



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---



**Facultad de Ingeniería Química**

**“Hidrología de los suelos forestales del  
Parque Nacional Malinche y su importancia  
como servicio ambiental”**

**TESIS PROFESIONAL**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**Presenta**

**Araceli Coyotl Tzompa**

**Director de Tesis**

**M. C. Miguel Ángel Valera Pérez**

**Co- Asesor**

**D.C. Edgardo Torres Trejo**

**JUNIO 2015**

### **Prefacio**

El presente trabajo forma parte del proyecto de la *Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado* 2013-2014 (VIEP-BUAP) “Criterios para Calidad de Carbono Secuestrado en Suelos”.

**INDICE DE CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	2
4. OBJETIVOS.....	2
5. HIPÓTESIS CORRELACIONALES.....	3
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....	4
I.1. SUELOS Y MEDIO AMBIENTE.....	4
I.2. CALIDAD DEL SUELO.....	5
I.3. SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS SUELOS COMO PARTE DEL ECOSISTEMA.....	6
1.3.1 Servicios ambientales proporcionados por los bosques y Pago de Servicios Ambientales.....	7
I.4. SUELOS Y ECOSISTEMA.....	8
I.5. SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO.....	11
I.6. SUELOS FORESTALES.....	12
1.6.1 Degradación de los suelos forestales.....	12
I.7. HIDROLOGÍA EN SUELOS FORESTALES.....	13
I.7.1. El ciclo hidrológico.....	13
I.7.2 El agua en el suelo.....	15
I.7.3. Retención de agua en el suelo.....	16
I.7.4. Potencial del agua en el suelo.....	17
I.7.5. Clasificación del agua del suelo.....	18
I.8. MÉTODOS PARA MEDIR LA HUMEDAD DEL SUELO.....	19
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES.....	22
II.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
II.1.1. Localización.....	26
II.2 ASPECTOS FÍSICOS.....	26
II.2.1. Orografía.....	26
II.2.2. Geología.....	26
II.2.3. Suelo.....	27
II.2.4. Clima.....	27
II.2.5. Hidrografía.....	28
II.3. ASPECTOS BIOLÓGICOS.....	28
II.3.1. Vegetación.....	28
II.3.2. Fauna.....	28
II.4. Actividades Socio-económicas.....	29
II.4.1. Demografía.....	29
II.4.2. Actividades Agrícolas.....	29
II.4.3 Ganadería.....	29
II.4.4. Silvicultura.....	29

CAPÍTULO III.MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
II.1 TRABAJO DE GABINETE.....	32
II.2 TRABAJO DE CAMPO.....	33
II.2.1 Evaluación en campo de la distribución y del comportamiento estacional del agua del suelo .....	33
II.2.2. Determinación de indicadores físicos de calidad de suelo en campo.....	35
II.2.3. Toma de muestras de suelo para la evaluación de los indicadores físicos y químicos de la Calidad de Suelos.....	35
II.3. TRABAJO DE LABORATORIO.....	36
II.3.1. Evaluación en el Laboratorio de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo. ....	36
II.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.....	39
CAPÍTULO IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
IV.1 DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, USO DE SUELO Y VEGETACIÓN. ....	41
IV.2 DISEÑO Y LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO .....	42
IV.3. EVALUACIÓN EN CAMPO DE LA DISTRIBUCIÓN Y DEL COMPORTAMIENTO ESTACIONAL DEL AGUA DEL SUELO.....	43
IV.3.1 Análisis de la distribución de humedad en el suelo.....	43
IV.4. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS.....	48
IV.4.1. Análisis Físico y Químico del suelo.....	49
IV.4.1. Propiedades físicas de la región de estudio.....	50
IV.5. DISCUSIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS. ....	54
IV.5.1. Densidad Aparente.....	54
IV.5.2. Porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico. ....	56
IV.5.3 Relación C/N .....	60
IV.5.4. Acidez hidrolítica .....	62
IV.5.5. Delta pH. ....	64
CONCLUSIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## INTRODUCCIÓN

### 1. Planteamiento del problema.

El agua es un elemento esencial para mantener la vida, el hombre la utiliza para cubrir sus necesidades diarias y alimentarias, por desgracia no toda el agua es apta para su consumo, de toda el agua del mundo sólo un 2.5% es dulce y potencialmente aprovechable por los seres humanos, plantas y animales terrestres. Sólo un 1% de esta agua dulce (0.01% del total del agua de la Tierra) está disponible, ya que el resto se encuentra lejos de las grandes concentraciones de seres humanos, atrapado en el hielo permanente de los glaciares de la Antártica y Groenlandia o en acuíferos muy profundos (Gleick, 2000; citado por Manson, 2004).

Una forma de captar agua dulce y al mismo tiempo se encuentre disponible para la población, es la recarga de aguas subterráneas que ocurre en gran parte gracias a los sistemas forestales, especialmente sus suelos, ejemplo de ello son los suelos pertenecientes a La Malinche. Este estrato-volcán extinto, es sumamente importante en el abastecimiento de agua para la región, ya que aporta volúmenes considerables a las corrientes subterráneas, gracias a la cual subsisten y prosperan poblaciones como San Miguel Canoa, además de proporcionar una cantidad de agua a la ciudad de Puebla y municipios conurbados.

El papel del bosque en el ciclo hidrológico es muy importante, debido a que la vegetación cumple importantes funciones en el movimiento natural del agua, entre otras, realiza las funciones de intercepción del agua de lluvia, captación de la niebla, conducción de agua hacia el suelo, y regulación de la velocidad de escurrimiento (Alcocer et al., 2005).

San Miguel Canoa, La Resurrección, San Sebastián de Aparicio, San Miguel Espejo, Santa María Xonacatepec y Primero de Mayo, son Juntas Auxiliares del municipio de Puebla y se encuentran ubicadas, en parte, dentro del Parque Nacional Malinche, son consideradas como unas poblaciones indígenas que en los últimos veinte años han sobreexplotado los recursos forestales de la región (Castro, 2004). Esto ha ocasionado pérdidas en la superficie del bosque, lo que provoca sin duda, el efecto ambiental más notable sobre el ciclo hidrológico, dado que aumenta la velocidad de escurrimiento y disminuye la cantidad de agua que se infiltra (Alcocer et al, 2005). Además, al modificar el uso de suelo, cuya vocación forestal ha sido modificada para fines agrícolas, se generan muchos procesos erosivos.

Un suelo erosionado presenta una capacidad limitada para la captación de agua pluvial y, por consiguiente para la recarga de los acuíferos, en razón de la falta de vegetación y de los horizontes superficiales del suelo no degradado (Alcocer, et al, 2005). Por ello resulta fundamental conservar este medio físico (suelo forestal).

## **2. Justificación.**

Los recursos forestales son fundamentales en la prestación de servicios ambientales tales como la recarga de acuíferos. Siendo el agua un líquido vital para el desarrollo de la vida diaria de la ciudad de Puebla y áreas conurbadas. No han sido consideradas las medidas adecuadas para la conservación de los acuíferos y el mantenimiento de la calidad del agua contenida en ellos.

No existen, o no se dan a conocer, datos de los volúmenes de agua extraídos y de los recargados del acuífero de la zona del Parque Nacional Malinche, pero una buena parte del agua suministrada a la ciudad proviene de este acuífero, por lo que se deduce que su extracción es superior a la de hace 35 años (Bori, 2009).

Es importante mencionar que los suelos forestales en buen estado contribuyen a mejorar la calidad del agua, ya que estos funcionan como un filtro. Por otra parte, el agua que se encuentra en este sistema forestal, es el medio por el cual se producen gran parte de los procesos edafogénicos, por lo que es razonable pensar que la cantidad de agua almacenada en los suelos condiciona ciertas características de éstos (Artieda, 2008), de tal modo que resulta importante realizar un estudio de la calidad de los suelos, así como del comportamiento y distribución del agua dentro de los mismos, debido a que estos factores presentan una relación directa con la productividad de los sistemas forestales y la recarga de mantos acuíferos.

## **3. Delimitación Espacial.**

La zona de estudio corresponde al paraje denominado "Huey Tecoch" correspondiente a la junta auxiliar de la Resurrección, municipio de Puebla, estado de Puebla. Este paraje es propiedad del grupo de trabajo "Tleloyotli" (Tleyolotli es una expresión en idioma náhuatl y se traduce como "El fuego se inicia en el corazón"), que es un grupo de pequeños propietarios, todos familiares, originarios de la población de San Miguel Canoa.

Las coordenadas geográficas (UTM, NAD27, ZONA 14) son en X=598126, Y=2119110, y a una altitud media de 2852 msnm, con una extensión de 25 hectáreas.

## **4. Objetivos.**

### **4.1. Objetivos Generales:**

- a) Determinar la Calidad del Suelo en el predio "Huey Tecoch" perteneciente al Parque Nacional Malinche, estableciendo su importancia en la prestación de servicios ambientales.
- b) Determinar cómo es afectada la distribución de humedad, en los suelos de origen volcánico con usos forestales y agrícolas.

### **4.2. Objetivos específicos:**

- a) Comparar la distribución de humedad en los suelos con usos forestales y de uso agrícolas en el predio "Huey Tecoch" perteneciente al Parque Nacional Malinche.

- b) Comparar las afectaciones en la calidad de suelo presentes en las áreas conservadas y modificadas por uso agrícola, en el predio “Huey Tecoch” perteneciente al Parque Nacional Malinche.
- c) Establecer estrategias para mejorar la calidad de los Servicios Ambientales que proporcionan los suelos de la región de estudio.

### **5. Hipótesis Correlacionales.**

**H1:** Existen diferencias significativas en la Calidad del Suelo en función de su uso para el predio “Huey Tecoch” perteneciente al Parque Nacional Malinche.

**H2:** La distribución de la humedad en los suelos de origen volcánico es afectada significativamente por el Uso del Suelo forestal o agrícola.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### I.1. Suelos y medio ambiente.

