UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

Campus Tuxpan

Maestría en Ciencias del Ambiente

"CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS FORESTALES EN EL EJIDO ATOPIXCO MUNICIPIO DE ZACUALTIPÁN, HGO."

TESIS

Que para obtener el título de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

PRESENTA:

Ing. Josué Fabián Pérez Hernández

DIRECTOR:

Dr. Jorge Luis Chagoya Fuentes

CODIRECTOR:

Dr. Ramón Razo Zárate

Tuxpan, Ver. **2018**

El presente trabajo de intervención titulado: **"Caracterización física e hidrológica de los suelos forestales en el Ejido Atopixco Municipio de Zacualtipán, Hgo."**, realizado por el C. Josué Fabián Pérez Hernández, bajo la Dirección del Dr. Jorge Luis Chagoya Fuentes y Codirector Ramón Razo Zárate, ha sido revisada y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

Dr. Jorge Luis Chagoya Fuentes

DIRECTOR

Dr. Ramón Razo Zárate

CODIRECTOR

Tuxpan de Rodríguez Cano Veracruz, enero de 2018

Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

Revisión del Trabajo de Intervención del alumno: **Ing. Josué Fabián Pérez Hernández**

JURADO EXAMINADOR

NOMBRE	FECHA	DICTAMEN	FIRMA
Stella Mary Amarilla R.	06/02/2018	Aprobado	
Blanca Esther Rapa Cruz	14/02/2018	Aprobado	
Carlos González Gándara	14/02/2018	Aprobado	

En la presente revisión se acordó que el Trabajo de Intervención denominado **"CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS FORESTALES EN EL EJIDO ATOPIXCO MUNICIPIO DE ZACUALTIPÁN, HGO."** que presenta el sustentante para obtener el Título de Maestro, está terminado por lo que puede proceder a su inmediata impresión.

DEDICATORIA

A mi hija Alexa Enid Pérez Retama por ser parte de mi vida y ser ella una motivación día a día para ser una mejor persona.

A Karen Penélope López Miranda por su gran amor, apoyo y palabras positivas de nunca rendirme.

A mis padres Rodrigo Jesús Pérez Hernández y Bertha Hernández Franco por darme la vida, educarme, comprenderme y estar conmigo en alegrías y tristezas.

A mis hermanos Rodrigo Jesús Pérez Hernández y Bertha Lizeth Pérez Hernández por contar siempre con ellos y estar siempre a mi lado brindándome su amor y cariño

A mí cuñada Ma. Teresa Aranis Aldana Fuentes y mis sobrinos Rodrigo Aram, Renata Aranis y Abdiel Amir por demostrarme su gran apoyo.

A todas las personas que de manera directa o indirecta estuvieron apoyándome en este trabajo de investigación.

Con todo cariño y amor para ustedes, los amo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Veracruzana por darme la oportunidad de seguir formándome y ser parte de su alumnado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca económica que me otorgo, lo cual permitió realizar este posgrado.

Al Dr. Jorge Luis Chagoya Fuentes por ser mi director de tesis y al Dr. Ramón Razo Zárate por ser mi codirector de tesis, ya que con el interés, apoyo y compromiso profesional de ambos fue posible realizar esta investigación.

Al igual agradezco a mi comisión lectora la Dra. Stella Mary Amarilla Rodríguez, Mtra. Blanca Esther Raya Cruz y Dr. Carlos González Gándara por sus consejos, sugerencias y recomendaciones oportunas a este trabajo de tesis.

Al núcleo agrario del Ejido Atopixco por la oportunidad de facilitar sus tierras de uso forestal para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mis amigos Yovany Lugo Fajardo, Edgar Uriel Castillo Serrano e Indira Animas Lázaro por el apoyo y participación en la toma de datos de esta investigación.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna, Dr. Juan Capulín Grande y Dr. Joel Meza Rangel de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por permitirme realizar la fase de laboratorio de esta investigación.

A mis amigos José de Jesús, Selene, Silvia y Jocabel por esta gran amistad que se formó, fue un gusto y placer estudiar con ustedes.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN 8

II.- ANTECEDENTES 11

2.1 Ciclo hídrico 11

2.2 Servicios ambientales 12

2.3 Deterioro de los recursos forestales 13

2.4 Permeabilidad de suelos 14

III.- OBJETIVOS 16

3.1 Objetivo general 16

3.2 Objetivos específicos 16

IV.- ÁREA DE ESTUDIO 17

V. MATERIALES Y METODOS 21

5.1 Determinación de las áreas de estudio 21

5.2 Aspectos biofísicos 22

5.3 Selección de las áreas de muestreo 23

5.4 Determinación de indicadores físicos e hídricos 24

5.4.1 Densidad aparente 24

5.4.2 Textura por medio del método de Bouyoucos 26

5.4.3 Infiltración 28

5.4.4 Perfil de suelos 29

5.4.5 Determinación de textura de suelos por tacto 29

5.4.6 Estructura del suelo 30

5.5 Análisis de datos 32

VI. RESULTADOS 33

6.1 Aspectos Biofísicos 33

6.1.1 Clasificación geológica 33

6.1.2 Clasificación edafológica 34

6.1.3 Tipo de clima 35

6.1.4 Uso de suelo y vegetación 37

6.1.5 Principales escurrimientos temporales 39

6.2 Determinación de indicadores hídricos 40

6.2.1 Densidad aparente y porosidad del suelo 40

6.2.2 Determinación de textura por el Método de Bouyoucos 45

6.2.3 Infiltración 45

6.2.4 Perfil de suelos 48

6.2.5 Estructura del suelo 49

VII. DISCUSIÓN 50

7.1 Aspectos biofísicos de las áreas de estudio 50

7.2 Comportamiento de la densidad aparente, porosidad y textura de las áreas forestales de estudio. 51

7.3 Velocidad de infiltración en las áreas forestales de estudio..... 51

7.4 Perfiles de suelo 52

VIII. CONCLUSIONES..... 53

IX. BIBLIOGRAFÍA..... 55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización espacial del municipio de Zacualtipán, Hidalgo 18

Figura 2. Mapa de localización geográfica del ejido Atopixco, Hidalgo 20

Figura 3. Localización de las tres áreas forestales de estudio del ejido Atopixco . 22

Figura 4. Triangulo de textura de suelo 27

Figura 5. Procedimiento de textura por tacto (USDA, 1999) 30

Figura 6. Clasificación geológica de las tres áreas forestales bajo estudio 34

Figura 7. Carta edafológica de las áreas forestales bajo estudio 35

Figura 8. Carta climática de las áreas forestales bajo estudio 36

Figura 9. Carta de uso de suelo y vegetación de las áreas forestales bajo estudio 38

Figura 10. Localización de escurrimientos temporales principales del ejido Atopixco, Hidalgo 39

Figura 11. Densidad aparente de las tres áreas forestales de estudio 44

Figura 12. Porosidad de suelo de las tres áreas forestales de estudio 44

Figura 13. Capacidad de infiltración (cm/min) del área forestal en conservación . 46

Figura 14. Capacidad de infiltración (cm/min) del área de aprovechamiento forestal 2016 47

Figura 15. Capacidad de infiltración (cm/min) del área de aprovechamiento forestal 1998 47

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Censo poblacional de localidades del municipio de Zacualtipán, Hidalgo 19

Cuadro 2. Clasificación de uso de suelo del ejido Atopixco 21

Cuadro 3. Estructura arbórea de las áreas forestales de estudio 37

Cuadro 4. Ubicación de muestras (densidad aparente y porosidad del suelo) 40

Cuadro 5. Datos de variables por muestra del área forestal en conservación 41

Cuadro 6. Datos de variables por muestra del área de aprovechamiento forestal 2016 42

Cuadro 7. Datos de variables por muestra del área de aprovechamiento forestal 1998 43

Cuadro 8. Determinación de textura 45

Cuadro 9. Capacidad de infiltración (cm/min) en las áreas forestales de estudio . 46

Cuadro 10. Características generales de los sitios de muestreo 48

Cuadro 11. Horizontes de suelo y su caracterización 48

Cuadro 12. Tipos de estructura y agregados en los suelos 49

Caracterización física e hidrológica de los suelos forestales en el Ejido Atopixco municipio de Zacualtipán, Hgo.

Ing. Josué Fabián Pérez Hernández

RESUMEN

Los bosques son proveedores de servicios ambientales hidrológicos indispensables para el ser humano. Sin embargo, las actividades relacionadas con el cultivo del bosque, pueden afectar las condiciones físicas e hidrológicas del suelo, perturbando su provisión. El ejido Atopixco está localizado en la zona de recarga hídrica que abastece a la ciudad de Zacualtipán, Hgo., y posee bosques de pino-encino bajo manejo forestal. No obstante, se desconoce si dicho manejo está afectando las características físicas e hidrológicas del suelo que puedan reducir la capacidad de recarga del acuífero. Para contestar la pregunta anterior, se seleccionaron tres áreas con diferente manejo forestal (área forestal en conservación y áreas de aprovechamiento forestal 1998 y 2016) a las cuales, con el uso de los SIG, se les determinaron sus características biofísicas. Además, en cada área de estudio se cuantificaron indicadores físicos e hídricos del suelo. Los resultados de la caracterización indican, que las áreas de estudio tienen condiciones biofísicas similares. En el caso de la densidad aparente y porosidad del suelo no se encontró diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$). Así mismo, se identificó que la textura, estructura y agregados de los suelos son similares en las tres áreas bajo estudio. Sin embargo, la taza de infiltración existe una variación a favor del área forestal de conservación en comparación con el área forestal de aprovechamiento 1998 y 2016 (2.674, 0.656 y 0.893 cm^3/min, respectivamente). Con los resultados anteriores se concluye que las características biofísicas e hidrológicas de los suelos del ejido Atopixco son propias de un área de recarga hídrica y que el aprovechamiento en 1998 y 2016 alteraron solamente la taza de infiltración. Sin embargo, se recomienda realizar estudios más profundos sobre la resiliencia de los suelos bajo aprovechamiento forestal.

Palabras claves: Bosque, servicios ambientales, manejo forestal, recarga, acuífero, densidad aparente, porosidad, infiltración.

I. INTRODUCCIÓN

En la mitad del siglo XVIII, la revolución industrial trajo un auge significativo hacia la economía, tecnología y el ámbito social, pero estableció un considerable parteaguas en el deterioro de nuestros recursos naturales, haciendo un aprovechamiento de las áreas forestales sin criterios sustentables (FAO, 2011).

Los recursos naturales han sido modificados en gran parte por las diferentes actividades antropogénicas que se han realizado a lo largo del tiempo, mismo que han traído repercusiones para el ambiente como el cambio climático, el cual ha venido alterando a los servicios ecosistémicos que se generan; puesto que son las funciones reguladoras de los flujos de agua que están vinculadas con los bosques, por lo que este beneficio se ve condicionado por la disponibilidad del recurso hídrico (Bergkamp, *et al*., 2003).

Greenpeace en el 2011 publica que el agua dulce es un recurso finito, vital para el ser humano y esencial en el desarrollo social y económico, a pesar de su importancia evidente en la vida del hombre, en las décadas recientes se empezó a tomar conciencia pública de su escasez y el riesgo cierto de una disminución global de las fuentes de agua dulce.

Cotler y Priego (2004) señalan, que la toma de decisiones en materia de uso y manejo de los recursos naturales como el agua, vegetación y suelo se tiene que basar principalmente en el análisis de las cuencas hídricas y en los procesos que estas generan dentro del medio ambiente.

Los recursos naturales se han aprovechado para la comodidad y sobrevivencia de los seres humanos; entre ellos, los bosques son unos de los principales que se ha reportado con mayor afectación por su uso no sustentable, debido a que son una fuente principal materia prima en el desarrollo humano (Hamilton *et al*., 2009).

Adicionalmente, las actividades antrópicas asociadas al mal uso del suelo, por ejemplo; el sobrepastoreo, la agricultura tradicional y el clandestinaje de los bosques, pueden llegar a afectar la densidad aparente, tasa de infiltración y escorrentía superficial, los cuales aceleran, entre otras cosas, los procesos de erosión hídrica (Turnbull *et al*., 2010).

Aunado a lo anterior, un inadecuado aprovechamiento forestal puede generar un incremento en la erosión y por consecuencia acarreo de sedimentos hacia los ríos. Sin embargo, con buenas prácticas de ordenación de bosques estos procesos se pueden reducir (Calder *et al.,* 2007)**.** En el caso de la erosión hídrica, la tasa de infiltración (la cual es un parámetro primordial a considerar en la erosión del suelo), depende de diversos atributos tales como; la topografía del terreno, vegetación y parámetros físico-químicos (Oyarzún, 2011).

Finalmente cabe resaltar, que los suelos con una adecuada cobertura forestal, presentan generalmente una baja densidad aparente (debido a la elevada interacción biológica en sus suelos); por lo consiguiente, tienen cualidades físicas superiores a la de los suelos activos con cultivo o pastoreo (Chagoya, 2009). Esto se debe también a que la cobertura vegetal de los bosques influye directamente

sobre el ciclo hidrológico; evitando y retardando el escurrimiento, aumentando la tasa de infiltración e incrementando la intercepción de lluvia (Besteiro, 2014).

En la zona centro-norte del estado de Hidalgo se localiza la sierra alta, la cual se caracteriza por presentar terrenos accidentados con pequeñas mesetas en las partes más altas, donde los bosques de coníferas-encinos y bosque mesófilo de montaña se ven favorecidos por la buena calidad de sitio y la presencia constante de neblina (Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo, 2001).

En el municipio de Zacualtipán, Hgo., en los últimos 20 años ha aumentado sustancialmente el número de asentamientos urbanos, debido a un incremento de las actividades textiles que abastecen a la Ciudad de México. Por consecuencia, existe una demanda de mayores servicios públicos entre los que destaca el agua potable.

