosque conservado; ICPinus= Islas Canarias, bosque de pinus; Chile= bosque siempreverde; Vietnam= sitios post-cultivo; Malasia= bosque tropical; Brasil= Amazonas, bosque secundario; BC= Bosque Conservado Cerro Gordo abril 2012.

En la Figura 15 se muestra la variación de la tasa de infiltración (R_2) y la K_{fs} en zonas templadas (bosques de coníferas), y en la Figura 16 de zonas tropicales (selvas), comparados con el BC del Cerro Gordo.

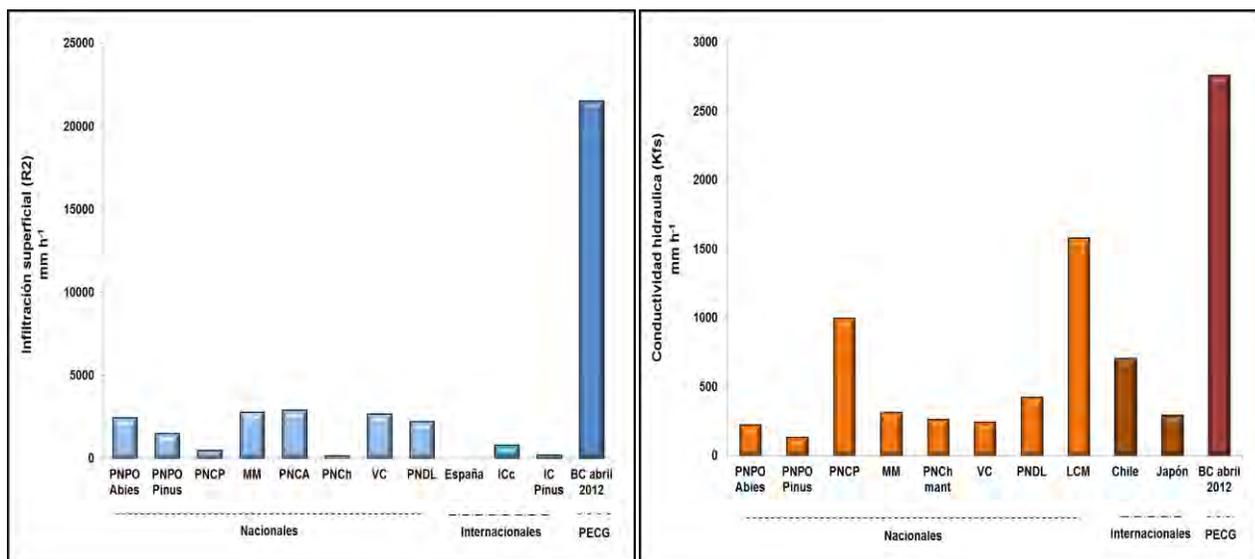


Figura 15. Tasas de Infiltración superficial y de conductividad hidráulica saturada (Kfs) en varios bosques templados a nivel nacional e internacional.