El suelo, como parte del ecosistema (Blum, 2006), es un proveedor de bienestar y servicios para el hombre y el medio ambiente tales como: biomasa para alimentos, forraje y energía renovable, es un filtro, un medio búffer para limpiar el agua superficial y el aire, además de secuestrar carbono, así como también es un medio para mantener una gran variedad de organismos que garantizan la biodiversidad. En contraste el suelo al relacionarlo con el medio ambiente puede ser una arma peligrosa cuando emite gases traza a la atmósfera, lo que contribuye al cambio climático, incluso los contaminantes del suelo se puede transportar a través del agua superficial, las partículas de suelo pueden ser transportadas al aire debido a los efectos erosivos del viento y el agua, afectando directamente la salud humana por ingestión, inhalación y el contacto con la piel.

En el documento “Ideas den el futuro de la ciencia del suelo” Várallyay (2006) considera que algunas de las funciones del suelo en relación con el medio ambiente son: la de ser un reactor, transformador e integrador de otros recursos naturales (radiación solar, atmósfera, agua superficial y subterránea, recursos biológicos); medio para la producción de biomasa, alimento, forraje, materia prima industrial; almacén de calor, agua, nutrientes para las plantas y en algunos casos el suelo también es almacén de desechos provenientes de diversas fuentes. Por otro lado, el suelo es un recurso natural con alta capacidad búffer, lo cual puede prevenir o moderar consecuencias desfavorables en el medio ambiente y/o efectos adversos inducidos por el hombre; siendo un filtro natural el suelo actúa como desintoxicante de sistemas naturales; es un reservorio significativo de genes; lo que lo convierte en un elemento importante en la conservación de la biodiversidad, etc. Vállaray (2006) enfatiza que la multifuncionalidad del suelo depende de sus propiedades entre ellas su calidad.

El uso del suelo por el hombre, implica fines muy diversos, tales como son: la agricultura, ganadería, pastos y bosques, extracción de minerales, materiales para la construcción, eliminación de residuo, actividades de ocio y recreo (Cruz et al., 2000).

A nivel internacional, la protección del suelo no era considerada un asunto de importancia. Sin embargo, recientemente se ha tomado conciencia del papel de este recurso y de las intensas presiones a las que se ha visto sometido. En 1992, durante la cumbre de Río de Janeiro, los países participantes, incluyendo México, firmaron una serie de declaraciones relacionadas con la protección del suelo; poco tiempo después, en 1994, se formó la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), que tiene entre sus objetivos evitar y reducir la degradación del suelo, rehabilitar terrenos parcialmente degradados así como recuperar tierras desertificadas. Estas acciones son, sin duda, un reconocimiento a la estrecha relación entre la degradación del suelo con otros problemas ambientales relevantes, como la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático (SEMARNAT, 2005).



El suelo es por consiguiente, esencial para el sostenimiento de la vida de todas las criaturas vivientes, y cumple con funciones tales como la productividad biológica sostenible, la atenuación de contaminantes ambientales y patógenos, además de ser importante en la salud de plantas animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997; citados en Bautista et al., 2004), por lo que mantener una buena calidad de suelo es importante.

## **I.2. Calidad del Suelo.**

Los primeros esfuerzos científicos reconocieron la importancia de clasificar el suelo y de considerar, con respecto al uso del mismo, qué variables o propiedades tenían mayor valor, especialmente con propósitos agrícolas. De acuerdo a Jenny (1980), tanto el tipo como las propiedades del suelo usualmente se relacionan y, combinadas, se usan para definir el estado del sistema suelo. Fue necesario entonces desarrollar clasificaciones tanto para la capacidad de los terrenos como para diferentes propósitos de uso de los suelos. Actualmente, se considera que uno de los retos más importantes que enfrenta la ciencia del suelo es desarrollar criterios de calidad del suelo que se utilicen también en una evaluación objetiva de riesgos ambientales (Sims et al., 1997).

En años recientes (Carter et al., 1997), debido a la inquietud con respecto a la degradación del suelo y a la necesidad de un manejo sostenible de los agro-ecosistemas, resurgió la preocupación hacia las variables del suelo. Aunado a lo anterior, existe la idea del uso del suelo, que ha enfatizado el valor del suelo y de sus propiedades para una función específica. Este enfoque ecológico del suelo reconoce las interacciones suelo-ser humano; de esta forma, la calidad del suelo es inseparable del concepto de sostenibilidad del sistema y se considera un indicador clave de la sostenibilidad del ecosistema. Acton y Gregorich (1995) consideran que la calidad de los suelos determina la sostenibilidad agrícola, la calidad del ambiente y, como consecuencia de lo anterior, la salud de las plantas, de los animales y del ser humano.

Asignar un valor al suelo con respecto a un uso o propósito específico conduce (Beare et al., 1997; Carter et al., 1997) al concepto de calidad del suelo. Sin embargo, en contraste con el aire y el agua, para los cuales la función se relaciona directamente con el consumo humano y animal, la función que se asigna al suelo varía y, usualmente, no se vincula de una manera directa con la salud humana. Por lo tanto, el concepto de calidad se relaciona con una función o uso específico del suelo. De las funciones del suelo, Doran y Parkin (1994) consideran que son tres las de importancia y significado especial: como medio de producción biológica y vegetal; como filtro para disminuir los efectos de los diferentes contaminantes y patógenos; y como promotor de la salud animal y vegetal e, indirectamente, de la salud humana.

Warkentin (1995) indica que las funciones del suelo en los ecosistemas son: el reciclamiento de los materiales orgánicos para liberar nutrientes y la síntesis posterior de nuevos materiales; la distribución de la precipitación; el mantenimiento de la diversidad en el hábitat de poros y superficies de diferente tamaño y de las presiones relativas de gases y del agua; el mantenimiento de la estabilidad del hábitat, incluyendo una estructura

estable y la resistencia a la erosión hídrica y eólica y la regulación del hábitat contra cambios bruscos de temperatura, humedad y concentración de materiales potencialmente tóxicos; almacenamiento y liberación gradual de nutrientes y agua; y distribución de energía en la superficie, lo cual es importante en procesos de circulación globales.

Lal (1999) indica que, de manera similar a la degradación del suelo, existen tres tipos de calidad del suelo: la física, la química y la biológica. Establece además diferencias entre la degradación del suelo y la calidad del mismo. La primera es la pérdida de la productividad o utilidad potencial o actual como resultado de factores naturales o antropogénicos, en tanto que la segunda se refiere a la productividad y a la capacidad reguladora del ambiente del suelo.

El Servicio para la Conservación de los Recursos Naturales de EUA (*Natural Resources Conservation Service*, NRSC, 2001) define la calidad de los suelos como la capacidad que tiene cada tipo de suelo en su función natural o en su manejo como límite de un ecosistema. Además la clasifica en Calidad Inherente (CI) y Calidad Dinámica (CD). Propiedades tales como textura, mineralogía, color, etc., son innatas del suelo, determinadas por sus factores formadores y conforman así su calidad inherente. La cual al ser modificada por actividades antropogénicas, da como resultado una calidad dinámica. Tener información de la calidad dinámica de los suelos en una región determinada, se convierte en una herramienta para proponer y evaluar prácticas de conservación y uso del recurso.

Las definiciones más recientes de calidad de suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en su uso específico, pero este concepto continua evolucionando (*Singer y Ewing, 2000*). Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (*Karlen et al., 1997*) como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat. Es este último concepto es el que consideraremos como fundamento para esta tesis de ingeniería ambiental.

### **I.3. Servicios Ambientales de los suelos como parte del ecosistema.**

El suelo y los recursos que en él existen, son de gran importancia ya que nos brindan servicios ambientales que influyen directamente en el mantenimiento de la vida, generando beneficios y bienestar para las personas y las comunidades.

Estos servicios son obtenidos de manera natural o por medio de un manejo sustentable, ya sea a nivel local, regional o global. Los servicios ambientales se dice que son beneficios intangibles (aquellos que sabemos existen, pero cuya cuantificación y valoración resultan complicadas) (CONABIO, 2014).

Un suelo saludable nos da aire limpio y agua, cosechas y bosques productivos, buenos pastizales, vida silvestre diversa, además de hermosos paisajes. Para que todo esto sea posible, el suelo realiza las siguientes funciones:

- Regulación del agua. El suelo puede regular la distribución de lluvia o del agua proveniente de sistemas de irrigación, la infiltración, el desagüe, el flujo y almacenamiento de agua y sustancias disueltas.
- Soporte de vida vegetal y animal. El suelo sostiene el crecimiento y la diversidad de plantas y animales al proporcionar un ambiente físico, químico y biológico para que se realice el intercambio de agua, nutrientes, energía y aire.
- Filtrado de contaminantes. El suelo puede actuar como un filtro para proteger la calidad del agua, el aire y otros recursos. Los minerales y microbios presentes en el suelo son los responsables de filtrar, amortiguar, degradar, inmovilizar, y desintoxicar materiales orgánicos e inorgánicos, incluidos productos de desecho industriales y municipales, y depósitos atmosféricos.
- Ciclado de nutrientes. El suelo almacena, modera o modifica la liberación y el ciclado de nutrientes y otros elementos esenciales para las plantas. Así que el carbono, el nitrógeno, el fósforo y muchos otros nutrientes son almacenados, transformados y ciclados a través del suelo (Zamora, 2005).

Debido a lo antes mencionado el cuidado y valoración del suelo resulta de gran importancia.

**1.3.1 Servicios ambientales proporcionados por los bosques y Pago de Servicios Ambientales.** Existen pocos ecosistemas terrestres que se acerquen a los bosques en cuanto a diversidad de flora y fauna, así como a los servicios ambientales que brindan a la población en general.

El bosque brinda servicios ambientales, tales como: mitigación de los efectos del cambio climático, generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes, protección de la biodiversidad, retención de suelo, refugio de fauna silvestre, belleza escénica, además de funcionar como receptores de agua producto de las precipitaciones.

Algunos de los servicios hidrológicos más importantes proporcionados por los bosques son los siguientes:

- a) Regulación de la calidad y cantidad de agua
- b) Minimización de ciclos de inundación y sequía
- c) Generación, protección y mantenimiento de suelos y sus nutrientes
- d) Regulación del clima a escalas locales y regionales
- e) Estabilización del paisaje, con el fin de evitar deslaves y azolve de los ríos (Manson, 2004).