Cabe comentar, que el agua que consume la ciudad de Zacualtipán proviene de zonas de recarga hídrica donde se ubican bosques de pino-encino bajo manejo forestal. Sin embargo; se desconoce si las actividades silviculturales que se desarrollan afectan las características físicas de los suelos y estas a su vez se manifiestan en una pérdida de infiltración del recurso hídrico.

Por lo anterior, es importante realizar la caracterización biofísica e hidrológica de los suelos en las áreas de recarga del acuífero mencionado anteriormente.

II.- ANTECEDENTES

2.1 Ciclo hídrico

El rol de los bosques y selvas en el ciclo hidrológico han estado en discusión desde hace mucho tiempo. Los estudios que se han elaborado se enfocan generalmente con la relación que existe bosques - agua y en gran parte se han desarrollado en Estados Unidos y Europa. En el caso de México, el Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) es una de las instituciones que más ha realizado investigaciones acerca de estos temas.

En un estudio de FAO (2010) menciona que a nivel mundial existe un 8% de bosques los cuales ayudan a la conservación del suelo y a la regulación del ciclo del agua. Además, indica que en el mundo existen alrededor de 330 millones de hectáreas que están destinadas a la conservación y resaltan que los bosques desempeñan funciones importantes en la recarga y protección de los acuíferos que suministran agua para millones de personas en el planeta. Finalmente, determina que hacia el 2025, 1,800 millones de personas vivirán en regiones con un grado total de ausencia de agua y dos terceras partes de la población mundial podría sufrir condiciones de escasez.

En adición a lo anterior, existe evidencia que los suelos de ciertos bosques tienen la capacidad para retener en su estructura, grandes cantidades del recurso hídrico proveniente de la lluvia y que en algunos casos, pueden absorber 18 veces más lluvia que los suelos desnudos y cuatro veces más que los suelos cubiertos por pastos (Zavaleta, 2012).

El mal manejo del recurso hídrico es problema serio al cual se le tiene dar la relevancia adecuada, por lo que se debe tomar conciencia de la relación agua - bosque y la importancia de implementar acciones tendientes a la conservación y manejo sustentable de estos recursos (Castelán, 2000).

2.2 Servicios ambientales

Los bosques y selvas generan una gran variedad de servicios ambientales que son utilizados por los seres vivos. Por ejemplo; los bosques de niebla dependen de las condiciones ambientales y especificas del lugar (zonas con precipitación mayor a los 3,000 mm), por lo que son considerados como reguladores en la captación e infiltración de agua de lluvia hacia los mantos acuíferos (Donovan, 2007). Desde un punto de vista biofísico, los ecosistemas forestales se caracterizan por tener un equilibrio dinámico, que en caso de no ser alterado se aseguraría la provisión de sus servicios ecosistémicos (Brüschweiler *et al*., 2004).

Por otra parte, Daily (1997), Bishop (1999) y Pearce (2001) mencionan que los bosques templados realizan funciones ecológicas fundamentales como son; la protección de suelos, el reciclaje de nutrientes, la conservación de la biodiversidad y el control hídrico. Por lo que este ecosistema también es reconocido como un valioso aportador de servicios ecosistémicos para el desarrollo de las diversas actividades que se cumplen en las partes bajas de las cuencas.

Sin embargo, los ecosistemas forestales y sus servicios ambientales se han visto seriamente amenazados por la deforestación, la cual genera una disminución significativa en la infiltración del recurso hídrico a los mantos acuíferos (Toledo,

2009). Adicionalmente, otros autores indican que existe una relación codependiente entre el recurso agua y los bosques para generar una línea de investigación prioritaria (Hamilton *et al.,* 2009).

En este sentido, existen nuevas investigaciones acerca de las interacciones que tienen el agua y los bosques. Estas líneas de trabajo están enfocadas a determinar el tiempo y la forma en el que se afrontarán los retos del manejo y aprovechamiento forestal. Así mismo, con frecuencia se desarrolla investigación respecto a la disponibilidad, calidad y ordenamiento de los recursos hídricos (Calder *et al*., 2007). Además, el deterioro a nivel de cuencas hidrográficas hace cada vez más prioritario el diseño y la evaluación de los mecanismos para prevenir y tomar acciones encaminadas al control y mitigación del riesgo que tiene el recurso hídrico (Torres, 2009).

2.3 Deterioro de los recursos forestales

La evaluación de los recursos forestales mundiales publicada por la FAO, donde hace mención que en la actualidad el 30% de los bosques del planeta están destinados a la producción de madera y productos forestales no maderables como una producción primaria; el 24 % sin alguna actividad que los predomine, el 12% está destinado a la conservación de la biodiversidad, el 8% su función principal es la protección de suelo y agua, el 4% está reservada a aspectos sociales y el resto a funciones desconocidas (Orozco, 2010).

Uno de los retos ambientales más trascendentales es el manejo de los recursos hídricos ya que se posee un mal manejo de los mismos, causado en gran parte

por la taza alta de deforestación de las selvas y bosques, los cuales son de importancia en la protección de los suelos que incide en la filtración y calidad de agua (Urquijo, 2004).

Una de las principales funciones de los bosques es la producción de madera, la cual a través del tiempo se ha venido modificando con la silvicultura y con métodos de manejo, ahora la sociedad le ha dado un valor de importancia a estos ecosistemas por los beneficios ambientales que generan (Brüschweiler *et al*., 2004).

El deterioro parcial o total de las áreas forestales de captación de agua y de abastecimiento de agua potable por las diversas actividades antropogénicas no reguladas como la tala, esparcimiento, cambio de atractivo estético y el inevitable crecimiento de la población, favorecidos por la falta de programas de ordenamiento territorial en los municipios del estado de Hidalgo, han puesto de manifiesto la disminución de la cantidad y calidad del agua que actualmente consume la población (Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo, 2001).

2.4 Permeabilidad de suelos

Las plantas con su desarrollo extenso y profundo de raíces y la acumulación de hojarasca en los suelos forestales, forman una capa muy rica de materia orgánica, que esta a su vez, conserva una abundante biomasa de especies de invertebrados y pequeños vertebrados, los cuales, junto con otros procesos naturales, actúan en la descomposición gradual de estos residuos orgánicos incrementando la

porosidad del suelo, y por ende la conductividad hidráulica (permeabilidad) del suelo (Geissert, 2012).

De acuerdo con Chaudhari (2013) un suelo ideal debe de tener una buena aireación y agua, con suficientes espacios poros para una fácil penetración del sistema radicular, mientras que las partículas del suelo proporcionarían el apoyo físico y nutrientes para el establecimiento y desarrollo de las plantas. Sin embargo, la cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la factibilidad con la que se puede extraer depende entre otros factores a la porosidad y la permeabilidad (Vélez, 2004).

Así como la vegetación, los suelos son parte fundamental para la captación de agua, Verduzco (1969) menciona que entre mayor perturbación por agentes como los incendios forestales, agricultura, pastoreo, corta de madera irracional, entre otros, es menor la permeabilidad que tienen los suelos. A su vez, la deforestación afecta las características físicas y químicas de los suelos, reduciendo la materia orgánica y la capacidad de infiltración y permeabilidad (Stadtmüller, 1994).

El agua subterránea, es el agua subsuperficial que invade los vacíos que se encuentran en las formaciones geológicas y contribuyen a una de las fases o etapas del ciclo hidrológico; la cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la factibilidad con la que se puede extraer depende entre otros factores a la porosidad y la permeabilidad (Vélez, 2004).

El deterioro parcial o total de las áreas forestales de captación de agua y de abastecimiento de agua potable por las diversas actividades antropogénicas no

reguladas como la tala, esparcimiento, cambio de atractivo estético y el inevitable crecimiento de la población, favorecidos por la falta de programas de ordenamiento territorial en los municipios del estado de Hidalgo, han puesto de manifiesto la disminución de la cantidad y calidad del agua que actualmente consume la población (Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo, 2001).

III.- OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Caracterizar los parámetros físicos e hidrológicos de los suelos en tres áreas sujetas a manejo forestal del Ejido Atopixco, Hgo.

3.2 Objetivos específicos

- Describir los aspectos biofísicos (geología, hidrología, usos del suelo, tipos de suelo, clima y vegetación) de las áreas forestales con diferentes alteraciones.
- Cuantificar las características físicas (densidad aparente, textura y porosidad) de los suelos de las tres áreas estudiadas.
- Determinar la velocidad de infiltración (cm^3/min) en los suelos de las tres áreas de investigación.

IV.- ÁREA DE ESTUDIO

Geográficamente el municipio de Zacualtipán se ubica entre los paralelos 20° 39´ de latitud norte y 98° 39´ de longitud oeste, colinda al norte con el municipio de Tianguistengo y parte del Estado de Veracruz, al sur con el municipio de San Agustín Metzquititlán, al este con el Estado de Veracruz; y al oeste con el municipio de Metztitlán (Figura 1).

Se localiza en la provincia fisiográfica llamada Sierra Madre Oriental, reconocida como sierra alta hidalguense y una pequeña porción en el eje neovolcánico, subprovincia conocida como Carso Huasteco que se caracteriza por presentar terrenos con pendientes pronunciadas, mesetas y cañones, tiene una altitud promedio de 1980 msnm. El municipio se encuentra dentro de la cuenca del río Pánuco y lo atraviesan dos corrientes de agua principales; los ríos Zoyatla y Miniahuaco. El clima es templado frío con una temperatura media anual de 14°C, y una precipitación pluvial de 2,047 milímetros al año, cuenta con un periodo de lluvias en los meses de Mayo a Septiembre (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2010).

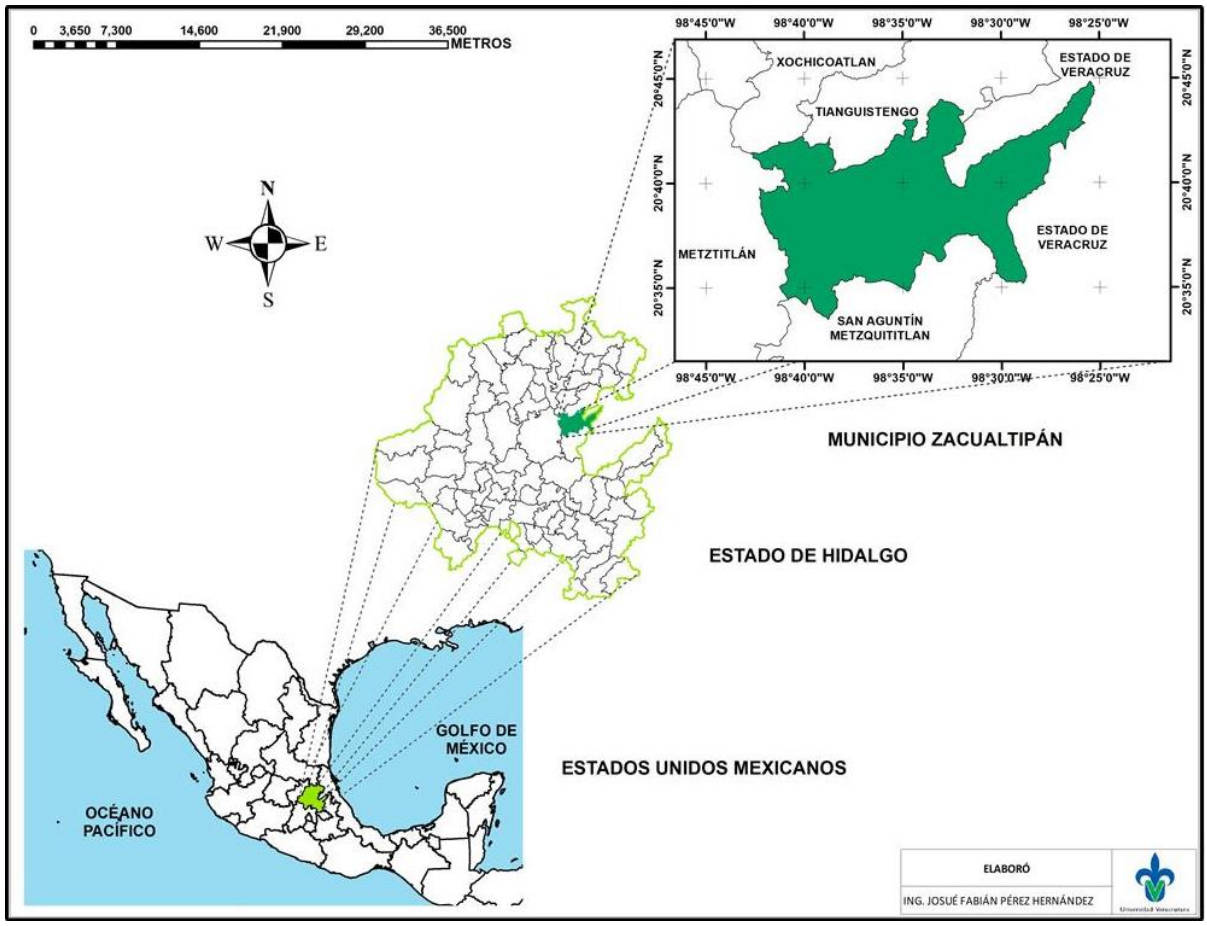


Figura 1. Localización espacial del municipio de Zacualtipán, Hidalgo

Los tipos de vegetación que alberga el municipio están compuestos por; bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque de encino. Por otra parte, la fauna existente se encuentra principalmente en las áreas boscosas la cual está compuesta por diferentes mamíferos, aves, insectos y reptiles (Alcántara, 2001).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (2010), el municipio de Zacualtipán cuenta con aproximadamente 44 localidades, de las cuales las más importantes se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Censo poblacional de localidades del municipio de Zacualtipán, Hidalgo

Nombre de la localidad	Población total
Zacualtipán	23,125
Olonteco	384
Tzincoatlán	459
Jalapa	501
Atopixco	895
San Bernardo	336
La Mojonera	839
Tlahuelompa	1015

Fuente: Gobierno del Estado de Hidalgo (2010).