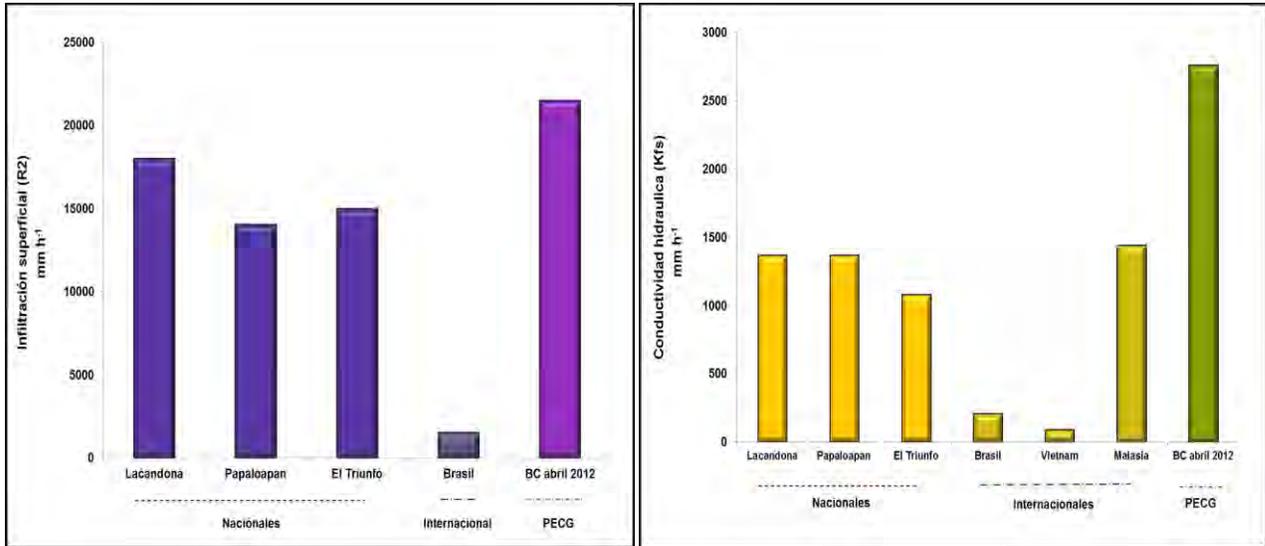


Figura 16. Infiltración superficial y conductividad hidráulica saturada (Kfs) nacional e internacional de bosques tropicales.

Estos valores indican que la montaña sagrada de la cultura Teotihuacana registra el mayor valor obtenido a nivel mundial en tasa de infiltración y conductividad hidráulica.

La región de la Lacandona y la Reserva de la Biosfera del Triunfo alimentan el sistema Grijalva-Usumacinta, que son los ríos más caudaloso del país, y la más importante región nacional por la formación de ríos y manantiales; mientras, que en la cuenca del Papaloapan, en la Chinantla Oaxaqueña, se forman también, un gran número de manantiales (Zuzul, Monteflor, Vega del Sol, Cerro Marín, entre otros). Por lo anterior, y considerando que los suelos de los bosques del cerro sagrado de la cultura Teotihuacana presentan una alta conductividad hidráulica y tasa de infiltración que se reduce a los 20 cm de profundidad, y en los que el agua fluye en un movimiento horizontal y con la inclinación del terreno para ir hacia lugares de menor altitud, se puede explicar porque existía una gran cantidad de manantiales e incluso numerosas lagunas (Mendoza, 2013).

Los altos valores de las propiedades hídricas se pueden atribuir a la estructura y porosidad (porcentaje, tipo, tamaño, orientación y continuidad de los poros) del suelo. El alto porcentaje de porosidad (de 51% a 46% a lo largo del perfil con respecto a la profundidad), la estructura de tipo migajosa y granular, así, como los macroporos horizontales de la parte superficial, indican óptimas condiciones para la infiltración y la conductividad del agua respecto a la profundidad.

En tanto, que los valores del potencial de flujo mátrico registrados en 2012 (marzo y abril) y en 2013 (febrero y abril) en el BC, los cuales se duplicaron de un mes a otro (0.203 y 0.382; 0.053 y 0.112 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente), muestran que los suelos de la montaña sagrada tienen una alta capacidad de retención y transmisión constante de agua a los estratos inferiores, lo que permite generar cuerpos de agua que abastecen mantos subterráneos o la generación de manantiales. Estos valores están en el rango nacional registrado por Jiménez-Cruz (2011) en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (0.003 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$); Mora-Santiago (2015) en bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Pico de Orizaba (0.067 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$); Castro-Alonso (2009) en una pradera de alta montaña del Parque Nacional Izta-Popo (0.217 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$); Poblano (2013) en bosque tropical perennifolio de la Lacandona, Chiapas (0.29 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y por González-Montiel (2013) en un bosque de Mineral del Monte (0.44 $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Otra propiedad importante a considerar, es la hidrofobicidad, la cual en estos suelos se clasifica como fuertemente repelente, lo que indica que se generan escurrimientos. En zonas con abundante hojarasca los escurrimientos serían a menor velocidad, mientras, que en el bosque fragmentado con escasa acumulación de hojarasca son a mayor velocidad, por lo tanto, esto explica los grades procesos erosivos que ocurren en el lugar.

Origen de Manantiales

Los altos valores de Infiltración y K_{fs} indican, a pesar de la hidrofobicidad, que el suelo tiene una alta capacidad de infiltrar y conducir agua en el suelo. La elevada porosidad y la alta retención de humedad pueden explicar el posible origen de manantiales

En las siguientes Figuras 17, 18 y 19 se observa un ejemplo de un manantial por flujo descendiente en el corte del terreno en el sistema montañoso del Parque Nacional El Ajusco.