A pesar de la gran variedad de servicios brindados por los bosques, en México la situación de estos es precaria, por lo que es importante realizar un buen manejo ecosistémico promoviendo el uso de los ecosistemas sin contribuir a su degradación; y de esta manera buscar un balance entre la oferta de los recursos naturales y la demanda de

la población, mientras se mantiene la capacidad de los ecosistemas para suministrar dichos recursos de manera sostenible (SEMARNAT, n.d.).

La introducción de este enfoque en México es reciente y se ha comenzado a aplicar a través del pago por servicios ambientales. Este mecanismo consiste en pagar al propietario por mantener su tierra con uso de suelo forestal (INE, 2002), y con ello generar fondos que luego se puedan usar para: (i) aumentar los beneficios provenientes de la conservación de las personas que manejan el bosque, para así modificar sus incentivos; o (ii) generar recursos que se puedan usar para financiar los esfuerzos de conservación de los grupos conservacionistas privados o gubernamentales (Pagiola, Bishop y Mills, 2003).

Esto se lleva a cabo a través de dos programas: *el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos y el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los derivados de la Biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de Sistemas Agroforestales.*

Es importante mencionar que en México el 70% de los bosques y selvas son propiedad de comunidades y ejidos, y alrededor de 3 mil comunidades realizan alguna actividad de aprovechamiento forestal, de las cuales 600 de ellas han constituido alguna empresa forestal comunitaria. De la población total que habita en los bosques, cerca de 5 millones son población indígena.

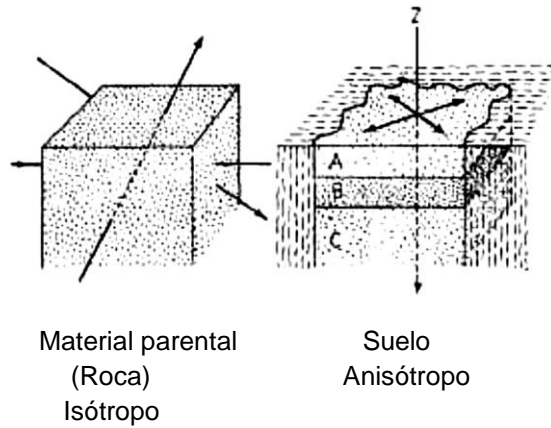
Por lo que del manejo forestal comunitario y el pago de dichos servicios, permite conservar y proteger importantes ecosistemas forestales que brindan diversos servicios ambientales a la sociedad en general (CONAFOR, n.d.).

#### **I.4. Suelos y ecosistema.**

El término suelo se deriva del latín *solum* que significa piso o superficie de tierra. En general el término suelo se refiere al material suelto que se encuentran en la superficie de la corteza terrestre y se distinguen de la roca sólida. La gente, cuando piensa en la palabra suelo, tiene en mente el material que alimenta y sostiene el crecimiento de las plantas. Este significado es aún más general, ya que incluye no únicamente al suelo en el sentido común, sino también rocas, agua, nieve y aire, todos los cuales son capaces de sustentar vida vegetal (Miller et al. 1981).

Jenny (1994) cita a Joffe (1936) quien dice que el suelo es un cuerpo natural, diferenciado en horizontes minerales y constituyentes orgánicos, generalmente no consolidados, de profundidad variable; el suelo difiere del material parental en morfología, propiedades físicas y constitución, propiedades químicas y composición, y características biológicas.

Jenny (1994) considera al suelo como un sistema físico abierto, con propiedades vectoriales anisótropas; es decir que las propiedades físicas del perfil dependen de la dirección (Cuadro I.1); esto significa que si consideramos un perfil de suelo, sus propiedades pueden variar en todos los sentidos del perfil. Siendo el suelo un sistema termodinámicamente abierto permite que sean añadidas o removidas diversas sustancias.



**Cuadro I. 1** Material parental isótropo y el suelo derivado del material parental es anisótropo (Tomado de Jenny, 1994).

La Sociedad de la Ciencia del Suelo de América (SSSA, 1991) define al suelo como:

- Material mineral no consolidado y material orgánico que se encuentra en la superficie de la tierra y que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas.
- El material mineral no consolidado y la materia orgánica en la superficie de la tierra son afectados por los factores medioambientales como el clima (incluyendo efectos del agua y la temperatura), macro y microorganismos, condiciones del relieve, que en conjunto actúan sobre el material parental en un período de tiempo; de esta forma las propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas de los suelos difieren de uno a otro tipo de suelo.

Por otro lado Miller (1994) considera al recurso suelo como un recurso natural potencialmente renovable; Miller añade la palabra "potencialmente" para señalar que este recurso es susceptible de convertirse en no renovables (su utilización es más rápida de lo que son renovados por los procesos naturales). En este sentido Várallyay (2006) considera al suelo como un recurso natural condicionalmente renovable. En este sentido en el *Compendio de Estadísticas Ambientales México de 2005*, el recurso suelo también es considerado un recurso natural frágil y no renovable, debido a que resulta difícil y costoso recuperarlo, incluso mejorar sus propiedades después de haber sido erosionado por las fuerzas abrasivas del agua y el viento o bien como consecuencia de ser deteriorado física o químicamente por actividades antropogénicas (SEMARNAT, 2005).

En la actualidad, por efecto de la influencia ambiental, de la sostenibilidad y de la sistémica, se han elaborado algunas definiciones un poco más holísticas del suelo:

Para Jaramillo (Jaramillo et al., 1994) el suelo es aquella delgada capa, de pocos centímetros hasta algunos metros de espesor, de material terroso, no consolidado, que se forma en la interface atmósfera – biosfera – litosfera. En ella interactúan elementos de la

atmósfera e hidrosfera (aire, agua, temperatura, viento, etc.), de la litosfera (rocas, sedimentos) y de la biosfera y se realizan intercambios de materiales y energía entre lo inerte y lo vivo, produciéndose una enorme complejidad.

Hillel (1998) considera el suelo como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera que está encima y con los estratos que están debajo, que influye el clima y el ciclo hidrológico del planeta y que sirve como medio de crecimiento para una variada comunidad de organismos vivos. Además, él juega un papel ambiental preponderante como reactor bio-físico-químico que descompone materiales de desecho y recicla dentro de él nutrientes para la regeneración continua de la vida en la Tierra.

De acuerdo con la definición de suelo que proponen Jaramillo y colaboradores (Jaramillo et al., 1994), para poder establecer y entender la evolución del suelo se requieren ciertas interacciones con otras ciencias como la química, la física, la biología, la geología, la geomorfología, la climatología, la hidrología, la mineralogía, entre las más frecuentes. Éstas proporcionan los conocimientos básicos acerca de los procesos y factores que intervienen en el desarrollo del suelo.

En la década del 40, Jenny (citado por Jaramillo, 2002), definió los factores que intervienen en la formación del suelo, mediante el siguiente modelo, sencillo sólo en su presentación:

$$S = f(C, MP, O, R, t) \text{ [Ecuación 1.1]}$$

Donde:

- S: Desarrollo del suelo.
- C: Clima.
- MP: Material parental o Roca.
- O: Organismos.
- R: Relieve.
- t: Tiempo.

Según el modelo planteado, el desarrollo del suelo es función de la acción de un clima y sus organismos asociados sobre un material parental o roca, bajo el control de un relieve, durante un determinado período de tiempo.

Los factores incluidos en la Ecuación 1.1, son los Factores de Formación del Suelo y son los que controlan el accionar de los procesos pedogenéticos, tanto en su tipo como en su intensidad.

Siendo el tipo de material parental o roca uno de los factores determinantes en la formación de suelo y situándose el área en estudio de este trabajo sobre un estrato-volcán como lo es la Malinche, cobra especial interés el tipo de suelo que se ha formado en estas condiciones, que tal y como se reporta en el mapa de la Fundación Alemana para la Investigación Científica (Werner et al., 1976), denominado "Mapa de suelos de la Cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores", como también más recientemente por

Llaguno (Llaguno, 2007), se trata de suelos de origen volcánico, en especial del grupo Andosol de la Clasificación WRB (Driessen et al., 2001).

### **I.5. Suelos de origen volcánico.**

Alrededor de las zonas volcánicas de todo el continente Americano se encuentran depósitos de suelos residuales formados a partir de la intemperización de cenizas volcánicas, este tipo de suelos presentan propiedades inusuales en comparación con suelos derivados de rocas sedimentarias. El proceso de formación de los suelos de cenizas volcánicas inicia con la generación de una nube de piroclastos durante la erupción volcánica, conformada por partículas de diámetro inferior a 2 mm, conocidas como cenizas volcánicas, clasificadas en riolíticas, dacíticas, andesíticas, basalto-andesíticas (Lizcano et al., 2006).

Los suelos derivados de las cenizas volcánicas, se desarrollan a través de procesos de alteración física y química de los depósitos de cenizas volcánicas (disolución, lixiviación y precipitación de compuestos). Estos procesos transforman los minerales, la forma y el tamaño de las partículas y la porosidad. Su influencia es controlada por las condiciones climáticas y el tiempo. Las condiciones climáticas (precipitación, temperatura, humedad y viento) determinan la presencia de fluidos disponibles para las reacciones químicas, la tasa a la cual estas reacciones ocurren, la migración de compuestos, la erosión, entre otros procesos. El tiempo por su parte, gobierna la secuencia para la síntesis de minerales secundarios y la distribución de tamaños de partículas, el efecto del material parental es más importante en las etapas iniciales de la formación del suelo que en etapas avanzadas. La intemperización del material parental depende de la presencia de minerales ácidos o básicos. En general, los minerales ácidos: cuarzo, feldespato, horblenda, mica, son más resistentes a la intemperización que los minerales básicos: olivino, piroxena y plagioclasa cálcica. Durante la intemperización generalmente se obtiene una composición elemental rica en silicio, aluminio y cationes base sodio y calcio. El silicio (Si) y los cationes base son disueltos y removidos de las capas superficiales y el aluminio (Al) tiende a permanecer. A medida que el clima se hace más húmedo ocurre mayor disolución y se alcanza a remover Al progresivamente. Los mecanismos de disolución y lixiviación son muy importantes para la formación de los suelos derivados de cenizas volcánicas ya que llevan a zonas superficiales altamente porosas y la disponibilidad de las soluciones necesarias para la síntesis de minerales secundarios.