Esta investigación se realizó en las tierras de uso común del ejido Atopixco, el cual fue decretado por resolución presidencial el 21 de marzo de 1926 y dotado con una superficie de 864.000 hectáreas, a su vez el 21 de diciembre de 1955 se realiza una ampliación a la poligonal por parte del Registro Agrario Nacional (RAN) con una superficie de 285.000 hectáreas, el 09 de diciembre de 1997 se decreta una segunda ampliación a la poligonal de 163.652 hectáreas, para dominio pleno.

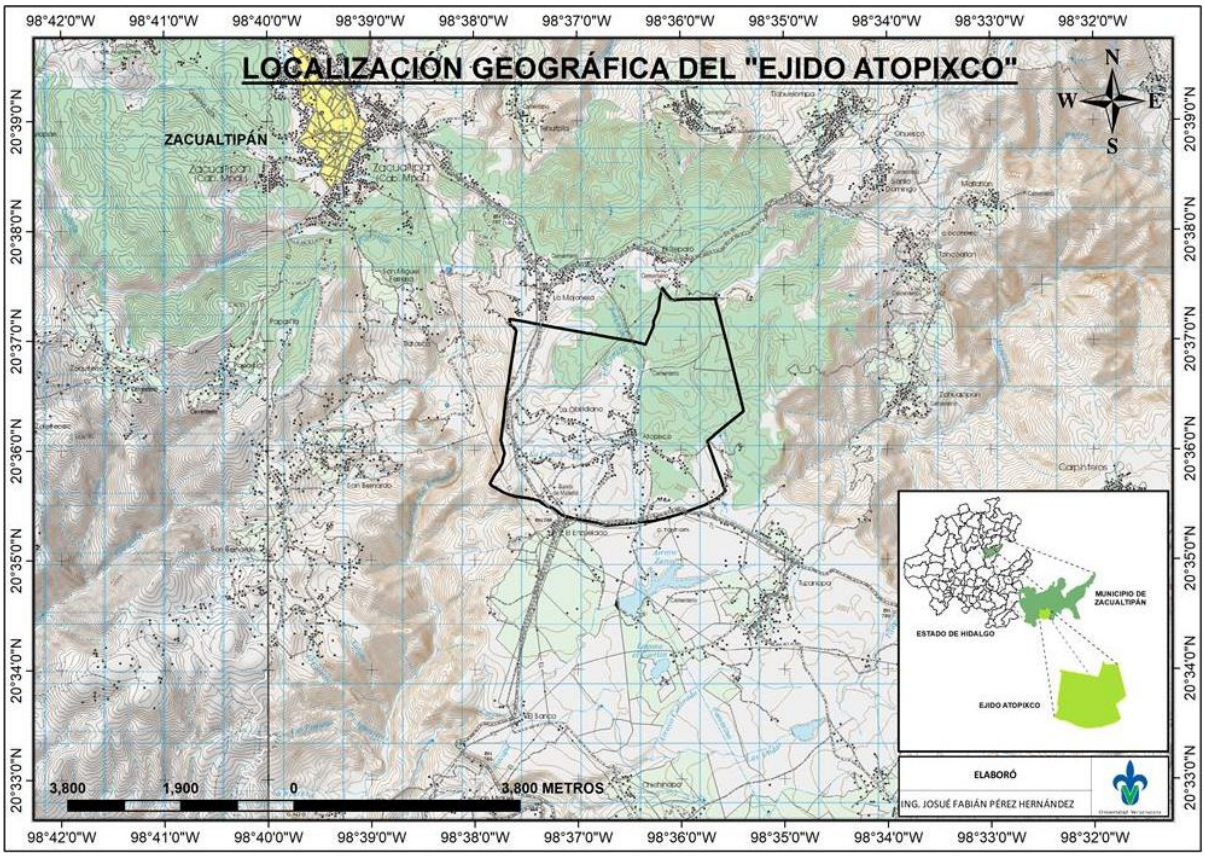


Figura 2. Mapa de localización geográfica del ejido Atopixco, Hidalgo

El Ejido Atopixco se ubica entre las coordenadas 20º 36’ 11’’ de latitud Norte y 98º 36’ 28’’ con una altitud promedio de 2048 msnm, este se incorporó a los aprovechamientos forestales maderables en el año de 1985, a la fecha tiene 32 áreas de regeneración ya establecidas, estando así en su cuarto ciclo de corta, actualmente se ejerce un programa de aprovechamiento forestal maderable autorizado en el 2014 por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), cuenta con una clasificación de superficies para el aprovechamiento forestal maderable como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Clasificación de uso de suelo del ejido Atopixco

Clasificación de superficies	Ha.
Franja protectora de vegetación ribereña (cauces y cuerpos de agua)	103.727
Áreas de producción forestal	658.677
Áreas de otros usos	426.50
Superficie total	**1,188.904**

Fuente: Programa de Manejo Forestal Maderable (2016).

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Determinación de las áreas de estudio

Para los fines de esta investigación se delimitaron las áreas forestales con el uso del software ArcGis 10.3, Global Mapper y Google Earth. Estas fueron clasificadas en función al tiempo de perturbación de su cobertura forestal y de su suelo. Identificándose en el ejido tres áreas: a) Área forestal en conservación (Inalterada), b) Área de aprovechamiento forestal en el año 2016 y c) Área de aprovechamiento forestal en el año de 1998 (figura 3). Esta delimitación se corroboró utilizando cartografía impresa por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los rasgos físicos, biológicos y socioeconómicos del lugar se obtuvieron a partir de la información bibliográfica y análisis de cartas temáticas de la región publicadas por el INEGI, así como por observaciones obtenidas en campo.

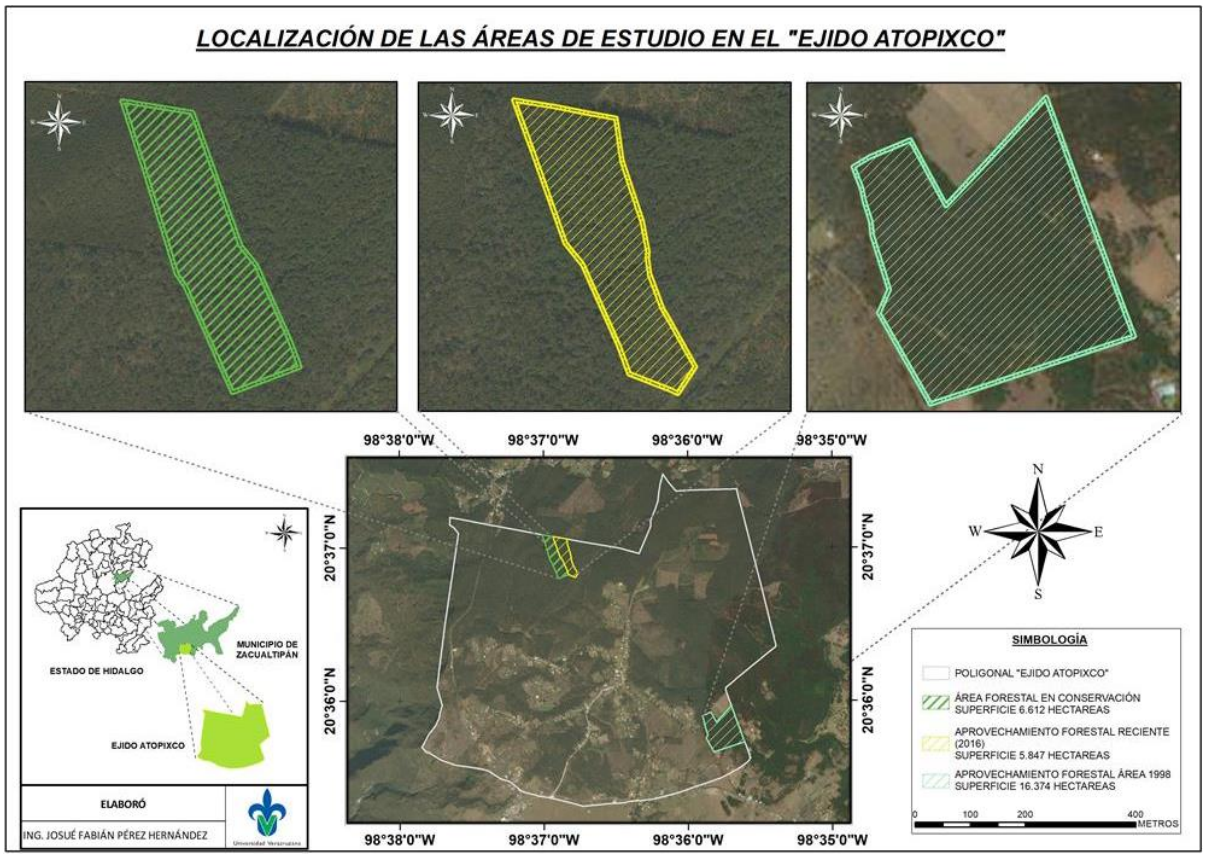


Figura 3. Localización de las tres áreas forestales de estudio del ejido Atopixco

5.2 Aspectos biofísicos

La identificación de los rasgos geológicos de las áreas de estudio, se logró con la utilización de los datos vectoriales de la serie V del INEGI. El procesamiento de la información vectorial se realizó mediante el software ArcGis 10.3 utilizando las herramientas de ArcToolbox (extract, overlay, proximity, etc.), que además permitió comparar la información de la carta impresa Geológica escala 1: 250,000.

De igual forma se identificó la edafología perteneciente al área forestal de estudio, haciendo un análisis de la carta Edafológica F14-D11 Pachuca escala 1: 250,000, cartógrafa impresa por el INEGI y la Síntesis Geográfica del estado de Hidalgo con la finalidad de tener en cuenta los principales tipos de suelos predominantes.

Para conocer el clima del lugar se utilizaron las vectoriales de la serie V del INEGI ubicando la poligonal del ejido dentro del tipo de clima correspondiente con el software ArcGis 10.3 y a su vez corroborando dicha información con la cartografía impresa de la Síntesis del Estado de Hidalgo.

El uso de suelo y vegetación del área forestal de estudio se determinó por medio de la carta F14-D11 Uso de suelo y vegetación Pachuca escala 1:250,000 y por medio del software ArcGis 10.3 y con las vectoriales del INEGI (2014).

El modelo de los escurrimientos temporales principales se obtuvo procesando mediante el uso del modelo digital de elevación F14D72 del estado de Hidalgo, con el software ArcGis 10.3 y sus herramientas en ArcToolbox (Hydrology). Verificando su ubicación de los escurrimientos primarios y secundarios mediante recorridos de campo.

5.3 Selección de las áreas de muestreo

La obtención de los datos se utilizó un muestreo estratificado, el cual se aplicó basándose en recorridos y observaciones de las tres áreas forestales de estudio. El muestreo se realizó utilizando sitios de dimensiones fijas de 1/10 de hectárea (1,000 m^2) levantándose un total de 5 sitios para cada área forestal de estudio por variable de estudio (densidad aparente, Porosidad del suelo, textura he infiltración). Los sitios de muestreo se tomaron en puntos exactos con ayuda del GPS (Razo, 2013).

5.4 Determinación de indicadores físicos e hídricos

La cuantificación de los indicadores físicos de cada una de las áreas seleccionadas anteriormente, se determinó la densidad aparente (gr/cm^3), textura (%), porosidad (%) y perfil del suelo. Así mismo, para determinar el comportamiento hídrico de los suelos se midió la tasa de infiltración (cm^3/min).

5.4.1 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente se eligieron 5 sitios de muestreo por cada área forestal de estudio con un diseño de muestreo sistemático, ya que se tomaron en cuenta las condiciones del lugar, como es la topografía accidentada, exposición y pendiente.

La metodología utilizada para la recolección de datos de densidad aparente se denomina *Open Bag* (USDA, 1999) la cual consistió en lo siguiente:

- ✓ Se utilizó un anillo de 10 cm. de diámetro y 10 cm, de largo con el borde biselado, se marcó el anillo a 5 cm. de altura desde el borde biselado, con la finalidad de tener determinada la profundidad del mismo.
- ✓ Dicho anillo con las características ya señaladas se clavó al suelo sin materia orgánica hasta la marca (con la profundidad ya establecida a 5 cm.), teniendo las precauciones necesarias de la pedregosidad y material vegetal que exista.
- ✓ Se extrajo de la parte interior del anillo el material vegetal, suelo y roca con la ayuda de una navaja y éste se colocó en una criba de abertura cuadrada

(0.5 cm * 0.5 cm.), con la finalidad de separar la vegetación y la roca del suelo. Una vez que se realizó la separación de los materiales, la parte que solo es suelo se introdujo en una bolsa y se etiqueto la muestra para su posterior ocupación en laboratorio.

- ✓ Ya sin material vegetal, suelo y roca en el interior se retiró de manera meticulosa el anillo, dejando la cavidad formada, en la cavidad se colocó una bolsa delgada que se amoldo a la forma del orificio, ya que esta funcionaría como aislante para que no se tuviese una infiltración de agua.
- ✓ Teniendo ya el aislante en la cavidad se le colocó el material vegetal y rocoso del cribado en el interior de la cavidad y se agregó agua con una jeringa de 20 y/o 80 cm^3 con la escala muy clara hasta el nivel del suelo y se tomó la lectura del volumen de agua que se ocupó.

Los siguientes pasos se realizaron en laboratorio.