Figura 17. Parte alta del sistema montañoso del Ajusco.



Figura 18. Corte en el suelo de la parte alta del sistema montañoso del Ajusco.

Como puede observarse, existe una capa de suelo y bajo esta, una capa de material endurecido y poco permeable, lo que ocasiona la salida de agua generando un manantial.

Capa de suelo ----



---- Capa de material poco permeable

Manantial ----

Figura 19. Cambio de capas en el perfil suelo-roca y manantial.

Los perfiles de infiltración obtenidos, nos pueden indicar que la alta capacidad de infiltración y conductividad hidráulica solo es posible en los primeros 20 cm del suelo, lo cual, también se puede observar en los perfiles de suelo del bosque conservado (Figura 20) y del bosque fragmentado (Figura 21), ya que el cambio de color y la textura franco arcillo limosa que se registra de 15 a 20 cm, indica la abundante presencia de limo y arcillas; además, a mayor profundidad, según Fernández-Galán (2015) las capas que corresponden a los horizontes AB, BW, BW₂ y C, registran alto contenido de arcillas 2:1. Por lo tanto, a mayor profundidad la presencia de capas más duras con material más fino o de arcillas, limita la infiltración y mantienen un flujo constante y lento. Cuando este flujo encuentra la capa impermeable se da el escurrimiento horizontal, hasta encontrar una falla o salida del agua para dar origen a un manantial.



Figura 20. Perfil de suelo del bosque conservado del Parque estatal Cerro Gordo.



Figura 21. Perfil de suelo del bosque fragmentado del Parque estatal Cerro Gordo.

Efectos de la fragmentación de bosques sobre las propiedades hídricas y la pérdida de manantiales

La fragmentación de bosques, en principio incrementa la tasa de infiltración y K_{fs} , sin embargo, como puede observarse en las imágenes de micromorfología los efectos se traducen en la pérdida de estructura y baja porosidad total, sobre todo en la capa superficial.

Las variaciones mensuales y anuales, nos indican que este proceso es variable, ya que el incremento de la temperatura del suelo en bosques fragmentados, deshidrata el suelo en la temporada seca y ocurre el fenómeno de contracción de las arcillas que forma bloques columnares (Figura 22).

Cuando ocurren las lluvias intensas, existe una alta infiltración y conductividad hidráulica en el suelo por las grietas y por la separación de bloques, además, inmediatamente comienza la hidratación de las arcillas en capas inferiores (de 10 a 20 cm de profundidad) y el proceso de expansión, lo cual, limita el flujo de agua, tal cual se describe en los perfiles de infiltración. Además, la capa superficial del suelo se satura rápidamente y por la escasa hojarasca no se pueden evitar los escurrimientos y arrastre del suelo sobre la pendiente.



Figura 22. Estructura de bloques columnares en los tepetates.

Este proceso de entrada de agua y el proceso de contracción-expansión ocurre en menor medida en bosques con alta densidad arbórea. La hojarasca de encinares que son de hoja ancha y dura, ayuda a controlar este proceso, sin embargo cuando esta capa desaparece el proceso de entrada de agua al suelo se incrementa lo que aunado a la hidrofobicidad del suelo, permite que ocurra el proceso de erosión severa, lo que también evita la formación de manantiales. El gran arrastre de sedimentos azolva la parte baja del cerro, disminuye su productividad y cambia el paisaje.

Las propiedades químicas del suelo no se modifican drásticamente con la fragmentación del bosque, sin embargo, en la capa superficial el Mg es considerablemente más alto que en el bosque fragmentado, lo cual, puede formar una costra impermeable en el suelo, pero en general la mayoría de estas propiedades se clasifican en la categoría medio y bajo.

Diagnóstico hídrico del Bosque Fragmentado

La fragmentación en el Cerro Gordo se debe al cambio de uso de suelo para actividades agropastoriles y de extracción de madera, los Andosoles son susceptibles al mal manejo, y sí además, son sometidos a periodos de desecación prolongados, provoca que disminuyan su capacidad de campo, se alteran las propiedades hídricas, pierden su estructura y su consistencia pulverulenta en seco favorece la erosión de la zona.

Los valores significativamente superiores en suelos del BF en 2013 con respecto a lo registrado en el BC en 2012 de la tasa de infiltración (R_2) y la K_{fs} , se debe a la escasa cobertura arbórea que provoca la rápida desecación del suelo, la baja porosidad superficial, la hidrofobicidad severamente repelente, entre otros cambios.