Entre las propiedades de los suelos volcánicos podemos destacar su alto contenido en materia orgánica, alta porosidad (60-80%), baja densidad aparente, gran capacidad de retención de agua y la formación de micro agregados estables. Tales características pueden explicarse en base al alto contenido en oxihidróxidos de Fe y a la estructura que los minerales alofanicos, alofano e imogolita entre otros, presentan en estos suelos: esferulas huecas que permanecen discretas a humedades altas

## **I.6. Suelos forestales.**

Los ecosistemas boscosos están asociados a suelos con ciertas propiedades físicas y químicas que las diferencias ampliamente de los suelos agrícolas, en un sentido muy general, un suelo forestal puede considerarse como aquel que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal. Los suelos forestales pueden considerarse un recubrimiento que abarca aproximadamente la mitad de la superficie terrestre (Pritchett, citado por Salas, 1987).

La necesidad de un estudio por separado del suelo forestal se ha puesto en tela de juicio por muchos edafólogos, el argumento es que con excepción de los suelos de tundra, de pantano, de pastizal, de desierto y de origen antrópico, todos los demás suelos han tenido un origen forestal. Si bien esto es estrictamente cierto, también lo es que la cobertura forestal y su estructura boscosa proveen al suelo de un microclima y de un espectro de microorganismos diferente de aquellos asociados con la mayoría de los suelos. Tal procesos dinámico como el del ciclo de nutrimentos entre los diferentes componentes del bosque y la formación de ácidos orgánicos, a partir de los desechos aportados por la hojarasca y el subsecuente lavado de las bases, da un carácter distintivo a los suelos bajo cubierta forestal. Otra propiedad importante en estos suelos es que algunas características adquiridas durante su desarrollo, persisten por largo tiempo después que la cubierta forestal ha desaparecido y el suelo se ha utilizados para cultivos agrícolas (Pritchett, citado por Salas, 1987).

Debido a que se espera que los bosques sirvan para los usos múltiples de fuentes de extracción de madera, recreación, estética, hábitat para la vida silvestre y protección de las cuencas acuíferas, el suelo que mantiene una cubierta forestal es algo más que un medio para el crecimiento de árboles, teniendo también que servir para propósitos múltiples.

En esta tesis se va a considerar como suelo forestal, en el sentido más amplio propuesto por Pritchett (1986), a cualquier suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal. A esta definición deberemos agregar el requisito de que el suelo aun conserve la cubierta forestal o parte de ella, o que tenga poco tiempo de haber sido retirada dicha cubierta y cambiado el uso del suelo (menos de 50 años) (Valera, 1996).

**1.6.1 Degradación de los suelos forestales.** Los suelos forestales han sido en general poco estudiados en nuestro país, sobre todo con los objetivos de encontrar relaciones cuantitativas entre el suelo y otros factores del ecosistema forestal, por otra parte, muchas zonas que anteriormente se encontraban cubiertas con vegetación natural, como consecuencia del aumento de la presión demográfica, en la actualidad han sido sometidas a un cambio drástico en el uso del suelo lo que ha originado la pérdida de la vegetación forestal y la consecuente degradación del suelo (Valera, 1996).

En un estudio sobre la degradación del suelo inducida por el hombre (ISRIC, 1988), se indica que en México las causas detectadas son: deforestación,



sobrepastoreo, ensalitramiento y anegamiento en zonas bajo riego; erosión y anegamiento en zonas de temporal; avances y crecimiento de dunas de arena; decreciente disponibilidad y calidad de las aguas, tanto subterráneas como superficiales; y contaminación de aguas, suelos y cultivos.

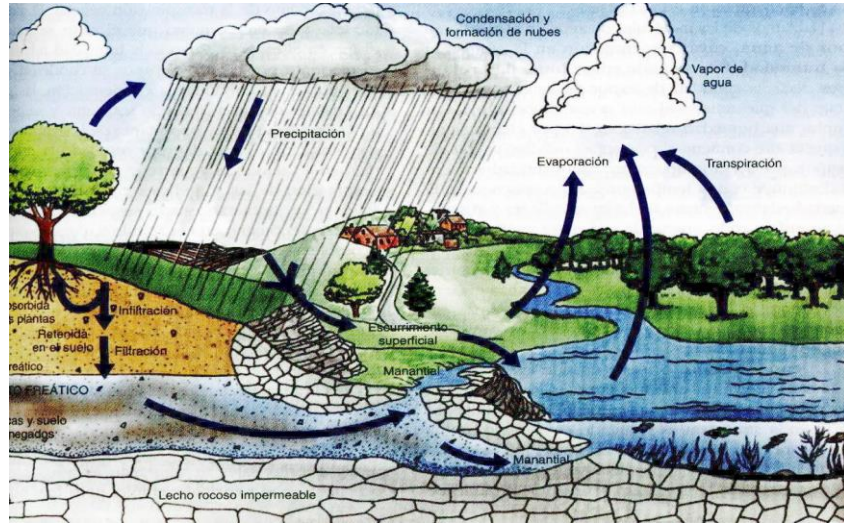
Las distintas zonas del país se encuentran afectadas de diferente forma, en el eje neovolcánico se observa que en un 20% del territorio nacional, se concentra el 60% del total de su población, lo cual ejerce una alta presión sobre los recursos agua, suelo, flora y fauna; además, falta un equilibrio entre la agricultura, la industria y las zonas urbanas, puesto que las zonas urbanas e industriales están ocupando los valles sobre suelos agrícolas de primera clase, desplazando a la agricultura sobre suelos con vocación forestal lo que ha ocasionado la degradación de estos a través de la deforestación, el sobrepastoreo y la contaminación.

En las zonas áridas, que ocupan más del 70% de la superficie del territorio nacional, prevalece la deforestación y el sobrepastoreo, lo que favorece a la erosión hídrica y eólica. En la zona tropical, el 10% del territorio, se detectan problemas de deforestación por la roza tumba y quema, sobrepastoreo y contaminación de los suelos debido a las extracciones petroleras.

De lo anterior se puede constatar que los procesos de degradación originados por la deforestación, el sobrepastoreo y la contaminación son, para el caso de los suelos forestales, en orden de importancia, la erosión hídrica y eólica, la degradación biológica (pérdida del humus del suelo), la degradación química (lixiviación de bases, acidificación, actividad negativa del aluminio y hierro, toxicidad debidas a la polución ambiental) y la degradación física (cambios adversos en: porosidad, permeabilidad, densidad aparente y estabilidad estructural) (Valera, 1996).

## **I.7. Hidrología en suelos forestales.**

**I.7.1. El ciclo hidrológico.** La comprensión del ciclo hidrológico es esencial para el manejo eficiente del agua de lluvia y del suelo. La cantidad de agua en el mundo es constante pero el agua está continuamente cambiando de una forma a otra y se mueve a diferentes velocidades. Estas interrelaciones se describen en el ciclo hidrológico (Cuadro I.2), el cual explica el movimiento del agua en el ecosistema:



Cuadro I. 2 Diagrama del Ciclo Hidrológico  
(Tomado de Agua en Bolivia, 2011)

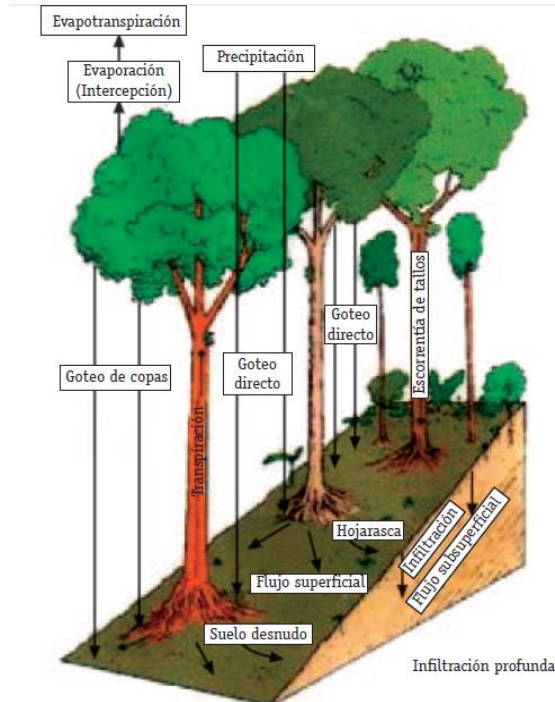
El calor del sol es la causa de que el agua en la superficie de los océanos, lagos y ríos se evapore, ascendiendo hacia la atmósfera, a medida que el vapor de agua disminuye su temperatura, el vapor se convierte en pequeñas gotas (condensación) que se acumulan bajo para formas nubes y descienden en forma de precipitación.

Una vez que la lluvia llega a la superficie, una parte del agua se infiltra al suelo, mientras que otra se queda en la superficie corriendo como un flujo (escurrimiento superficial).

La lluvia que se infiltra integra el agua del suelo parte de la cual puede ser usada por las plantas, otra se vuelve a la atmósfera a través de la evaporación desde la superficie del suelo mientras que otra parte de agua, si hay suficiente infiltración, puede pasar más abajo de la zona radical como agua subterránea.

El agua subterránea se mueve en forma lateral y lentamente hacia el mar para completar el ciclo hidrológico pero parte de esta, en su camino se infiltrara hacia arroyos ríos y lagos. De esta forma el agua subterránea mantiene el nivel de agua de pozos y la continuidad de las corrientes de agua durante los periodos secos (Shaxson y Barber, 2005).

Dentro del ciclo hidrológico la vegetación juega un papel importante, al contribuir en el almacenamiento de agua, favorecer la infiltración y disminuir el escurrimiento, además de favorecer la estabilidad de los suelos y el almacenamiento y futuro aprovechamiento de aguas sub-superficiales, tal como sucede en los bosques. Por lo que observar el ciclo hidrológico en estas zonas resulta relevante (Guatemala, 2005). En lugares boscosos el ciclo del agua se ilustra de la siguiente manera (cuadro I.3):



**Cuadro I.3** El ciclo hidrológico del bosque en las laderas de las colinas (modificado de Douglas 1977)  
(Tomado de Bruijnzel, 1997)

La lluvia llega hasta el suelo del bosque como precipitación interna y escurrimiento por los tallos, de esta una porción sustancial es interceptada por el dosel del bosque, la cual se evapora posteriormente hacia la atmósfera durante e inmediatamente después de la precipitación; el resto alcanza la superficie del suelo como goteo de la copa.