- ✓ Una vez obtenidas las muestras de suelo se llevaron a laboratorio, donde se les cambio la envoltura y se pesaron en una báscula digital.
- ✓ Posteriormente, se registró su peso en húmedo y después, se llevaron a una estufa marca Griven, donde se secaron durante 48 horas a una temperatura constante de 104°.
- ✓ Después de las 48 horas las muestras fueron retiradas y pesadas nuevamente en la báscula digital, con la finalidad de obtener el peso seco constante
- ✓ Con los pesos obtenidos con anterioridad (peso húmedo y peso seco), se calcularon los siguientes parametros:

Densidad aparente del suelo $\frac{(g)}{cm3}$ = $\frac{peso\ de\ suelo\ seco}{volumen\ del\ suelo}$

Contenido de agua en el suelo (g/g) = $\frac{(peso\ de\ suelo\ húmedo - peso\ de\ suelo\ seco)}{peso\ de\ suelo\ seco}$

Porosidad del suelo (%) = 1 - $\frac{densidad\ aparente\ del\ suelo}{2.65}$

Contenido de agua en volumen $\frac{(g)}{cm3}$ = contenido de agua en el suelo g/g * densidad aparente $\frac{(g)}{cm3}$

Espacios de poros ocupados por agua (%) = $\frac{Contenido\ de\ agua\ en\ vol * 100}{Porosidad\ del\ suelo}$

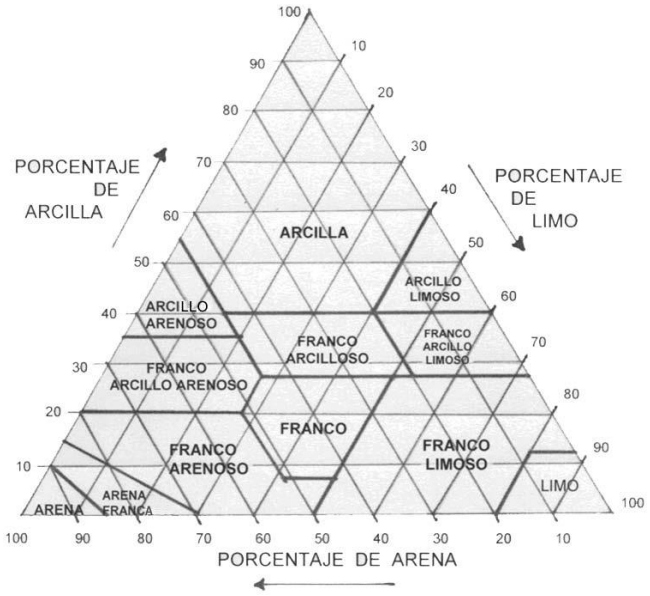
5.4.2 Textura por medio del método de Bouyoucos

Con la finalidad de realizar una muestra compuesta de cada área de estudio, se mezclaron 100 gr de cada uno de las 5 muestras obtenidas en el campo.

A cada muestra compuesta se realizó la metodología de Bouyoucos como se describe a continuación (Medina, 2007).

- ✓ Se pesaron 50 gr de muestra en una balanza analítica y se vertió en un recipiente metálico, se añadieron 200 ml de agua destilada y 100 ml de la solución de hexametafosfato de sodio (HMF 50.0 g/L, como dispersante) y carbonato de sodio (1M 84 g/L, como solución amortiguadora).
- ✓ Posteriormente, se colocó el recipiente metálico en agitador eléctrico durante 5 min con la finalidad de tener una dispersión de las partículas de suelo.

- ✓ En secuencia, se vertió la mezcla en una probeta de 1,000 ml, teniendo la precaución de verter agua destilada con una piseta para no dejar material granulométrico y llenando la probeta hasta los 1,000 ml.
- ✓ A continuación, se midió la temperatura de la mezcla con un termómetro de alta exactitud y se introdujo el hidrómetro de Bouyoucos registrando la lectura (gramos/litro) correspondiente.
- ✓ Al transcurso de dos horas, se registró la temperatura y el parámetro del hidrómetro Bouyoucos.
- ✓ En consecuencia, se calcularon los porcentajes de Arcilla, Limo y Arena con base en la ley de Stokes.
- ✓ Finalmente, con referencia del triángulo de las texturas de suelo (Figura 4) de determino a textura correspondiente.



Fuente: United States Department of Agriculture, (USDA, 1999).

Figura 4. Triangulo de textura de suelo

5.4.3 Infiltración

Para las pruebas de hidrología se utilizó el método de infiltrómetro de doble anillo, en el cual se aplica una lámina de agua a nivel constante y midiendo el descenso de dicha lámina en función del tiempo, hasta que la velocidad sea constante (Zapata y Sierra, 2008).

El método consiste en:

- ✓ El infiltrómetro está compuesto por dos anillos con el borde inferior biselado, el exterior que tiene un diámetro de 35 cm y una altura de 40 cm.
- ✓ Adicionalmente, el anillo interior tiene 20 cm de diámetro y una altura de 35 cm.
- ✓ Posteriormente, la materia orgánica fue retirada de la superficie donde el infiltrómetro iba a ser usado.
- ✓ El anillo exterior fue clavado a 10 cm de profundidad y el interior a 15 cm.
- ✓ Adicionalmente, se procedió a colocar en el anillo interior material vegetal, con la finalidad de brindar un colchón vegetal y amortiguar el golpe del agua que se vertió con una jarra graduada de 2 litros.
- ✓ Se inició la toma de la lectura del nivel de agua del anillo interior con una regla de 30 cm.
- ✓ Finalmente, los datos de la lámina de agua fueron recabados cada minuto y posteriormente cada dos minutos durante dos horas.

Para la obtención de la tasa de infiltración, se utilizaron los datos recabados con anterioridad y se aplicó la fórmula de Kostiakow (Chagoya, 2015):

$$I = atb$$

Dónde:

I= Infiltración acumulada

T= Tiempo acumulado

(*a*) y (*b*)= Parámetros del suelo

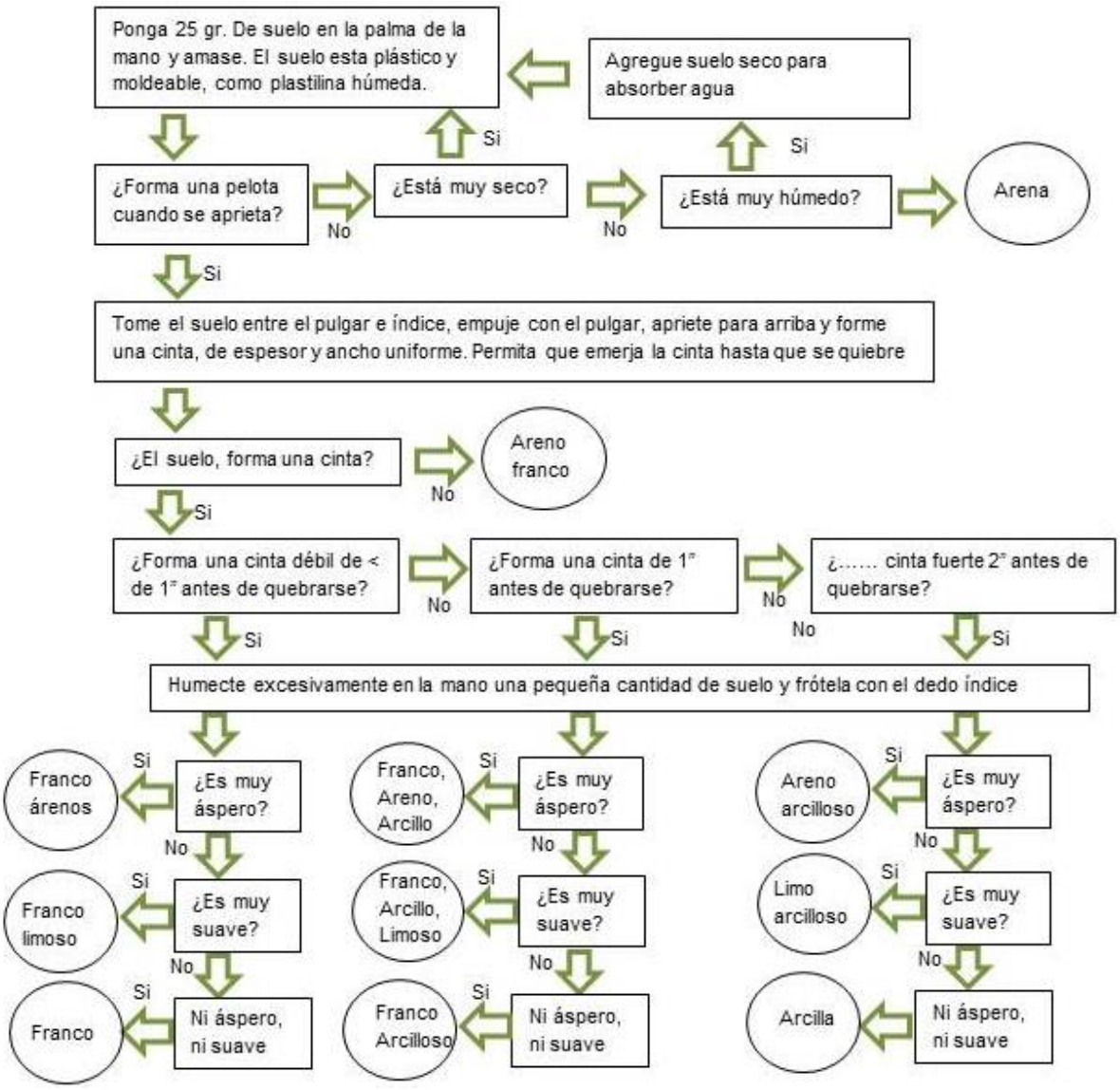
5.4.4 Perfil de suelos

Se realizaron los perfiles del suelo aplicando la metodología de la FAO (2009) con la cual no faltan elementos esenciales o detalles en el perfil, ésta consistió en lo siguiente:

Excavar a una profundidad de 100 cm y/o 150 cm, con la finalidad de determinar los principales horizontes del suelo que conforman el perfil de suelo, permitiendo identificar y medir el ancho con un flexómetro de cada horizonte de suelo. En una bitácora de campo se anotó la fecha del muestreo, el escenario y las medidas de cada horizonte.

5.4.5 Determinación de textura de suelos por tacto

Para establecer la textura de los horizontes del perfil, se aplicó la metodología propuesta por la USDA (1999), la cual se basa en la figura 5.



Fuente: United States Department of Agriculture, (USDA, 1999).

Figura 5. Procedimiento de textura por tacto (USDA, 1999)

5.4.6 Estructura del suelo

Para determinar la forma de los agregados se llevaron a laboratorio muestras de los perfiles de suelo tomadas a 30.0 cm de profundidad, donde se les aplicó la

metodología presentada por FAO (2009). A continuación, se presentan algunas de sus características:

- Estructuras granulares y migajosas*:* son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos, por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos.
- Estructuras en bloques o bloques sub-angulares*:* estas partículas de suelo se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua, suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
- Estructuras prismáticas y columnares: es suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente, normalmente se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
- Estructura laminar: se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra, a menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua, esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla.

Aunado a lo anterior y para determinar los tipos de agregados (peds) de suelo se utilizó la metodología de la USDA (1999), la cual consiste en observar la muestra de suelo *in situ* y reconocer el tipo de estructura.

- Estructura débil: está formada por agregados indistintos apenas visibles, al extraer la muestra de suelo, los materiales se rompen.
- Estructura moderada: agregados bien formados y diferenciados de duración moderada, son evidentes pero indistinto en suelos no alterados, al extraer la muestra de suelo el material se rompe en una mezcla de varios agregados enteros distintos.
- Estructura fuerte: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados, son duraderos y evidentes en suelos no alterados, al extraer la muestra de suelo el material edáfico está integrado principalmente por agregados enteros.

5.5 Análisis de datos

Los datos obtenidos de los parámetros físicos del suelo (densidad aparente y porosidad de suelo) de las tres diferentes áreas de estudio, se analizaron mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) y el test del rango estudentizado de Tukey (HSD), con la finalidad de determinar si existe diferencia significativa estadística. Cabe resaltar, que para el resultado del test de Tukey se consideró que si el estadístico fuera igual o inferior al 5% ($p < 0.05$) tendría significancia, pero si el valor es mayor a $p > 0.05$ no se tendría significancia entre las medias. Finalmente, el proceso de los datos se llevó a cabo mediante el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS).

VI. RESULTADOS

6.1 Aspectos Biofísicos

6.1.1 Clasificación geológica

En primer lugar, se determinó que las áreas forestales de estudio se ubican con características litológicas y estructurales de las rocas que afloran en la provincia del Eje Neovolcánico que cubre gran parte del Estado de Hidalgo. Esto indica que hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, que asociados al volcanismo y relleno de cuencas oceánicas que dieron la estructura a la entidad.

Además, la continuidad de los fenómenos volcánicos durante casi todo el sistema terciario, se manifiestan en la extensión que cubren las rocas ígneas del Eje Neovolcánico, donde se pueden encontrar domos riolíticos, volcanes compuestos, derrames de basalto, conos cineríticos enteros y erosionados.

Finalmente, se determinó que las áreas forestales de estudio se encuentran dentro de la formula geológica *Ts (Ta),* la cual data del periodo Cenozoico, perteneciente a la era del Terciario Superior con una unidad de Toba acida constituida por tobas riolíticas y dacíticas, con algunas interacciones de obsidiana y derrames riolíticos y basálticos, el intemperismo que presentan va de somero a profundo y el fracturamiento de algunos afloramientos es moderado y en otros intenso (Figura 6).