Cuando se ha perdido la capa A de suelo de mayor contenido de materia orgánica, quedan los bloques columnares de arcillas expuestas. Estos tepetates de la parte baja del Cerro Gordo tienen un pH neutro, bajo contenido de materia orgánica, baja densidad aparente y humedad, alto contenido de Mg^{++} , mínima tasa de infiltración y potencial mátrico, y una K_{fs} negativa, lo cual indica que han perdido toda su capacidad hídrica y productiva.

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que:

- La tasa de infiltración $R1$ y $R2$, K_{fs} y Φ_m del bosque conservado, son variables estacionalmente, sin embargo registran los más altos valores a nivel internacional.
- Los suelos de estos bosques en general tienden a manifestar una fertilidad de categoría media y baja, por lo que son susceptibles a una degradación química. Posibilidad que incrementa con la pérdida de la cubierta forestal, lo cual, implica la pérdida de la fertilidad del suelo.
- La K_{fs} e infiltración ($R2$) en el bosque conservado, así, como la presencia de una capa semipermeable a los 20 cm de profundidad, se debe al fenómeno de contracción y expansión del suelo, que permite que exista una gran entrada de agua, que al saturar el suelo ocasiona un transporte horizontal por la pendiente de la montaña, hasta la parte baja para encontrar un corte o salida, donde se puede dar origen a un manantial.
- La fragmentación de la vegetación, genera incrementos en la T del suelo, lo que ocasiona una acelerada contracción del suelo y que las lluvias lleguen directamente y con mayor fuerza al suelo, lo que ocasiona una rápida infiltración y K_{fs} inicial, pero también, la rápida saturación superficial, escurrimientos y arrastre de suelo en bloques.
- El bosque fragmentado limita la capacidad de generar manantiales en la montaña sagrada Teotihuacana, ya que el escurrimiento horizontal constante del bosque conservado, funciona como un aporte para mantener la humedad mínima para continuar los procesos biológicos y retardar el aflore del tepetate.
- El proceso de arrastre del suelo por las fuertes lluvias cada temporada, provocan el aflore del tepetate en las partes bajas de la montaña sagrada, por lo que se pierden las propiedades hídricas, fertilidad y productividad de los suelos.

8. LITERATURA CITADA

- Ángeles-Cervantes E. (2010). Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados campus montecillo, México.
- Aviña-Hernández, J. (2015). Tratamientos mineralógicos para incrementar el éxito de reforestación con *Pinus cembroides* y otras coníferas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Barroso Grasa R. A. (1999). La roca fosfórica de Trinidad de Guedes: una alternativa en la fertilización de suelos ácidos bajos en fósforo. Tesis de master en fertilidad de suelos, Universidad de Camagüey. Cuba.
- Bradbury J.P. (1989). Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de Mexico: Quaternary Science Reviews, 8, 75–100.
- Broda de Casas J. (2003). La ritualidad mesoamericana y los procesos de sincretismo y reelaboración simbólica después de la conquista. Graffylia: Revista de la Facultad de Filosofía y Letras 2: 14-27. México.
- Broquen P.; Suárez A.; Girardin J. L. & Percas J. C. (2013). Procesos pedogenéticos en una secuencia de suelos desarrollados en cenizas volcánicas en el noroeste de Neuquén, Argentina. Revista ciencias del suelo 31(2): 213-222.
- Bullock P., Jongerius A., Tursina T., Fedoroff N. Stoops G. (2004). Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C. y C. A. Ortiz S. 1ra edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México, México. 154 pp.
- Castiglioni M. G., Morrás H., Santanatoglia O., Altinier M. (2005). Contracción de agregados de Argiudoles de la Pampa Ondulada diferenciados en su mineralogía de arcillas. Cienc. suelo v.23 n.1 Buenos Aires, Argentina.
- Castro-Alonso A. (2009). Conductividad hidráulica en bosques y pradera de alta montaña de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Ceruti Constanza. (2012). Montañas sagradas y montículos ceremoniales de los Cherokee. Centro argentino de etnología americana. Mitológicas, vol. Xxvii, pp. 9-20.
- Coello C.; De Bièvre B.; Pacheco E.; Cisneros P. (2007). Análisis de métodos de estimación de la conductividad hidráulica saturada en suelos degradados. Programa para el manejo del agua y del suelo (PROMAS), Universidad de Cuenca, Ecuador.