Si el total de la precipitación interna y el escurrimiento por el tallo, llegan al piso del bosque y exceden la capacidad de infiltración del suelo, el exceso de agua que no es absorbida por el suelo es escorrentía, directa como escurrimiento Hortoniano (HOF). Debido a que generalmente la capa de suelo orgánica tiene gran capacidad de absorción en la mayoría de los bosques, el volumen de la lluvia interna y el escurrimiento por los tallos se infiltrara en el suelo.

La mayoría del agua infiltrada es absorbida por la vegetación y retorna a la atmósfera por procesos de transpiración (Jarvis y Stewart citados en Sampurno, 1997).

La humedad que permanece en el suelo drena hacia la red hídrica por flujo subsuperficial. El agua que percola dentro del suelo hasta una capa impermeable del material parental drena como flujo lateral (flujo subsuperficial). Tal cantidad de agua drena lenta y continuamente, siendo contabilizada para el flujo base de las corrientes (Ward y Robinson citados en Sampurno, 1997).

**I.7.2 El agua en el suelo.** Una vez que el agua se encuentra en el suelo pasa a ser un componente de este, encontrándose en forma de humedad intergranular, retenida en los

poros del suelo a diferentes niveles de energía, y que al contener sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas constituye la solución el suelo (García, Sosa & de Ullivarri, n.d.). También podemos encontrar el agua en suelos tipo permafrost en forma de hielo (Higuera y Oyarzun, n.d.). Para fines prácticos, se entiende por agua del suelo la que puede ser extraída por desecación hasta peso constante en una estufa a 110°C (Baver, 1991).

Algunas propiedades que brinda el agua al suelo son las relacionadas con el comportamiento mecánico, tales como consistencia, plasticidad, resistencia, penetrabilidad y adhesividad (Hillel, 1998), además de intervenir en procesos tales como; el crecimiento de plantas y la producción de cultivos, los riegos y drenajes, la recarga de acuíferos, la erosión y el transporte de solutos (Santa et al., 2005).

El contenido de agua del suelo rige el contenido de aire y el intercambio de gases del suelo, que afecta a la respiración de las raíces, la actividad de los microorganismos, y el estado químico del suelo (por ejemplo, el potencial de oxidación-reducción).

La relación que existe entre el suelo y agua es importante al hablar de características físicas de este, ya que pueden determinar la disponibilidad del líquido, como es el caso de la estructura del suelo y su estabilidad ya que influyen de manera significativa en dicha relación (suelo-agua), aireación, infiltración, permeabilidad, flujo interno y externo, así como la penetración de la raíz, pérdida de nutrientes para las plantas y por lo tanto de la productividad del suelo (Meza, 1996).

Otra característica importante que influye en la movilidad del agua dentro del suelo es la densidad aparente. Esta propiedad puede verse afectada al compactar el suelo, lo que reduce el tamaño de los poros y con ello la posibilidad de retener agua. Debido a que los poros en el suelo constituyen del 30 al 60% del volumen total del suelo (Meza, 1996), es importante conservar una buena porosidad en los suelos.

**I.7.3. Retención de agua en el suelo.** El suelo es un medio poroso compuesto de sólidos, aire y agua. Los sólidos, son en un principio, partículas minerales de distintos tamaños, formas y composición química, así como partículas orgánicas, que están compuestas por residuos vegetales en diferentes etapas de descomposición y organismos en estado de vida activa (Zamora, 2008), por lo que el tamaño de partícula y su distribución condicionan a su vez el tamaño y distribución de poros.

Dentro del suelo existen dos tipos de poros: macroporos y microporos, los macroporos están asociados a la aireación del suelo y también se conocen como poros no capilares. Los microporos son poros capilares y están asociados con la retención de humedad. Los macroporos son extremadamente importantes en el movimiento del agua (infiltración, percolación y drenaje), intercambio gaseoso (oxígeno y dióxido de carbono) y además proveen espacio para el crecimiento de las raíces (canales).

La capacidad de retención en el suelo alude al agua que puede retenerse en los poros capilares del suelo (Meza, 1996), la cual se expresa en términos de humedad del suelo y se refiere a la cantidad relativa de agua contenida en un cuerpo o muestra de

suelo, independientemente de su tamaño, que no debe confundirse con el contenido de agua en el suelo, ya que esta, se refiere a la cantidad total de agua en un cubo o volumen definido de suelo (Hillel, 1998).

La humedad del suelo varía enormemente no sólo en lo que se refiere a la cantidad de agua sino también en relación a su distribución en el perfil (anisotropía vertical) y entre unos lugares y otros (anisotropía horizontal) dependiendo en cualquier caso de las características del espacio poroso (Gisbert *et al.*, n.d).

El agua es retenida en el suelo de dos maneras: en los poros o capilares que existen entre las partículas sólidas, y por la absorción sobre las superficies sólidas de las partículas de arcilla y de materia orgánica (Meza, 1996).

El proceso de adsorción se puede definir como un fenómeno interfacial resultado de las diferentes fuerzas de atracción o repulsión que ocurren entre las diferentes moléculas o iones de diferentes fases en sus superficies expuestas y que generalmente dicha fuerza es de naturaleza electrostática (Hillel, 1998).

El proceso de adsorción sucede gracias a dos fuerzas, una es la atracción de las superficies sólidas para las moléculas de agua (adherencia), la otra es la atracción de las moléculas de agua entre sí (cohesión). Dichas fuerzas hacen posible que los sólidos del suelo retengan agua y controlen en alto grado su movimiento y su utilización, por lo que cuando el suelo está casi saturado será fácil extraer una pequeña cantidad de agua, pero cuando la humedad va siendo menor en el suelo, la fuerza necesaria para remover toda el agua será cada vez mayor (Buckman y Brady, 1977).

**I.7.4. Potencial del agua en el suelo.** El movimiento de agua dentro del perfil de suelo, así como su retención, disponibilidad, y pérdida están controladas por gradientes energéticos.

Dentro de la física clásica se reconocen dos tipos de energía: cinética y potencial; la energía cinética es despreciable dado que el agua en el suelo se mueve muy lentamente, por otro lado la energía potencial determina principalmente el movimiento del agua en el suelo, por lo que una diferencia en la energía potencial del agua entre dos puntos, da la tendencia a fluir dentro del suelo.

El movimiento seguirá la tendencia universal desde un punto donde la energía potencial sea más alta a otro donde sea más baja, por lo que conocer el estado energético es muy importante para determinar la dirección y la velocidad con que se mueve el agua (Hillel, 1998).

El concepto de potencial de agua en el suelo se define como la *cantidad de trabajo necesario por unidad de cantidad de agua pura que debe realizarse por fuerzas externas al sistema, para transferir reversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua desde el estado de referencia al estado energético considerado* o bien, dicho de otra forma; se define como el *trabajo necesario para llevar una unidad de agua desde una posición estándar (en equilibrio), hasta un punto determinado.*

El potencial total del suelo se denota por la letra griega Psi  $\Psi$  y está compuesto por la suma de cuatro potenciales diferentes; potenciales debidos a la gravedad (g), potencial de presión (p), potencial mátrico (m), potencial osmótico (o) y otros potenciales inducidos por factores diversos como la sobrecarga de un suelo o la presión del aire. Los distintos componentes del potencial del agua se expresan en la siguiente tabla (Santa *et al.*, 2005).

**Tabla I.1** Componentes del potencial del agua en el suelo  
(Tomado de Santa *et al.*, 2005)

Componente	Factor que le afecta
Potencial matricial (-)	Adsorción del agua al suelo
Potencial osmótico (-)	Solutos disueltos en la solución del suelo
Potencial de gravedad (+ o -)	Altura sobre el nivel de referencia
Potencial de presión (+o -)	Presión aplicada

En la práctica la diferencia de concentración de sales entre dos puntos del suelo es tan baja que puede despreciarse, es decir se toma al potencial osmótico como igual a 0. Es importante hacer ver que si el potencial en todos los puntos del suelo es el mismo, el agua estará en equilibrio y por tanto no se moverá a lo largo del perfil.

Las formas de expresar la energía potencial en términos de masa o volumen de agua que la contiene son los siguientes:

**Tabla I.2** Alternativas para expresar el agua en el suelo (Tomado de Santa *et al.*, 2005)

Cantidad especificada	Unidades	Símbolo	Formas de expresar el potencial de agua en el suelo
Volumen	Pa	P	Presión, P
Peso	Metro	H	Altura, H
Masa	Jkg <sup>-1</sup>	$\Psi$	Potencial, $\Psi$

Si la cantidad especificada es un volumen, se expresa como una presión (Pa), si la cantidad especificada es un peso, el potencial se expresa como una altura (m) y si la cantidad especificada es en masa, el potencial se expresa normalmente en Jkg<sup>-1</sup>.

Los factores que afectan al potencial del agua son:

- Los solutos disueltos en el agua
- La adsorción del agua por parte de las partículas del suelo,
- La elevación del agua del suelo en el campo gravitatorio de la tierra

La presión aplicada (positiva o negativa) (Santa *et al.*, 2005).

**I.7.5. Clasificación del agua del suelo.** El agua del suelo ha sido clasificada de varias maneras. Una de las clasificaciones más significativas se basa en la energía de retención del agua, usualmente conocida como "tensión de la humedad del suelo". Esta clasificación está más directamente relacionada con la energía que las raíces de las plantas deben ejercer para absorber el agua y son conocidas como agua higroscópica, agua capilar y agua gravitacional, y se pueden definir como:

- Agua higroscópica. Es toda aquella agua absorbida directamente de la humedad de aire y retenida por las partículas del suelo. Se caracteriza porque las raíces de las plantas no tienen la fuerza necesaria para tomarla. Esta agua está retenida por la matriz del suelo con tensiones que oscilan entre 31 y 10000 bares.