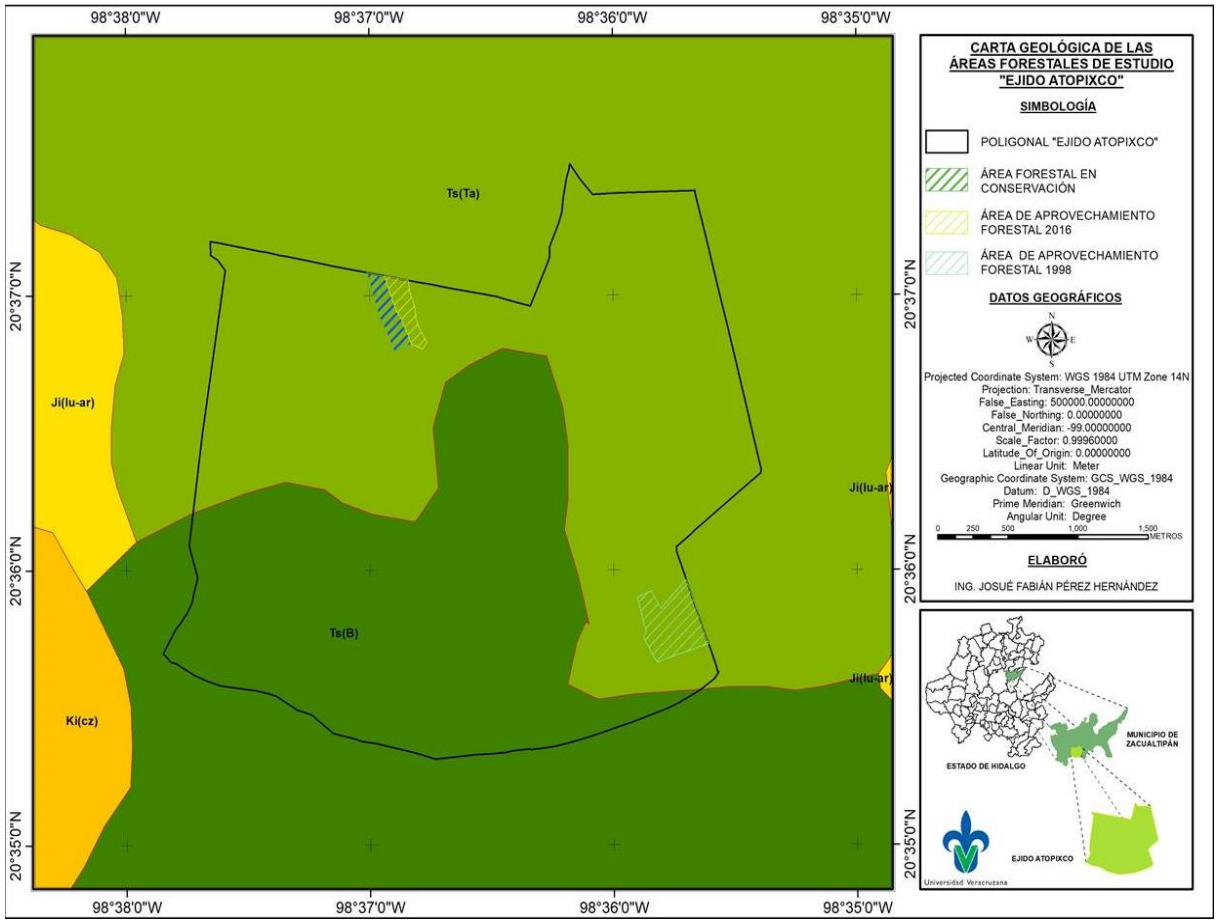


Figura 6. Clasificación geológica de las tres áreas forestales bajo estudio

6.1.2 Clasificación edafológica

El análisis edafológico da como resultado (Figura 7) que las tres áreas forestales de estudio se ubican fisiográficamente en la provincia del Eje Neovolcánico, subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, con un sistema de Topoformas de Lomeríos de colinas redondas, con un suelo predominante *Luvisol crómico*. El cual se torna de color pardo oscuro a rojo poco intenso (rojizo) cuando se encuentra húmedo. Así mismo, se indica que existe un suelo secundario *Feozem haplico* que a su vez, es un suelo con una capa superficial oscura, algo

gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes, con clase textual fina y fase física lítica (INEGI, 1992).

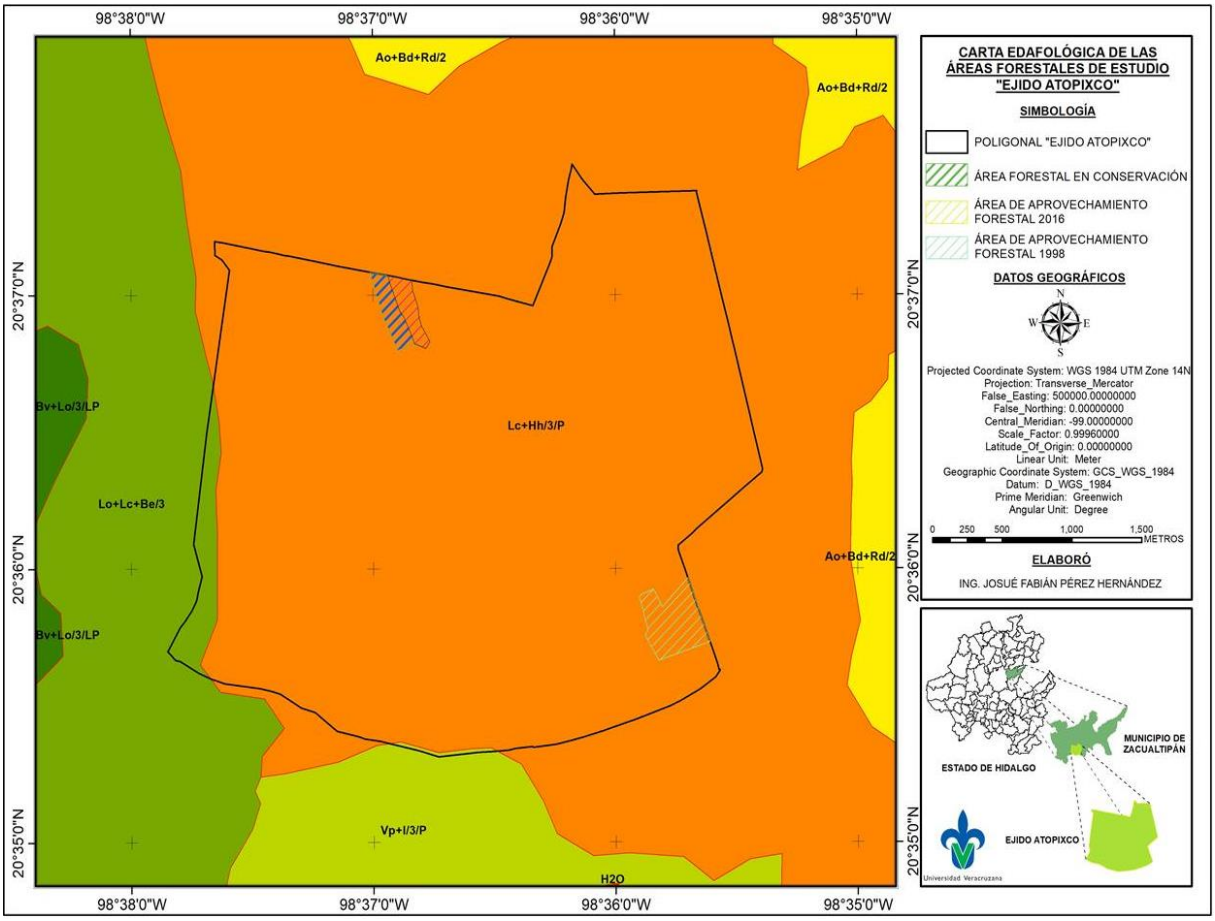


Figura 7. Carta edafológica de las áreas forestales bajo estudio

6.1.3 Tipo de clima

De acuerdo con las coberturas físicas de INEGI y la clasificación climática de Köppen modificada por García, existen dos tipos de climas dentro de la poligonal del ejido Atopixco.

El área forestal de conservación y el área de aprovechamiento forestal 2016 se encuentran en un clima C(m)a, con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 5

mm que se ubica en el grupo de Climas Templados C, subgrupos de climas templados C, Tipos templados húmedos con abundantes lluvias en verano. Sin embargo, el área de aprovechamiento forestal 1998 tiene un clima C(w2)a, el cual tiene un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm, se encuentra en el grupo de Climas Templados C, subgrupos de climas templados C, Tipos templados húmedos con lluvias en verano.

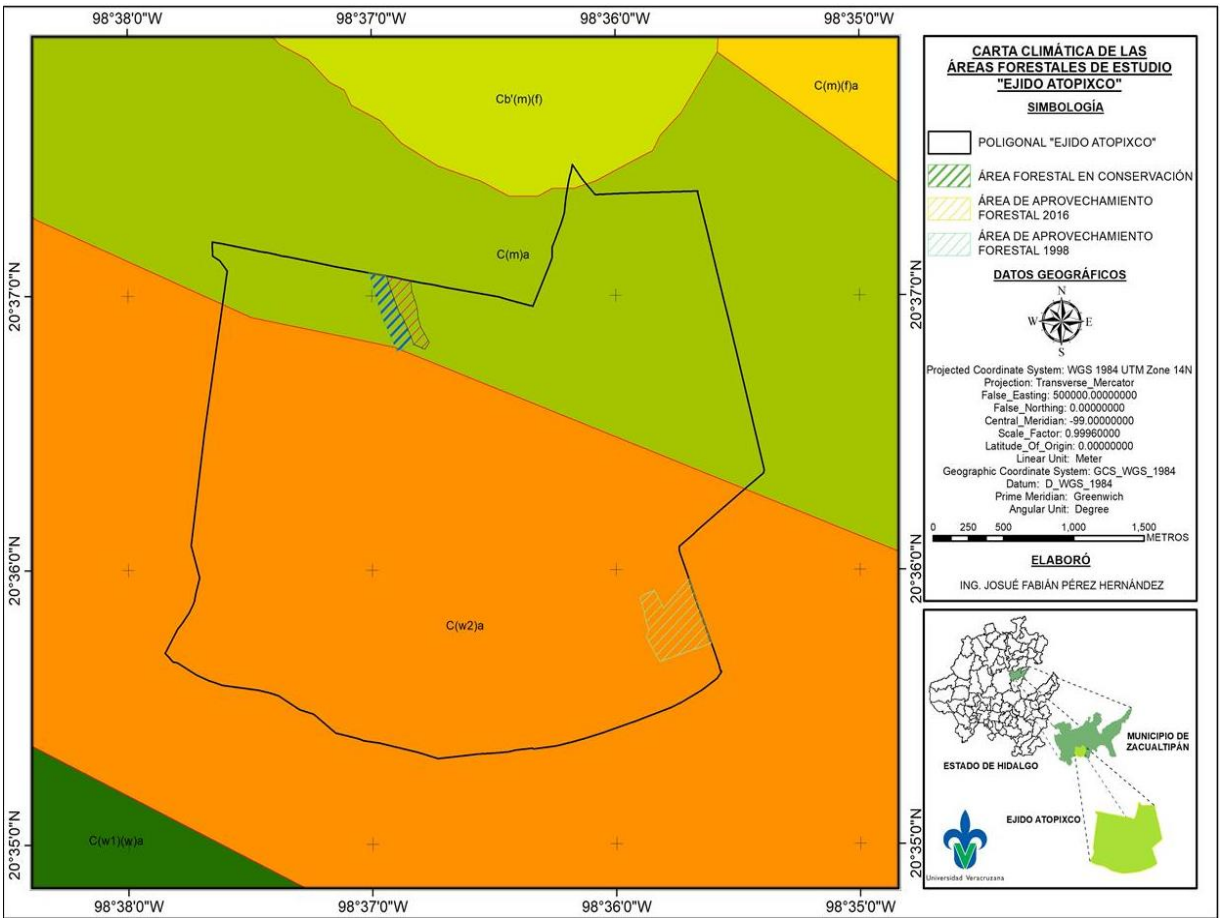


Figura 8. Carta climática de las áreas forestales bajo estudio

6.1.4 Uso de suelo y vegetación

Con el uso de las cartas temáticas del INEGI, se identificó que el área forestal en conservación y el área de aprovechando forestal 2016 se encuentran en el uso de suelo bosque de coníferas y que el área del aprovechamiento 1998 se encuentra en el uso de suelo de vegetación inducida (Figura 9). Sin embargo, cabe comentar que sustentado en los comentarios de los ejidatarios, las áreas de estudio tenían el mismo tipo de estructura vegetal.