- Chávez-Barrera J. S. (2011). Efectos del Sistema roza, tumba y quema sobre el servicio ambiental hidrológico de un bosque tropical perennifolio de la cuenca del Papaloapan, Oaxaca. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Dahlgren R. A.; Saigusa, M.; Ugolini, F. C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in agronomy*, 82:113-182.
- Debano I. F.; Neary D. G.; Folliott P. F. (1998). *Fire's effects on ecosystem*. Wile and sons. Usa.
- Dekker, I. W. (1998). Moisture variability resulting from water repellency in dutch soils. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- & Jungerius P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena supplement* 18: 173-183.
- Doerr S. H.; R. A. Shakesby y R. P. D. Walsh. (2000). Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth sci. Rev.* 51.
- Duque Z. J. R.; Arbeláez Mesa S. P.; Jaramillo Jaramillo D. F.; León Peláez J. D. (2004). Hidrofobicidad en Andisoles bajo robledal (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada piedras blancas (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, vol. 57, núm. 2.
- Escamilla S. G., Solleiro R. E., Sedov S., Gama C. J. (2002). Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. *Invest. Geog*, no.48 México.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma. 54 p.
- Fernández Galán B. S. (2013). Arqueoedafología de rellenos de los suelos/sedimentos y tecnosoles de la Ciudadela, en Teotihuacán, México (Proyecto Tlalocan). Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Flores-Herrera A. (2013). Conflictos sociales en el antiguo barrio de la Ventanilla, Teotihuacán, durante las últimas fases de desarrollo. Tesis de licenciatura. Centro universitario de Tenancingo, Estado de México.
- García-Castro J. M. (2011). Servicio ambiental hidrológico del bosque mesofilo de montaña y de los cafetales orgánicos de la reserva de la biosfera El Triunfo Chiapas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

- García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- García-Plata (2012). Servicio ambiental hidrológico del Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Reporte de servicio social. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- González-Montiel E. (2013). Manejo forestal y servicios ambientales en mineral del monte, Estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Gómez-Tagle A.; Zepeda H. (2008). Variación de la capacidad de infiltración en un suelo volcánico del centro de México con diferentes coberturas y usos del suelo. Resumen para congreso de ciencias ambientales. En memorias del VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional, III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Sonora, México. Presentación oral.
- González-Vargas, T. (2011). Ecohidrología de un bosque de oyamel: diagnóstico y rehabilitación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Hayashi Y., Ken'ichirou K., Mizuyama T. (2006). Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. *Journal of Hydrology* 331, 85– 102.
- Hernández-Ordoñez J. (2014). Diagnóstico y habilitación de suelos forestales con presencia de manganeso-hierro, caso villa del carbón, estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Horacio L. R. (2004). Caracterización de medios porosos y procesos percolativos y de transporte. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- Huerta G. M. (2000). El Sistema de riego de los manantiales de San Juan Teotihuacán. Antología sobre pequeño riego, vol. II. Organizaciones autogestivas. Edit. Palerm Viqueira y Martínez Saldaña. Colegio de Postgraduados y Plaza y Valdés.
- IUPAC. (1972). Manual of symbols and terminology, Appendix 2., Pt. 1, Colloid and Surface Chemistry. *Pure appl. Chem.* 31, 578 p.
- Jiménez-Cruz, D. (2011). Restauración del servicio ambiental hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D.F., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Martínez H. E., Fuentes E. J. P., Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. (2008). *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. Santiago de Chile 8(1): 68-96.