- Agua capilar. Se define como toda aquella agua retenida y almacenada en los microporos del suelo. Esta agua es la sobrante de las capas superiores que va descendiendo muy lentamente por acción de la fuerza de la gravedad, pero que es retenida por acción capilar. Se estima que esta agua está retenida por tensiones entre 0.33 y 31 bares por la matriz del suelo y puede ser aprovechada por las plantas.

- Agua gravitacional. Esta es el agua que ocupa los macroporos, la cual por efecto de la gravedad se percola (infiltra profundamente, hasta llegar en muchos casos al nivel freático) en el perfil del suelo. La fuerza de tensión que ejercen las partículas del suelo sobre esta agua, es muy baja, presentando valores que oscilan entre 0 y 0.33 bares (UNAD, 2014).

Otra de las clasificaciones del agua en el suelo se realiza de acuerdo a su aprovechamiento, recibiendo el nombre de constantes de humedad. Dichas constantes son:

- Capacidad de Campo: la cual está comprendida en la interfase entre agua gravitacional y agua capilar. Está definido como el agua que retiene el suelo después que este ha sido saturado y se ha dejado fluir toda el agua gravitacional, lo que en la mayoría de los casos ocurre 1 o 2 días después de haberse saturado (UNAD, 2014). La capacidad de campo está muy relacionada con la textura del suelo influenciada por el contenido de materia orgánica, tipo de minerales presentes y estructura del suelo (Thompson y Troeh, 2008).

- Punto de Marchitez Permanente: Se define como el contenido de humedad de un suelo por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua sin deteriorarse (UNAD, 2014), debido a que se halla tan fuertemente retenida que no puede aprovecharse.

- Agua útil: es el agua aprovechable por las plantas para realizar sus funciones metabólicas. Se expresa como la diferencia del contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente

## **I.8. Métodos para medir la humedad del suelo.**

La medición del contenido de agua en el suelo ha sido un desafío tecnológico importante en las últimas décadas, lo que ha dado origen a una gran variedad de métodos y técnicas, esto, debido a la necesidad e importancia de determinar la cantidad de agua contenida en el suelo. Debido a ello se ha considerado el contenido de agua dentro del suelo de vital interés en diversas investigaciones sobre agricultura, recursos hídricos así como en modelos meteorológicos.

Sin embargo, las medidas de humedad en el suelo se realizan de forma generalizada en campos muy diversos tales como: prácticas agrícolas, evaluaciones

biológicas de ecosistemas naturales, numerosas aplicaciones medioambientales y obras civiles así como, en investigaciones afines a estas actividades como la edafología, climatología, hidrogeología, geotecnia, ciencias biológicas, ciencias ambientales, entre otros (Florentino, 2011).

La diversidad de estudios y aplicaciones ha llevado a la creación de distintos métodos o técnicas, por lo que no existe un método estándar universalmente reconocido y no hay manera uniforme para calcular y presentar los resultados de las mediciones de humedad del suelo (Hillel, 1998).

Existen distintos métodos para estimar la humedad del suelo tanto en campo como en laboratorio e invernadero. En general los métodos se pueden clasificar según la naturaleza y principios utilizados en métodos directos, que permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo, y métodos indirectos, que se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo dependiente del contenido de agua y que es más fácil de medir, por ejemplo: el peso de suelo, tensión del agua dentro del suelo, la humedad del aire dentro del suelo, la dispersión o atenuación de la radiación, la constante dieléctrica, o la resistencia eléctrica.

También se pueden clasificar según el grado de perturbación del suelo en: métodos destructivos, que alteran totalmente el suelo, cambiando así las condiciones hidrodinámicas del mismo; y no destructivos, donde las mediciones repetidas por largos períodos de tiempo no disturban el suelo y los valores de contenido de agua pueden ser obtenidos inmediatamente, en el mismo sitio y a la misma profundidad (Florentino, 2011).

Algunos de los métodos más usados son: el termogravimétrico o termovolumétrico, la sonda de neutrones, la atenuación de rayos gamma, el eléctrico de los cuatro electrodos; los métodos de resistencia eléctrica y los métodos dieléctricos.

A continuación se explicaran dos de los métodos antes mencionados:

*a) Método termogravimétrico/termovolumétrico.*

Es un método directo, consta de la toma muestras de suelo en el campo, se traslada en envases herméticamente cerrados al laboratorio; donde se pesan en húmedo, se colocan en estufa a 105 ° C, mínimo por 24 h, hasta peso constante. Con esto se calcula el contenido de humedad (%H). Es el método más utilizado para medir agua en el suelo y es una técnica estándar usada comúnmente para obtener datos referenciales de contenido de agua en el suelo.

Los resultados suelen ser expresados como la masa de agua en relación a la masa de suelo (contenido gravimétrico de agua, w) o también como el volumen de agua en relación al volumen del suelo (contenido volumétrico de agua) (Florentino, 2011).

*b) Método de Resistencia Eléctrica.*

Este método se basa en la propiedad que tienen algunos materiales porosos como el yeso, el nylon o la fibra de vidrio, de conducir la corriente eléctrica, cuya resistencia está relacionada con el contenido de humedad.



Los sensores de bloque de yeso constituyen una célula electroquímica con una solución saturada de sulfato de calcio como electrolito (Florentino, 2011) y de dos electrodos concéntricos, donde el yeso actúa como un amortiguador contra el efecto que las sales puedan tener sobre la conductividad eléctrica y los electrodos concéntricos confinan el flujo de corriente al interior del bloque, eliminando los efectos de la conductividad del suelo (Delmhorst).

Cuando los bloques son introducidos en el suelo, estos alcanzan un equilibrio entre la humedad del suelo y su propia humedad, absorbiendo agua en función del contenido de humedad del suelo, lo que da lugar a variaciones de la resistencia eléctrica.

Cuando el bloque está conectado al medidor, la corriente fluye entre los electrodos y la resistencia eléctrica del yeso es medida por medio de un pequeño voltaje con un puente Wheatstone (Florentino, 2011).

Es importante mencionar que la resistencia eléctrica del suelo no sólo depende de su contenido de agua, sino también en su composición, la textura, y la concentración de sales solubles. Además el equilibrio de estos bloques porosos con la humedad del suelo puede verse afectada por histéresis, es decir, por la dirección del cambio de la humedad del suelo (ya sea aumentando o disminuyendo) antes del equilibrio (Hillel, 1998). Para fines de este trabajo de investigación, se aplicara el método de resistencia eléctrica.

## CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

Algunos estudios realizados en otros en diferentes países relacionados al tema de tesis son los siguientes:

- La Agencia Espacial Europea en el año 2009 lanzó la misión SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), dedicada a tomar medidas directas de alta calidad de la humedad almacenada en las capas superficiales del suelo, proporcionando una imagen global de la humedad de la superficie cada tres días. Esta información, junto con técnicas de modelización numérica, se traducirá en una mejor estimación del contenido de agua en el suelo hasta una profundidad de 1-2 m. Para ello se usaron dos tipos de sensores de microondas: pasivos y activos.

La recolección de estos datos son principalmente utilizados para la predicción meteorológica como inundaciones, sequías y olas de calor, en estudios hidrológicos y para mejorar la gestión de los recursos hídricos, la recopilación del primer archivo de datos sobre la humedad del suelo a escala global abarca el periodo de 1978 a 2010 (ESA, 2014).

- Martínez y otros autores (2007), realizaron un análisis de la evolución de la humedad del suelo y su disponibilidad para las plantas a lo largo de un periodo de casi cinco años en la Cuenca del Duero (Provincias de Salamanca y Zamora) España, para ello hicieron comparaciones del comportamiento de la humedad del suelo en relación con diferentes usos de suelo y tipo de cubierta vegetal.

En dicho estudio analizaron las series de humedad del suelo correspondientes a tres zonas, bajo diferentes tipos de cubierta vegetal: agrícola (cereal), herbácea (pastizal) y arbórea (pinar, encinar y robledal), en las que se instalaron estaciones de medición haciendo hincapié en los periodos críticos en términos de disponibilidad de agua. Las estaciones fueron colocadas en cada una de las zonas antes mencionadas, ubicando 3 en la zona agrícola una de ellas en una parcela de cultivo abandonada y dedicada a pasto, otra en una parcela de pinar (*Pinus pinea*) y la tercera en una parcela dedicada a cereal (trigo). En la segunda zona utilizaron los datos de seis estaciones de medición, tres situadas en pastizal y tres bajo la proyección de la copa de las encinas (*Quercus ilex sb. ballota*). En la zona ocupada por bosque caducifolio (robledal de *Quercus pyrenaica*) se han utilizado los datos procedentes de 15 estaciones de medición (12 bajo bosque, 3 en pastizal).

El análisis de la evolución de la humedad del suelo se realizó a dos profundidades (5 y 50 cm), las cuales eligieron como niveles de muestreo representativos en relación con la extracción de agua de las especies herbáceas y arbóreas.

En cada estación emplearon el método TDR (*Time Domain Reflectometry*) con sondas de dos varillas instaladas horizontalmente a las profundidades indicadas. Para la estimación de la constante dieléctrica aparente utilizaron el ecómetro 1502C (Tektronix, Beaverton, OR). Se realizaron mediciones quincenales del contenido de agua del suelo entre enero de 2002 y septiembre de 2006.

Los resultados mostraron diferencias en la evolución del contenido de humedad del suelo y su disponibilidad dependiendo del tipo de uso y cubierta. Aspectos como la fenología, la duración del ciclo vital o las estrategias para la obtención de agua, propias de cada especie, van a condicionar de manera significativa el comportamiento hídrico de los suelos y, sin duda, influirán decisivamente en la dinámica hidrológica en general.