Adicionalmente, se identificó en cada uso de suelo el estrato arbóreo, el cual tiene presencia de las siguientes especies (cuadro 3):

Cuadro 3. Estructura arbórea de las áreas forestales de estudio

Área forestal en conservación	
Especie	**Número de individuos (individuos/ha)**
Pinus patula	35
Pinus teocote	12
Quercus rugosa	20
Quercus laurina	16
Quercus laeta	14
Quercus crassifolia	10
Alnus arguta	11
Alnus arguta	10
Cletra mexicana	15
Crataegus pubescens	12
Vaccinium leucanthum	10
Área de aprovechamiento forestal 2016	
Especie	**Número de individuos (individuos/ha)**
Pinus patula	12
Pinus teocote	4

Quercus laurina	1
Quercus laeta	1

Área de aprovechamiento forestal 1998

Especie	Número de individuos (individuos/ha)
Pinus patula	695
Pinus teocote	80
Quercus laurina	650
Quercus laeta	80
Quercus rugosa	30
Vaccinium leucanthum	120
Crataegus pubescens	10

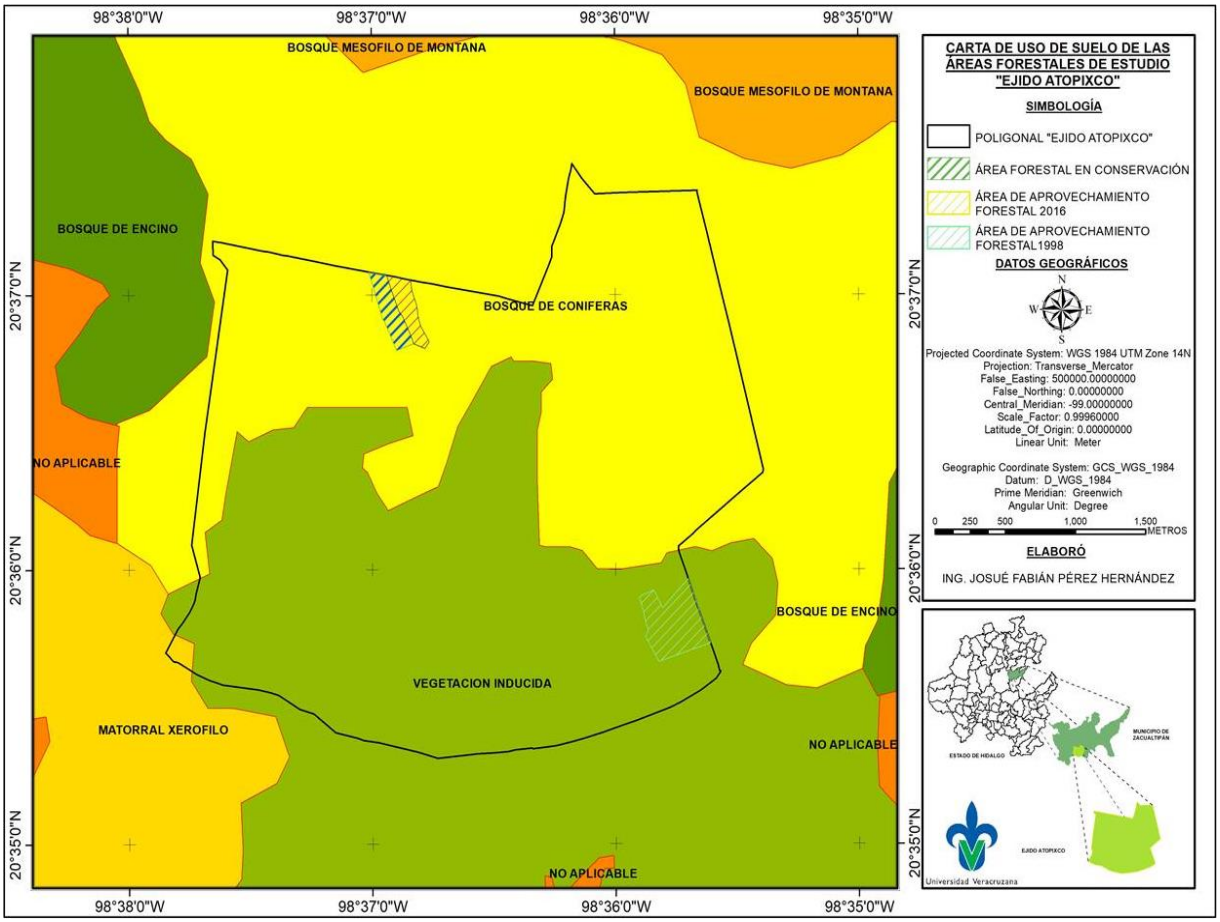


Figura 9. Carta de uso de suelo y vegetación de las áreas forestales bajo estudio

6.1.5 Principales escurrimientos temporales

El área de estudio es tributaria de la cuenca hidrográfica RH-26 Río Pánuco. Así mismo, se identificaron dentro de la poligonal del ejido Atopixco con 12 escurrimientos primarios y una longitud aproximada de 9,410.48 m y 3 escurrimientos secundarios con una longitud de 1,804.83 m (Figura 10).

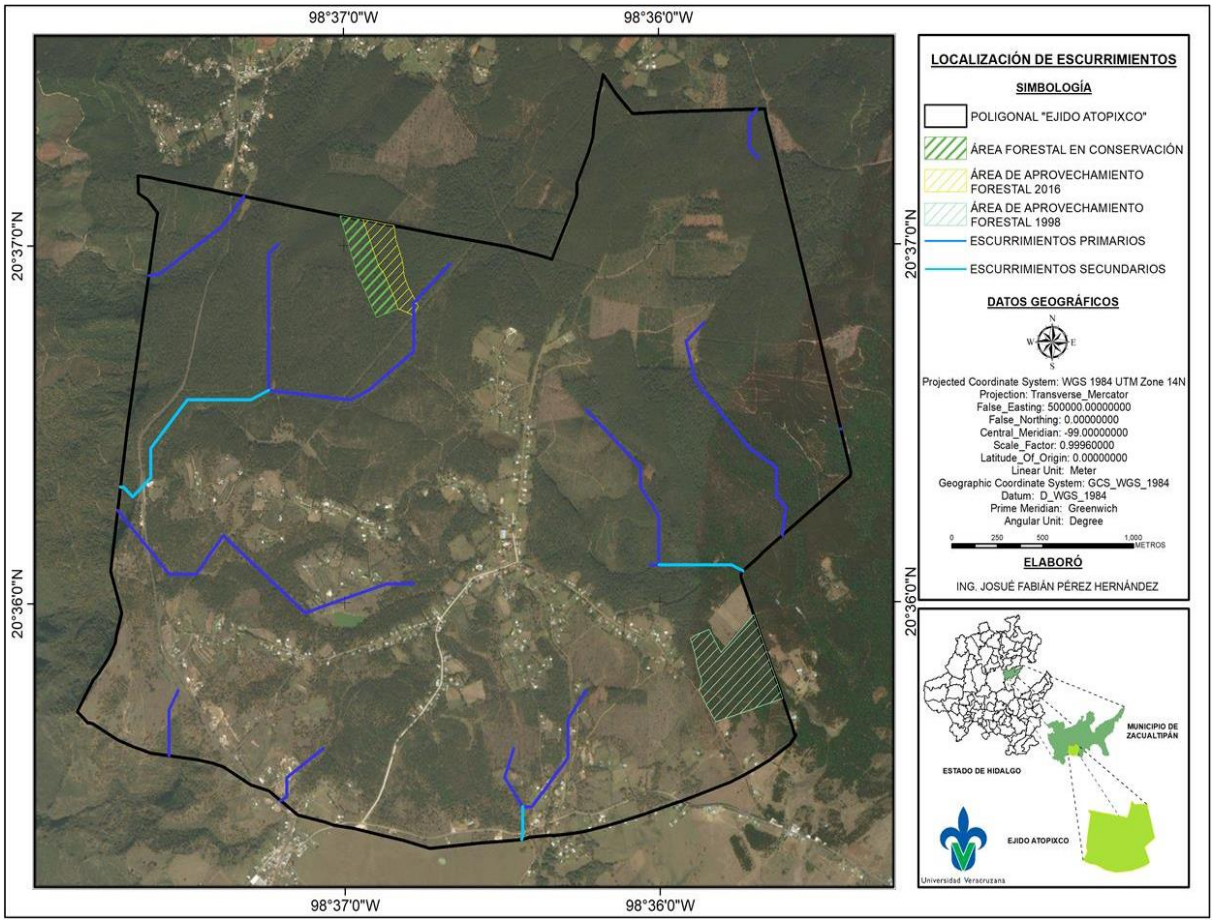


Figura 10. Localización de escurrimientos temporales principales del ejido Atopixco, Hidalgo

6.2 Determinación de indicadores hídricos

6.2.1 Densidad aparente y porosidad del suelo

En el cuadro 4 se presentan los datos de la ubicación geográfica y características topográficas de las áreas de estudio donde se obtuvieron las muestras para la determinación de densidad aparente y porosidad del suelo.

Cuadro 4. Ubicación de muestras (densidad aparente y porosidad del suelo)

Área forestal en conservación					
Sitio	**Altitud (msnm)**	**Pendiente (%)**	**Exposición**	**Coordenadas UTM**	
1	2038	25	E	540265	2279410
2	2207	1	Zenital	540175	2279506
3	2045	7	N-W	540095	2279646
4	2041	5	N-O	540034	2279795
5	2046	48	N-W	540016	2279899
Área de aprovechamiento forestal 2016					
Sitio	**Altitud (msnm)**	**Pendiente (%)**	**Exposición**	**Coordenadas UTM**	
1	2037	13	N-W	540108	2279791
2	2039	1	Zenital	540239	2279708
3	2065	1	Zenital	540202	2279569
4	2044	25	S-E	540265	2279497
5	2026	36	N-E	540310	2279423
Área de aprovechamiento forestal 1998					
Sitio	**Altitud (msnm)**	**Pendiente (%)**	**Exposición**	**Coordenadas UTM**	
1	1991	7	N-E	542188	2277793
2	1966	12	S-E	542288	2277498
3	1990	18	N-E	542114	2277558
4	2014	5	E	541916	2277601
5	2014	8	N-E	541988	2277404

6.2.1.1 Área forestal en conservación

Los resultados promedio obtenidos en esta área fueron: a) densidad aparente de 0.32 gr/cm^3, b) contenido de agua en el suelo de 0.47 gr/gr, c) porosidad de suelo de 0.88%, d) contenido de agua en volumen de 0.14 gr/cm^3 y e) espacios porosos ocupados por el agua de 16.22%. En el cuadro 5 se presenta la información de todas las muestras.

Cuadro 5. Datos de variables por muestra del área forestal en conservación

Área forestal en conservación								
Muestra	**Volumen (ml)**	**Peso húmedo (gr)**	**Peso seco (gr)**	**Densidad aparente (gr/cm^3)**	**Contenido de agua en el suelo (gr/gr)**	**Porosidad del suelo (%)**	**Contenido de agua en volumen (gr/cm^3)**	**Espacios de poros ocupados por el agua (%)**
1	300	145.9	116.9	0.39	0.25	0.85	0.10	11.33
2	320	163.7	117.6	0.37	0.39	0.86	0.14	16.73
3	310	149.9	88.5	0.29	0.69	0.89	0.20	22.20
4	380	183.8	128.7	0.34	0.43	0.87	0.15	16.62
5	304	108.4	68.9	0.23	0.57	0.91	0.13	14.21
	Media			0.32	0.47	0.88	0.14	16.22
	Mínimo			0.23	0.25	0.85	0.10	11.33
	Máximo			0.39	0.69	0.91	0.20	22.20
	Desviación estándar +/-			0.07	0.17	0.02	0.04	4.00

6.2.1.2 Área en aprovechamiento forestal 2016

Los cálculos promedio que se obtuvieron para esta área fueron los siguientes: a) densidad aparente de 0.62 gr/cm^3, b) contenido de agua en el suelo de 0.61 gr/gr, c) porosidad de suelo de 0.77%, d) contenido de agua en volumen de 0.40 gr/cm^3 y e) espacios porosos ocupados por el agua de 56.90%. En el cuadro 6 se da a conocer la información de cada una de las muestras.

Cuadro 6. Datos de variables por muestra del área de aprovechamiento forestal 2016

Área de aprovechamiento forestal 2016								
Muestra	**Volumen (ml)**	**Peso húmedo (gr)**	**Peso seco (gr)**	**Densidad aparente (gr/cm^3)**	**Contenido de agua en el suelo (gr/gr)**	**Porosidad del suelo (%)**	**Contenido de agua en volumen (gr/cm^3)**	**Espacios de poros ocupados por el agua (%)**
1	295	229.5	138.6	0.47	0.66	0.82	0.31	37.45
2	370	307.6	182.3	0.49	0.69	0.81	0.34	41.60
3	190	355.7	201.9	1.06	0.76	0.60	0.81	135.14
4	200	229.4	150.2	0.75	0.53	0.72	0.40	55.26
5	220	102.4	73.5	0.33	0.39	0.87	0.13	15.03
	Media			0.62	0.61	0.77	0.40	56.90
	Mínimo			0.33	0.39	0.60	0.13	15.03
	Máximo			1.06	0.76	0.87	0.81	135.14
	Desviación estándar +/-			0.29	0.15	0.11	0.25	46.07

6.2.1.3 Área de aprovechamiento forestal 1998

Los cálculos promedio para esta área son los siguientes: a) densidad aparente 0.54 gr/cm^3, b) contenido de agua en el suelo de 0.60 gr/gr, c) porosidad del suelo de 0.80%, d) contenido de agua en volumen de 0.32 gr/cm^3 y e) espacios porosos de 40.82%. En el cuadro 7 se presenta la información de todas las muestras.

Cuadro 7. Datos de variables por muestra del área de aprovechamiento forestal 1998

Área de aprovechamiento forestal 1998								
Muestra	**Volumen (ml)**	**Peso húmedo (gr)**	**Peso seco (gr)**	**Densidad aparente (gr/cm^3)**	**Contenido de agua en el suelo (gr/gr)**	**Porosidad del suelo (%)**	**Contenido de agua en volumen (gr/cm^3)**	**Espacios de poros ocupados por el agua (%)**
1	277	276.5	186.2	0.67	0.48	0.75	0.33	43.68
2	256	261.9	149.5	0.58	0.75	0.78	0.44	56.32
3	170	121.0	74.5	0.44	0.62	0.83	0.27	32.77
4	310	155.0	96	0.31	0.61	0.88	0.19	21.55
5	204	214.1	138.6	0.68	0.54	0.74	0.37	49.77
	Media			0.54	0.60	0.80	0.32	40.82
	Mínimo			0.31	0.48	0.74	0.19	21.55
	Máximo			0.68	0.75	0.88	0.44	56.32
	Desviación estándar +/-			0.16	0.10	0.06	0.09	13.82

Con los cálculos promedio generados para densidad aparente y porosidad del suelo, se generaron gráficos con la finalidad de comparar el comportamiento de las variables en las áreas de investigación, tal como se observa en las figuras 11 y 12.