- Mendoza G. J. (2013). Los municipios de San Gabriel Chilac y San Juan Teotihuacán ante la federalización de las aguas, 1888-1960. *Relaciones Estudios de Historia y Sociedad*, Vol. 34, No. 136.
- Meza P. E. y Geissert K. D. (2003). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, vol. 5, núm. 2.
- Mikkelsen R. (2010). Soil and fertilizer magnesium. *Better crops*. 94(2): 26-28.
- Millón R. (1964). The Teotihuacan mapping project. *American antiquity*. Vol. 29, No. 3.
- MON-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, México, pp. 85.
- Mora-Santiago A. (2015). Ecohidrología de los tipos de vegetación del Parque Nacional Pico de Orizaba, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Montero García I. (2002). Atlas arqueológico de la alta montaña mexicana. México.
- Moragas N. (2013). Teotihuacán. Área académica de Historia y Antropología. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Neris J.; Tejedor M.; Rodriguez M.; Fuentes J.; Jimenez C. (2012). Infiltration, runoff and soil loss in Andisols affected by forest fire (Canary Islands, Spain). *Journal Hydrological Processes*. Volume 27, Issue 19.
- Neris J.; Tejedor M.; Rodriguez M.; Fuentes J.; Jimenez C. (2013). Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *CATENA* 108: 50-57.
- Nissen J.; Quiroz C.; Seguel O.; Mac Donald R.; Ellies Sch. A. (In memoriam). (2005). Variación del potencial mátrico durante el movimiento de agua en Andisoles. *Agro Sur* 33 (1) 36-47.
- Oyarzún C.; Frêne C.; Lacrampe G.; Huber A.; Hervé P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la cordillera de la costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Revista Bosque* 32(1): 10-19 pp.
- Poblano O. J. (2013). Efecto del fuego sobre las propiedades hídricas del suelo del bosque tropical perennifolio en la región La Lacandona, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Programa de Manejo del Parque Estatal Cerro Gordo. (2000). *Gaceta del Estado*. Secretaria de ecología. Toluca, México.

- Regalado C. M.; García-Santos G.; Hernández-Moreno J. M.; Pérez-Buenafuente A.; Socorro A. R. (2003). Caracterización de la zona no saturada de un bosque maduro de laurisilva en el Parque Nacional de Garajonay: hidrofobicidad e implicaciones hidrológicas. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 6: 193-200.
- Reichardt, K.; Timm C. (2004). Solo, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações. Editora manole. Sp (Brasil). 478 pp.
- Reynolds, W. D. y Elrick D. E. (1990). Pondered infiltration: I. Analysis of steady flow. *Soil. Sci. Soc Am. J.* 54: 1233 – 1241.
- Reynolds, W.D., Elrick D.E., Youngs E.G., Amoozegar A., Booltink H.W.G. And Bouma J. (2002). Saturated and field-saturated water flow parameters, pp. 797-878. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4—Physical Methods*, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA.
- Rzedowski J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa. México.
- Roldán M. F.; Venialgo C. A.; Gutierrez N. C. (2004). Potasio disponible, de reserva y energía de reemplazamiento en suelos y el nivel foliar en rye-grass. Resumen a-072. Universidad del Nordeste.
- Sánchez Navarro J. A.; Coloma López P. (1998). Hidrogeología de los manantiales termales de Arnedillo. *Zubía monográfico* 11-25.
- Stoops G. (2003). *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America. Madison, WI. 184 pp.
- Unesco. (2010). *La ecohidrología como desafío: experiencias y estudios de caso*. Documentos técnicos del phi-lac, no. 23.
- Van Reeuwijk L. P. (1999). *Procedimientos para análisis de suelos*. Versión 1995. Traducción de: Ma. Del Carmen Gutiérrez C., Carlos A, Tabares E. y Carlos A. Ortiz S. Primera edición en español, 1999. Especialidad en edafología. Colegio de postgraduados, campus Montesillo, México. pp. 45.
- Vitry C. (2008). Los espacios rituales en las montañas donde los Inkas practicaron sacrificios humanos. *Paisagens culturais. Contrastes sul-americanos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 47 – 65.
- Vose James M., Ge Sun, Chelcy R. Ford, Michael Bredemeier, Kyoichi Otsuki, Xiaohua Wei, Zhiqiang Zhang and Lu Zhang. (2011). *Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs*. Wiley Online Library 4: 146-158.

Zapata Hernández R. D. (2006). Química de los procesos pedogenéticos. Medellín, Colombia. 124 p.

Ziegler A., Giambelluca T., Train L., Evett S. (2004). Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: Evidence of accelerated overland flow generation. *Journal of Hydrology* 287(1):124-146.

Ziegler A., Negishi J., Sidle R., Noguchi S., Nik A. (2006). Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena* 67: 89-104.

Zimmermann B., Elsenbeer H., M de Moraes J. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation.

REFERENCIAS

Atl, el portal del agua desde México. (2008). Los manantiales, la fuente de agua más pura del planeta.

Recuperado de:

www.atl.org.mx.