En México son escasos los estudios realizados acerca del tema, se encontró que las investigaciones hechas en Michoacán y Veracruz, mantienen una relación con el trabajo de tesis que se ha elaborado, dichos trabajos se mencionan a continuación:

- González y otros autores en su trabajo de investigación mencionan que en el bosque, la humedad del suelo puede ser conservada por el tipo y porcentaje de cobertura vegetal. No obstante la fragmentación del bosque templado se ha incrementado influyendo en trabajos de restauración, estudios ecológicos y de conservación de fuentes de abastecimiento de agua, por lo que el objetivo de dicho estudio fue conocer la variación en la humedad del suelo, para la época seca en un bosque templado fragmentado bajo tres diferentes condiciones de cubierta vegetal: bosque natural, renuevos de vegetación nativa y sin cobertura arbórea (zona de pastos o de vegetación herbácea y rasante), en la cuenca de Cointzio, Michoacán. Para seleccionar los sitios donde se realizarían la toma de datos y muestreo, consideraron el tipo de suelo: derivados de ceniza volcánica, edad de los renuevos de 5-10 años, ubicación en laderas de cerros o lomas, con pendientes similares (10 grados de pendiente). Los dos sitios seleccionados se ubicaron en la parte alta de la cuenca de Cointzio: La frescura y El Ejido ambos sitios con características similares de vegetación de bosque templado fragmentado. Tomaron datos reportados por la estación meteorológica de Jesús de Monte (más próxima a los sitios de muestreo) donde se registran las épocas más lluviosas siendo en los meses de julio, agosto y septiembre y el menos lluvioso se tiene en los meses de febrero y marzo. En cuanto a la vegetación que domina en la zona, reportan a especies del género *Pinus* y *Quercus*: *P. pseudostrobus*, y *P. michoacana* y en menor grado *P. lawsonii* y *P. teocote*. *P. leiophylla* y *P. lawsonii*. *Quercus castanea*, *Q. obtusata*, *Q. crassifolia*, *Q. gentryi* y *Q. rugosa*.

El muestreo se realizó de forma mensual a profundidades de 2, 5, 10, 20 y 50 cm. La determinación de humedad en el suelo se realizó por el método gravimétrico, utilizando cilindros metálicos, de 1.1 cm de diámetro y 4 de largo, además se realizaron un registro de temperaturas para cada una de las profundidades. En el estudio se menciona que efectuaron una estimación de la cubierta forestal, determinando el área basal del tronco de las especies presentes, así como la cobertura de la vegetación rasante (pastos y pequeñas herbáceas), debido a la importancia de la cubierta vegetal y su relación con la temperatura del suelo y la variación de la humedad. Los resultados obtenidos muestran que para los dos sitios, el comportamiento en el contenido de humedad fue similar, no obstante,

dicho parámetro fue mayor en el bosque del sitio1, lo cual sugiere que hay factores locales que condicionan la variación en el contenido de agua del suelo. Por otra parte, la oscilación térmica más acentuada en el sitio 2, sugiere un efecto importante de la cubierta vegetal tanto en el bosque como en la zona de renuevos.

- Meza P. (1996) en su trabajo de tesis realizó un estudio comparando las propiedades físico-químicas e hídricas de los andosoles del Cofre de Perote dedicados al cultivo y uso forestal, comprobando que los cambios de uso de suelo afectan dichas propiedades.

Para ello realizó tomas de muestras en la vertiente húmeda y seca para ambos tipos de uso durante la época lluviosa y de sequía. Meza considero observaciones en campo de acuerdo a la guía de la FAO (1988) y determino las propiedades físicas, químicas e hídricas empleando las técnicas de laboratorio indicadas para este tipo de suelo en 12 perfiles de la zona de estudio.

El estudio realizado muestra que la distribución de los andosoles se debe al clima y donde las diferencias entre los andosoles úmbricos (zona húmeda) y los haplicos (zona seca) se dan en cuanto a materia orgánica, densidad aparente, porosidad, retención de agua y agua aprovechable. Ejemplo de ello son que la densidad aparente es mayor en los úmbricos que en los háplicos, mientras en los úmbricos las constantes de humedad son: capacidad de campo que va de 77 a 102% y el punto de marchitez permanente va de 30 a 73% y el punto de marchitez permanente va de 12 a 40 %. Además demostró que los cambios de uso de suelo de forestal a agrícola provocan modificaciones en algunas propiedades como: la disminución de la materia orgánica, aumento de la porosidad, disminución de la estabilidad de los agregados, disminución de la permeabilidad, disminución de la retención de agua y agua almacenada.

Por otra parte, en la región del Parque Nacional Malinche, se han realizado algunos estudios de suelos, los más relacionados con este trabajo son:

- Llaguno y colaboradores (2005). La lluvia captada por los suelos de la zona boscosa del volcán La Malinche, es muy importante en la recarga de los mantos freáticos y en el abastecimiento de agua para la ciudad de Puebla; esta recarga es afectada por la deforestación, la disminución de la precipitación media anual y el aumento de la demanda de servicios de agua potable. Con el objetivo de determinar los cambios en la precipitación media anual y los regímenes de humedad del suelo ocurridos en los últimos 20 años en la región del estado de Puebla aledaña a al volcán La Malinche, los autores evaluaron los climogramas de 7 estaciones meteorológicas de la CNA correspondientes a los estados de Puebla y Tlaxcala, se establecieron los balances hídricos y se definió el régimen de humedad del suelo para los periodos 1985-1995 y 1995-2005. Los resultados indican que en algunas zonas la precipitación media anual disminuyó hasta en 80 mm, mientras que en otras menos afectadas hay una disminución menor a 20 mm. El régimen de humedad de los suelos se estableció como ústico. Los autores concluyeron que las zonas más afectadas son las más urbanizadas e

industrializadas y las menos afectadas presentan aún relictos de bosque y que la disminución de la precipitación combinada con otros factores ambientales tales como el relieve, el material geológico, el régimen de humedad y uso del suelo, están generando la escasez del recurso agua, por lo que es indispensable rediseñar estrategias para evitar la deforestación y promover la sostenibilidad del bosque

- Bori (2009). En el trabajo de tesis realizó una estimación mediante un estudio de la calidad del suelo e infiltración de agua de lluvia al subsuelo (a través de la comparación de dos tipos de suelos forestales, los conservados y los degradados) y de un análisis de la evolución del clima de la zona, con la finalidad de determinar cómo influyen la variación del clima y la tala del bosque en la recarga del acuífero que se encuentra debajo de esta área. Para ello se identificaron los dos tipos de suelos: suelos forestales conservados y los degradados.  
En los primeros se encuentran los suelos deforestados entre el 1986-2002 y los suelos que no han sido deforestados, en cambio en los suelos forestales degradados se encuentran aquellos que fueron deforestados antes del 1986.  
De acuerdo a los resultados, no se observaron diferencias claras en el clima que pueden afectar a la capacidad de infiltración del suelo de la zona de la Malinche, ya que el régimen de humedad en los dos períodos es el Ústico. Además se observó que hay un aumento general en la precipitación, por lo que el suelo se puede ver afectado por la erosión, debido a problemas de deforestación, y con ello disminuir la capacidad de infiltración, y por último se observaron diferencias significativas en la capacidad de infiltración de los dos tipos de suelos forestales. La infiltración es más rápida en los conservados que en los degradados.
- Rios (2014) en su trabajo de tesis de maestría, analizó los componentes humificados de la materia orgánica de los suelos con el fin de conocer la Calidad del Carbono que han secuestrado los suelos en cada una de las áreas deforestadas en diferente periodo y compararla con la de las áreas que conservan vegetación forestal, dentro del Parque Nacional Malinche del Estado de Puebla. Para ello se realizó un análisis comparativo de precipitaciones y temperaturas medias anuales utilizando datos de 7 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua correspondientes a la región circundante de La Malinche, tanto del estado de Puebla como de Tlaxcala, para periodos de tiempo de 1985-1995 y 1995-2005. Además de la elaboración de climogramas para la determinación del régimen de humedad del suelo, esto con la finalidad de relacionar la degradación biológica de los suelos con el cambio del ciclo hidrológico y micro-climático, y su contribución al aumento del efecto invernadero. Obteniendo como resultado que las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera ocurridas durante este periodo son de 270,661 toneladas de (ó 270 Gg). Por otra parte se observó que la resiliencia de los suelos estudiados se puede considerar como buena, ya que su capacidad de carga para amortiguar la degradación biológica generada por el cambio de uso venció en un periodo de 16 años. Se demostró que si existen cambios

significativos en los Ácidos Húmicos de los suelos que soportan vegetación forestal, cuando es modificado el uso de forestal a agrícola, y fue posible establecer el Grado de Humificación, el Índice Melánico y el Umbral de Coagulación de los Ácidos Húmicos, estos parámetros pueden ser consideradas como propiedades indicadoras de Calidad de Carbono Secuestrado en Suelos.

## **II.1 Descripción de la zona de estudio**

**II.1.1. Localización.** La zona de estudio se encuentra en el Parque Nacional Malinche o Matlalcuéyatl, el cual, pertenece a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Transversal y a la Subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac (Arriaga et al., 2000). El Parque está catalogado como una Región Terrestre Prioritaria para la Conservación (RTP 106) y se distribuye en 15 municipios: cuatro del estado de Puebla y 11 del estado de Tlaxcala (CONANP, 2012).

La región de estudio llamada Paraje Huey Tecoch, se encuentra en la Junta Auxiliar de San Miguel Canoa, perteneciente al Municipio de Puebla. El predio se encuentra ubicado a una altitud de 2852 msn, con una extensión de 25 hectáreas y con las coordenadas geográficas (UTM; NAD27 Zona 14) x= 598 126 y= 2 119 110 z=2852msn.

El predio pertenece al grupo Tleloyotli formado por los dueños del paraje Huey Teococh y pobladores de San Miguel Canoa. Este grupo surge como una medida para controlar la tala inmoderada, y por ello forman el CENTRO AGROPECUARIO INTEGRAL DEL GRUPO TLEYOLOTLI (CAIT).