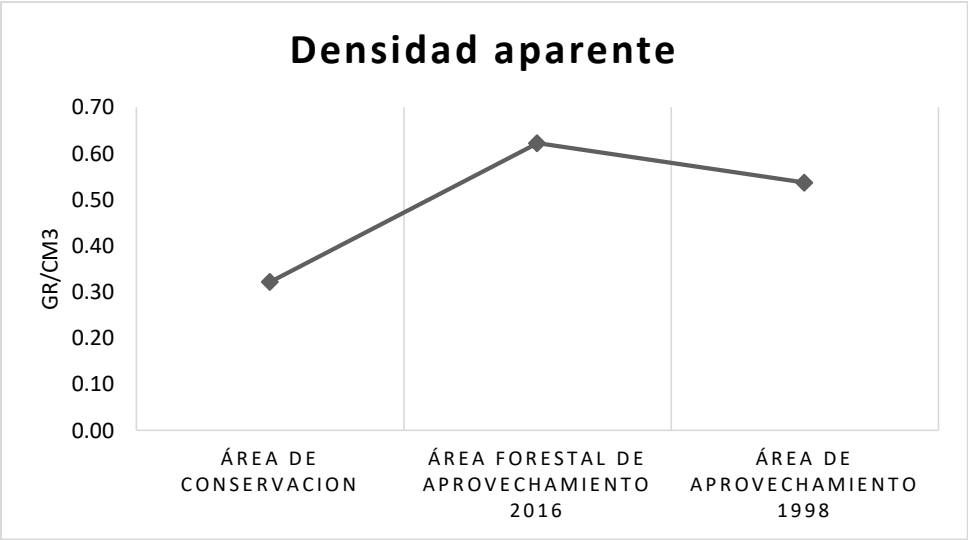


Figura 11. Densidad aparente de las tres áreas forestales de estudio

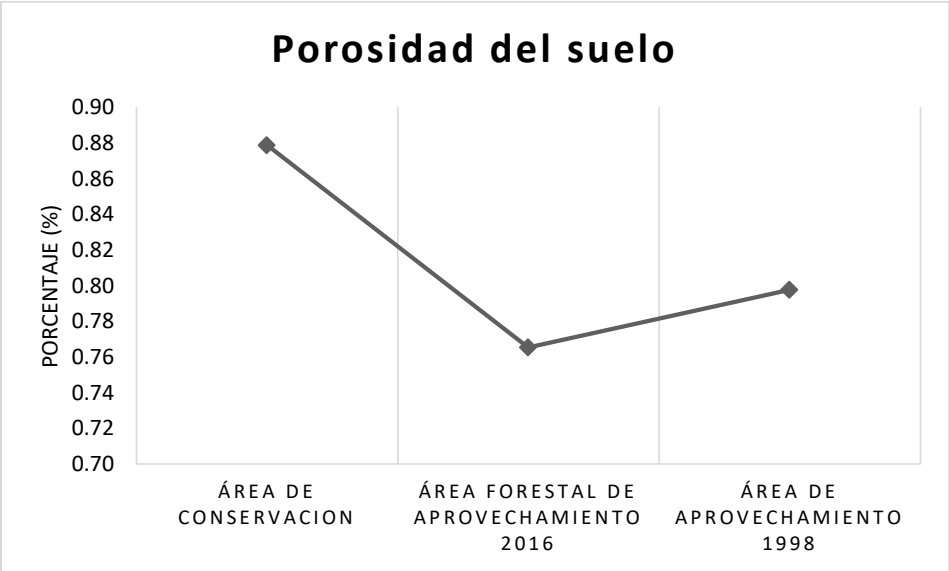


Figura 12. Porosidad de suelo de las tres áreas forestales de estudio

Los resultados estadísticos indican que para densidad aparente el valor de *F* es igual 3.17 con un valor de *P* de 0.0783. Para el caso de la porosidad del suelo el valor de *F* es de 3.17, con un valor de *P* de 0.0783 por lo que se considera que

entre los tres tratamientos con las dos variables, no se encuentra alguna diferencia estadística significativa.

6.2.2 Determinación de textura por el Método de Bouyoucos

Con la clasificación granulometría de las partículas de suelo para la determinación de textura de las áreas forestales de estudio, se obtuvo la siguiente información (cuadro 8):

Cuadro 8. Determinación de textura

Escenario	Granulometría (%)			Clase textual
	Arcilla	Limo	Arena	
Área forestal de conservación	9.44	17.28	73.28	Franco-Arenoso
Área de aprovechamiento forestal 2016	11.44	28.56	60.00	Franco-Arenoso
Área de aprovechamiento forestal 1998	17.44	24.56	58.00	Franco-Arenoso

6.2.3 Infiltración

Los datos de capacidad de infiltración promedio calculados para de las tres áreas forestales de estudio se muestran en el siguiente (cuadro 9):

Cuadro 9. Capacidad de infiltración (cm/min) en las áreas forestales de estudio

Áreas de estudio	**Capacidad de infiltración (cm/min)**
Área forestal en conservación	2.674
Área de aprovechamiento forestal 2016	0.893
Área de aprovechamiento forestal 1998	0.656

El comportamiento de la capacidad de infiltración promedio (cm/min) para cada área forestal de estudio se observa en las siguientes figuras (13, 14 y 15).

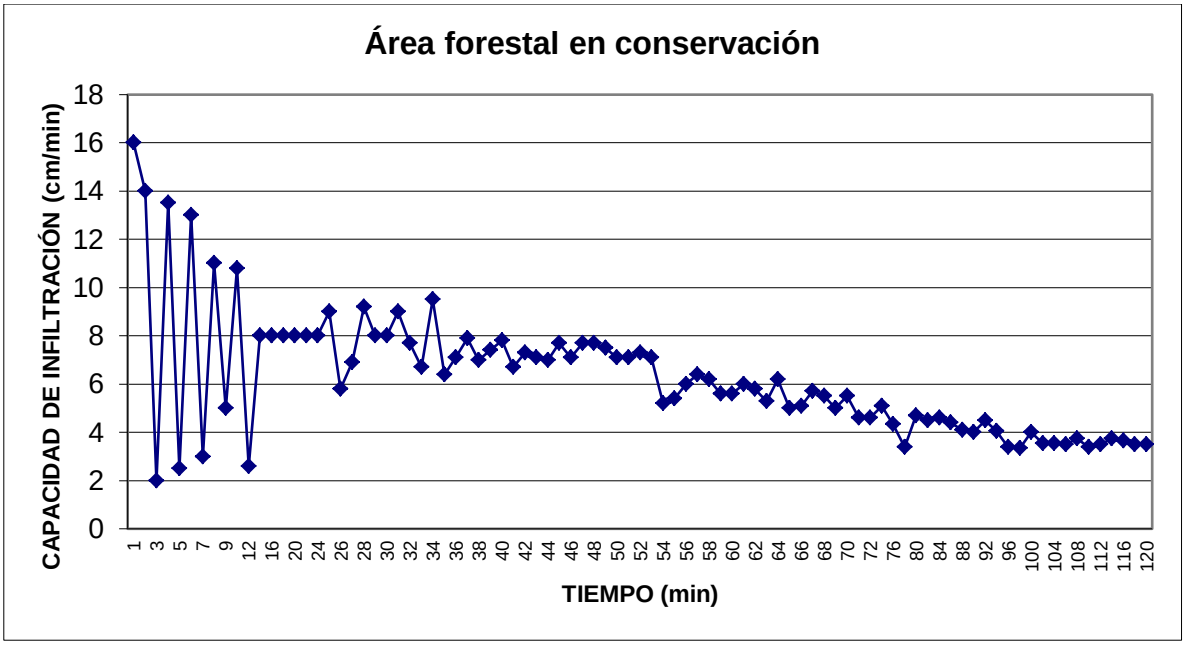


Figura 13. Capacidad de infiltración (cm/min) del área forestal en conservación

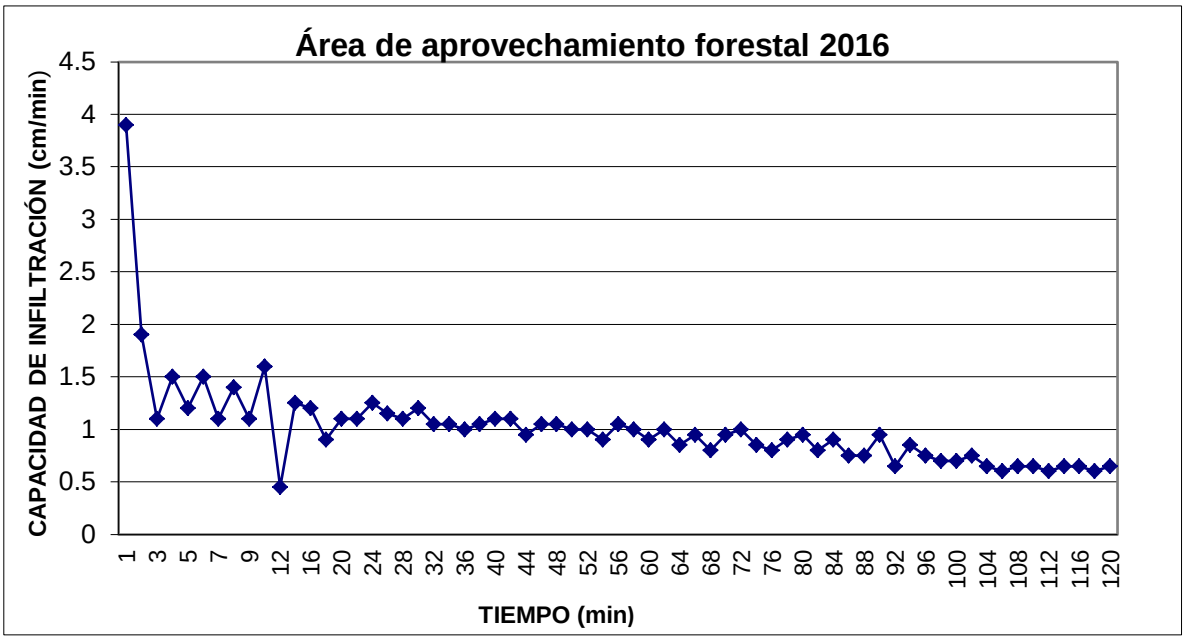


Figura 14. Capacidad de infiltración (cm/min) del área de aprovechamiento forestal 2016

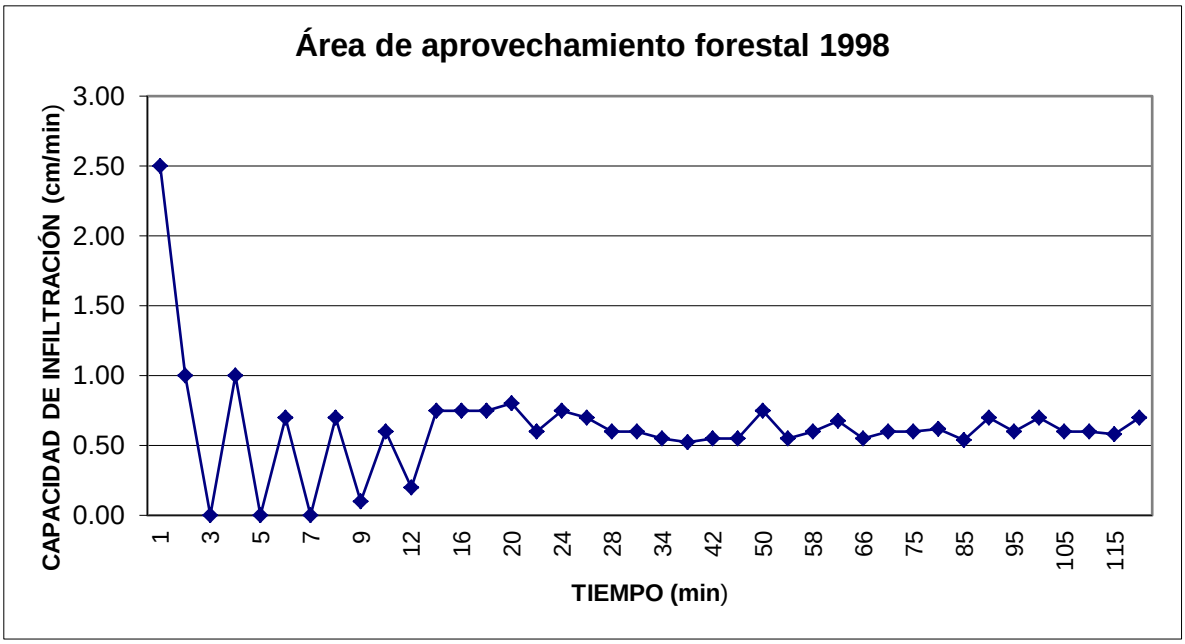


Figura 15. Capacidad de infiltración (cm/min) del área de aprovechamiento forestal 1998

6.2.4 Perfil de suelos

La información de los perfiles de suelo en las áreas forestales de investigación se presenta en los siguientes cuadros:

Cuadro 10. Características generales de los sitios de muestreo

Perfil de suelo	Coordenadas		Altitud (msnm)	Pendiente (%)	Exposición
	X	Y			
Área forestal en conservación	540047	2279793	2055	5	N-W
Área de aprovechamiento forestal 2016	540198	2279569	2066	1	Zenital
Área de aprovechamiento forestal 1998	542114	2277558	1990	18	N-E

Cuadro 11. Horizontes de suelo y su caracterización

Perfil de suelo	Horizonte	Altura del horizonte (cm)	Textura por tacto
Área en conservación	M.O.	5	--
	Humus	4.5	--
	1	18	Franco-Arenoso
	2	74	Limo-Arcilloso
Área de aprovechamiento	M.O.	5	--
	Humus	5	--

forestal 2016	1	7	Franco-arenoso
	2	60	Limo-arcilloso
	3	28	Limo-arcilloso
Área de aprovechamiento forestal 1998	M.O.	6	----
	Humus	5	----
	1	13	Franco-arenoso
	2	42	Limo-arcilloso
	3	34	Limo-arcilloso

La información generada de los perfiles de suelo, describe la similitud de la conformación y estructura del suelo de las áreas forestales de estudio.

6.2.5 Estructura del suelo

Se determinó la estructura del suelo y agregados del suelo (peds) en campo, los resultados se aprecian en el cuadro 12:

Cuadro 12. Tipos de estructura y agregados en los suelos

Escenario	Estructura	Agregados
Área forestal en conservación	Granular	Moderado
Área de aprovechamiento forestal 2016	Granular	Moderado
Área de aprovechamiento forestal 1998	Granular	Moderado

Con la información se identificaron en las áreas forestales de estudio estructuras granulares, ya que se observaron partículas humosas, redondeadas y porosas, con una estructura moderada, teniendo agregados bien formados y diferenciados.

VII. DISCUSIÓN

7.1 Aspectos biofísicos de las áreas de estudio

En cuanto al análisis geofísico, se obtuvo que a partir de la caracterización de las vectoriales que se encuentran en las áreas forestales de estudio, se observaron bajo un mismo orden los siguientes componentes: a) geológico (Periodo Cenozoico, era Terciario superior con unidad de Toba ácida), b) edafológico (Suelo predominante *Luvisol cromico* y suelo secundario *Feozem haplico*), c) climático (grupo de climas templados “C” y Subgrupos de climas templados “C”) y d) usos de suelo y vegetación (vegetación inducida). Los cuales están en concordancia con estudios realizados en la misma zona por Hidalgo-COCYTEH (2009) y Cruz-Leyva (2010). Además, con el uso de los SIG se determinaron 12 escurrimientos primarios o “nacientes” en el ejido Atopixco. Los cuales, por sus características geomorfológicas e hidrológicas, hacen que este Ejido este localizado en una cabecera de cuenca y lo cual concuerda con la definición de Gutiérrez-Huamán (2014) la cual menciona que: “*La cabecera de cuenca es una zona situada en la cuenca alta donde se originan ríos y quebradas, en la que generalmente se encuentras zonas de recarga hídrica*”.

7.2 Comportamiento de la densidad aparente, porosidad y textura de las áreas forestales de estudio.

Se observa que existe menor densidad aparente en el uso de suelo en conservación, en comparación con el área de aprovechamiento forestal 1998 y el área de aprovechamiento 2016 (0.32, 0.54 y 0.62 gr/cm^3, respectivamente). Así mismo, la media de la porosidad de suelo en las tres áreas forestales de estudio, tiene un comportamiento inverso a la densidad aparente (0.88, 0.80 y 0.77 %, respectivamente). Los resultados anteriores son similares a lo que menciona Quirós (1995), Ríos (2006) y Blanco-Sepúlveda (2009). Cabe resaltar, que la similitud de los datos en las áreas forestales de estudio (densidad aparente, porosidad y textura) muestran que dichas variables están influenciadas directamente por el material parental, minerales disponibles y cantidad de materia orgánica en el suelo. Lo cual coincide con los resultados encontrados por Chaudhari (2013) en un estudio realizado en Coimbatore, India. Como también pueden estar influenciados por la biodiversidad biológica (biomasa microbiana) en los suelos (Bautista, 2004).

7.3 Velocidad de infiltración en las áreas forestales de estudio.

El comportamiento de la capacidad de infiltración del área forestal en conservación fue superior al de las áreas de aprovechamiento forestal 2016 y área de aprovechamiento forestal 1998 (2.674, 0.893 y 0.656 cm/min, respectivamente), se puede suponer a que este parámetro hídrico es sensible en las etapas de regeneración de un bosque, lo cual afecta la permeabilidad del suelo. Dicha

variabilidad está en sincronía con lo señalado por Zimmermann y colaboradores (2006). Cabe resaltar, que todas las áreas forestales bajo estudio mostraron una gran capacidad de infiltración, la cual depende principalmente de las características del suelo (Ríos, 2006), encontrándose en todas un punto de permeabilidad estable (Da-Huang *et al*., 2017), esto se puede deber a que cuentan con características de suelo similares como estructura uniforme, similitud en la cantidad de materia orgánica y textura. Lo que concuerda con los resultados encontrados por Bodhinayake (2004).

Por otra parte, la cobertura vegetal que se encuentra en el área de conservación, área de aprovechamiento forestal 1998 y área de aprovechamiento forestal 2016 (165, 1,665 y 18 árboles/ha, respectivamente), posiblemente influyeron en comportamiento hídrico de los suelos, ya que según un estudio de Suárez (2013) menciona que la remoción de la vegetación puede reducir hasta un 80% la tasa de infiltración. Adicionalmente, la vegetación desempeña una función importante dentro del suelo, ya que el sistema radicular que penetra al mismo sirve como rutas preferenciales hídricas (Brechelt, 2004). Por otra parte, la biodiversidad implícita en el suelo como: bacterias, hongos, nematodos, roedores, lombrices, anélidos y artrópodos (Bautista, 2004), tienden a incrementan la conductividad hídrica en el suelo (Brechelt, 2004).

7.4 Perfiles de suelo

Los resultados de los perfiles de suelo en las áreas de estudio, demuestran que tienen una buena estructura (granular) y agregados bien definidos (moderados);

los cuales, permiten tener espacios porosos que permiten un mayor flujo de aire, agua y nutrientes. Lo anterior es concordante con lo mencionado por Meza (2003).

Preguntas de Investigación

Con base en la información generada en el presente trabajo, surgen preguntas como resultado del comportamiento hídrico de los suelos de las áreas forestales bajo estudio; las cuales, pueden dar pauta a nuevas investigaciones en esta área. Por ejemplo:

a) ¿Cuáles son las características biofísicas y químicas de un suelo antes de ser sometido a un aprovechamiento forestal?

b) ¿Cuál es el efecto inmediato de un aprovechamiento forestal en las características biofísicas y químicas del suelo?

c) ¿Cuál es el horizonte de tiempo que un suelo afectado por una actividad de aprovechamiento forestal, necesita para recupera sus características previas al aprovechamiento?

d) ¿Qué otros factores pueden influenciar en la recuperación de un suelo posterior a un aprovechamiento forestal?

VIII. CONCLUSIONES

- El análisis con el uso de los SIG indican que las condiciones geológicas, edafológicas, climáticas y de usos de suelo, son similares en los tres escenarios de investigación.

- Los resultados de las pruebas de densidad aparente y porosidad en las tres áreas forestales de estudio no presentaron diferencia estadística significativa.
- En los tres usos de suelo la capacidad de infiltración de los suelos es muy buena; sin embargo, en el área forestal de conservación fue mayor, en comparación con el área de aprovechamiento forestal 2016 y área de aprovechamiento forestal 1998.
- La tasa de infiltración está influenciada por las propiedades físico-químicas del suelo.
- Las tres áreas forestales de estudio cuentan con suelos con buena estructura y agregados bien definidos.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Alcántara, A. O.; Luna, V. I. 2001. Análisis florístico de dos áreas con bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, México: Eloxochitlán y Tlahuelompa. Acta Botánica Mexicana, (54):51-87.

Bautista, C. A.; Etchevers, B. J.; del Castillo, R. F.; Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Revista ecosistemas, 13 (2):90-97.

Besteiro, S. 2014. Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura Pampeana. Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 264 p.

Bergkamp, G.; Orlando, B.; Burton, I. 2003. Change: adaptation of water resources management to climate change. IUCN. The World Conservation Union, Gland, Switzerland and Cambridge. UK. 53 p.

Bodhinayake, W.; Cheng, S. B.; Noborio, K. 2004. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers. Vadose Zone Journal. 3 (3):964-970.

Blanco-Sepúlveda, R. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. Agrociencia. 43 (3):231-239.

Bishop, T. J. 1999. Valuing forests: A review of methods and applications in developing countries. Environmental Economics Program International Institute for Environment and Development (IIED). Londres Inglaterra. 56 p.

Brüschweiler, S.; Höggel, U.; Kläy, A. 2004. Los bosques y el agua: interrelaciones y su manejo. Centro de Desarrollo y Medio Ambiente (CDMA). Geographica Bernensia. Berna, Suiza. 50 p.

Calder, I.; Hofer, T.; Vermont, S.; Warren. P. 2007. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. Unasylva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. (229):3-10.

Castelán, C. J. E. 2000. Análisis y perspectiva del recurso hídrico en México. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México. 132 p.

Cotler, H.; Priego, A. 2004. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. pp. 63-74. El Manejo Integral de Cuencas en México: Estudios y reflexiones para oriental la política ambiental. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología México.

Cruz–Leyva, I. A.; Valdez–Lazalde, J. R.; Ángeles–Pérez, G.; de los Santos–Posadas, H. M. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. Madera y Bosques. 16 (3):75–97.

Cruz, F. 2016. Programa de Manejo Forestal Maderable Nivel Avanzado del Ejido Atopixco, Municipio de Zacualtipán, Hidalgo. 117 p.

Daily, G. C. 1997. Nature's Services, Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press (ed.). Washington, DC. USA. 392 p.

Diario Oficial del Estado de Hidalgo. 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial. Estado de Hidalgo. Periódico Oficial (2 de abril de 2001) No. 14. Gobierno del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo. 473 p.

Donovan, D. G. 2007. El agua, los bosques y el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Unasylva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. (229):62-63.

Chagoya, F. J. L.; Mallén, R. C.; McDonald, M. A.; Jiménez, O. F.; Ibrahim, A. M.; Velázquez, F. L.; Becerra, L. F. 2015. Información hidrológica, primer paso para diseñar una política local de pago por servicios ambientales. Revista mexicana de ciencias forestales, 6 (29):24-43.

Chaudhari, P. R.; Ahire, D. V.; Ahire, V. D.; Chkravarty, M.; Maity, S. 2013. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. International Journal of Scientific and Research Publications. 3 (2):1-8.

FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 111 p.

FAO, M. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal (Informe general). FRA2010/041. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 346 p.

Gobierno del Estado de Hidalgo. 2010, Enciclopedia de los Municipios de Hidalgo, Zacualtipán de Ángeles.

Geissert, K. D.; Gómez-Tagle, Ch. A.; Gómez-Tagle, R. A.; Guevara, S. M. 2012. Funciones ecohidrólogicas del suelo y su importancia para la conservación y el desarrollo. CONABIO. Biodiversitas. (105):10-12.

Greenpeace Argentina (en línea). 2011. Agua. [Fecha de consulta: 05 enero 2016]. http://www.greenpeace.org/argentina/es/campanas/contaminacion/agua/.

Gutiérrez-Huamán, N. 2014. Delimitación de la cabecera de cuenca del río Piura. Tesis de Maestría en ingeniería Civil. Universidad de Piura, Perú. 86 p.

Hamilton, L. S.; Dudley, N.; Greminger, G.; Hassan, N.; Lamb, D.; Stolton, S.; Tognetti, S. 2009. Los bosques y el agua. Estudio temático elaborado en el ámbito de la evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Estudio FAO Montes 155, Roma. 101 p.

Hidalgo-COCYTEH. 2009. Estudio previo justificativo del área de protección de los recursos naturales del bosque mesófilo de montaña del estado de hidalgo. 195 p.

Huang, D.; Hu, X.; LI, Z.; Zhang, W. 2017. Analysis of Permeability for Different Soil Types in Chongqing. Destech Transactions on Environment, Energy and Earth Science, ICESEE. 69-73.

Medina, G. H.; García, C. J.; Núñez, A. D. 2007. El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 16 (3):19-24.

Meza, P. E.; Geissert, K. D. 2003. Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre de Perote, Veracruz, México. Foresta Veracruzana. 5 (2):57-60.

Orozco, G. R.; Palafox, R. R.; Ponce, D. E. S. D.; De Jong, B. H. J.; Olguín, A. M. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional México. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 98 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) [en línea]. 2011. Los bosques son indispensables para un suministro de agua de calidad. [Fecha de consulta: 05 enero 2016]. Disponible en <http://www.fao.org/news/story/es/item/53463/icode/>.

Vélez, O. M. V.; Vásquez, A. L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga de acuíferos. Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología, Medellín, Colombia. 20 p.

Oyarzún, C. E.; 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. Bosque (Valdivia). 32 (1):10-19.

Pearce, D. W. 2001. The economic value of forest ecosystems. Ecosystem health. University College London, UK 7 (4):284-296.

Quirós, D.; Campos, J. J.; Carrera, F.; Beek, R.; Castañeda, F.; Bertsch, F.; García, J. 1996. Experiencias del CATIE en el desarrollo de sistemas de aprovechamiento forestal de bajo impacto. Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. Congreso Nacional de Fitopatología. Congreso Nacional de Suelos San José. Costa Rica. 147-154.

Razo, Z. R. 2013. Gestión integral ambiental del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Tesis de doctorado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 126 p.

Ríos, R. N. 2006. Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis de Maestría. Centro Agronómico tropical de investigación y Enseñanza. 116 p.

Suárez, R. E.; Arcos, E.; Moreno, C.; Encalada, A. C.; Álvarez, M. 2013. Influence of vegetation types and ground cover on soil water infiltration capacity in a high-altitude Páramo ecosystem. Avances en ciencias e ingenierías. 5 (1):14-21.

Stadtmüller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo: una revisión bibliográfica. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico tropical de investigación y Enseñanza. 62 p.

Torres, P.; Cruz, C. H.; Patiño, P. J. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 8 (15):79-94.

Toledo, T. 2009. El bosque de niebla. Biodiversitas. 83:2-6.

Turnbull, L.; Wainwright, J.; Brazier, R. E. 2010. Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. Hydrological Processes. 24 (4):393-414.

United States Department of Agriculture (USDA). 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 88 p.

Urquijo, J. 2004. Seguridad alimentaria y desarrollo sostenible en zonas marginadas de Guatemala: El papel de los bosques en la lucha contra la pobreza y la inseguridad alimentaria. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España. 88 p.

Verduzco, G. J. 1969. Algunas observaciones sobre suelos forestales degradados en México. Instituto Internacional de Ciencias Agricolas de la OEA. Centro Tropical de Investigación y Enseñanza Gradual. Turrialba, Costa Rica. 111 p.

Zapata-Sierra. A.; Manzano-Agugliaro F. 2008. Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo. Agrociencia. 42 (7):835-845.

Zavaleta, H. E.; Cruz-Jiménez, H.; Márquez, R. J. 2012. Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. Foresta Veracruzana. 14 (1):23-28.

Zimmermann, B.; Elsenbeer, H.; De Morales, J. M. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. Forest Ecology and Management. 222 (1):29-38.