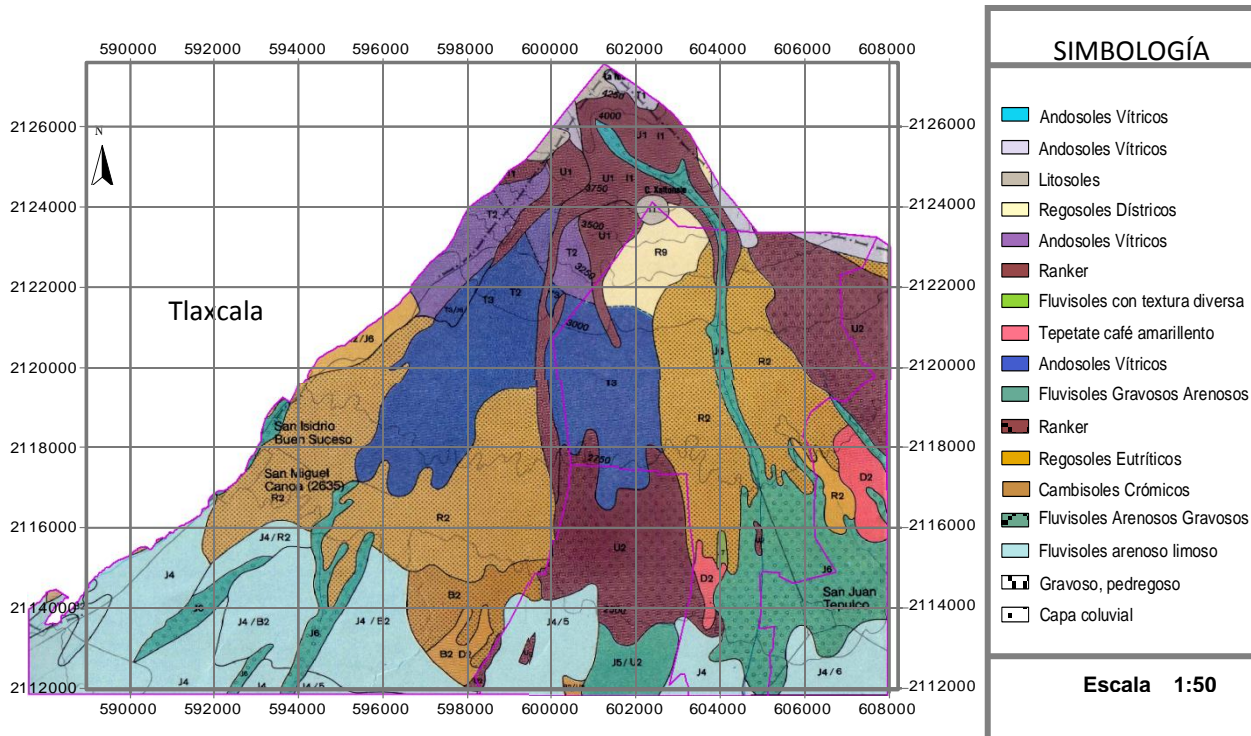
## **II.2 Aspectos físicos**

**II.2.1. Orografía.** La Malinche es un volcán apagado con una altitud de 4,461 msnm. Es notable por las rocas descubiertas de su cima, y está formado por desprendimientos de la Sierra Nevada. Sus faldas inferiores se tienden con pendientes poco pronunciadas sobre un gran altiplano en un radio de 134 Km, en tanto que sus laderas centrales, desde 3,300 msnm, son pronunciadas y se levantan hasta los 4,460 msnm (INEGI, 1986).

Al pie del monte, en las localidades de Canoa y La Resurrección, encontramos terrenos ondulados conformado por lomeríos y cañadas, y cuyas partes más altas (cimas) tienen una altitud máxima de 2911 msnm.

**II.2.2. Geología.** El volcán La Malinche es de origen poligenético (formado por varios eventos eruptivos), su formación data del Mioceno (Castro, 2007). La estratigrafía del volcán está compuesta principalmente por depósitos piroclásticos: de composición dacítica andesítica (rocas ígneas extrusivas) (Castro y Siebe 2007) y tobas (rocas ígneas intrusivas). En México las rocas ígneas se producen, en condiciones de clima semihúmedo, suelos cuyo pH varía generalmente entre 5 y 7 (Aguilera *et al.*, 1962).

**II.2.3. Suelo.** El mapa de la Fundación Alemana para la Investigación Científica (Werner *et al.*,1976) denominado “Mapa de suelos de la Cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores” señala que los suelos predominantes en La Malinche son Andosoles, Regosoles, Litosoles, Fluvisoles, Cambisoles y Rankers (Cuadro II.1). El suelo de tipo Andosol, presente en la localidad de Canoa da cuenta de los suelos desarrollados sobre materiales volcánicos.



**Cuadro II.1** Mapa de suelos de la Cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores

**II.2.4. Clima.** Los principales tipos de clima según la clasificación Köppen modificada por Enriqueta García (2008) son: clima templado subhúmedo (C(w2)) con temperatura media anual entre (-3)12° C y 18° (22°) C; clima frío (E(T)CHw) con temperatura media anual entre -2° C y 5° (6.5°) C; y clima semifrío subhúmedo (Cb'(w2)) con verano fresco largo y con temperatura media anual entre (-3)5° C y 12° (22°) C. 4).

De acuerdo al gradiente altitudinal donde se localiza el lugar de estudio, entre 2,500 a 3,000 msnm, predomina el clima templado subhúmedo, la temperatura media anual varía entre 10 y 16° C, siendo los meses de marzo o julio los más calurosos; la precipitación media anual oscila entre 700 y 1,000 mm; con precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, existe un régimen de lluvias en verano, es decir durante los meses de junio, julio, agosto y parte de septiembre y con un rango de frecuencia de heladas que va de 40 a 60 días. El régimen de humedad del suelo en la región es ústico, por lo que tiene agua disponible en verano (90 días consecutivos), durante el período de crecimiento

de la planta, y de 180 a 270 días acumulativos por año. De manera que en invierno y a finales de verano puede haber una cantidad limitada de agua (Ríos, 2014).

**II.2.5. Hidrografía.** La zona estudiada forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Río Atoyac-Zahuapan. Presenta una sola corriente permanente, denominada Río Barranca de La Malinche, la cual se origina en el lado este del volcán, atravesando el Municipio de Trinidad Sánchez. Las demás corrientes son temporales: El Río Apizaco, al Noroeste; el Río San Juan, al Oeste; el Río Barranca Seca; el Río Barranca de la Soledad y el Río Barranca Hejotitla, al Suroeste (INEGI, 1986).

El nivel freático de las aguas subterráneas en La Malinche es relativamente poco profundo, sobre todo a altitudes menores de 3,000 msnm, pues el material consolidado de los suelos tiene un alto grado de permeabilidad; por el contrario, a altitudes mayores, el material consolidado tiene un bajo grado de permeabilidad.

Las fuentes de abastecimiento y el volumen de extracción promedio de agua potable en los estados de Tlaxcala y Puebla, nos demuestran la gran importancia que tiene esta zona de la Malinche como abastecedora del vital líquido, sobre todo a partir de los mantos freáticos. (Gobierno de los Estados de Tlaxcala y Puebla, 2002).

### II.3. Aspectos Biológicos

**II.3.1. Vegetación.** INEGI (2009) reporta siete tipos de vegetación, con un predominio de bosque de coníferas (follaje perenne) en buen estado de conservación (Arriaga *et al.*, 2000). Es característico un horizonte de humus de 10 a 30 cm, y el suelo se halla siempre cubierto de hojas de pino, las micorrizas juegan un papel en la supervivencia y en el potencial competitivo de estos bosques (Rzedowski, 2006).

Sin embargo en el predio de Canoa, el bosque se ha desplazado casi en su totalidad, cambiando el uso de suelo por agricultura de temporal de maíz, frijol y haba, y en menor proporción por árboles frutales como durazno, pera y tejocote; y por plantaciones de *Pinus*, principalmente de *P. hartwegii*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. oxacana*, además de *Cupressus sp.*, aunque también se encuentran remanentes de bosque alterado de oyamel (*Abies religiosa*), nombrado “Bosque de Cooper”.

En el predio Huey Tecoch se pueden identificar tres estratos: el estrato herbáceo, compuesto por gramíneas (*Epicampes macroura* y *Muhlenbergia macroura*), también *Lupinus montanus*, *Cirsium sp* y *Salvia elegans*; en el estrato arbustivo se puede encontrar, *Senecio saligmis* (azomiate), *Buddleia microphyla*, y *Eryngium monocephalum*; en el estrato arbóreo aile o ilite *Alnus firmifolia* y *Alnus jorullensis*, además de *Abies religiosa*, así como las especies de las plantaciones antes mencionadas.

**II.3.2. Fauna.** La Malinche un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA C-52), se han identificado 111 especies (Arriaga *et al.* 2000). Entre éstas se encuentra la aguililla de cola roja (*Buteo jamaicensis*), el tecolote (*Bubo virginianus*) y el gavilán de cooper (*Accipiter cooperii*).



Se han encontrado siete especies de anfibios y 14 de reptiles. Destacan la serpiente de cascabel enana (*Crotalus ravus*), la serpiente de cascabel (*Crotalus triseriatus*), y el camaleón (*Phrynosoma orbiculare*) (Sánchez, 2005 citado en López, n.d).

En Biodiversidad del Parque Nacional Malinche-Tlaxcala se mencionan 37 especies de mamíferos. Destacando la ardilla (*Sciurus aureogaster*), el cacomixtle (*Bassariscus astutus*), la zorra (*Urocyon cinereoargenteus*), el tejón (*Nasua Nasua*), el conejo teporingo (*Romerolagus diazi*), el zorrillo (*Mephitis macroura*) y el coyote (*Canis latrans*).

**II.4. Actividades Socio-económicas.** El Parque Nacional Malinche como área natural esparce su influencia hacia 460 000 pobladores residentes de municipios y localidades alejados de este, tanto urbanas como rurales, generando un complejo sistema de vínculos ambientales, por lo que este estrato volcán ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de grupos humanos, siendo fuente de recursos naturales como agua, animales, plantas, madera, etc.; además de funcionar como regulador del clima y motivando el desarrollo agrícola (Licona *et. al*, 2013).

**II.4.1. Demografía.** San Miguel Canoa, Junta Auxiliar donde se encuentra la zona de estudio, es un pueblo de origen nahua que se localiza en las faldas del volcán La Malinche, y cuenta con una población de 15 000 habitantes, según datos del Censo de Población y Vivienda 2010, del INEGI, predominando La lengua indígena Náhuatl (Gobierno de los Estados de Tlaxcala y Puebla, 2002).

**II.4.2. Actividades Agrícolas.** La mayor parte de la población de Canoa, se dedica a actividades del campo en pequeñas propiedades como es la agricultura de temporal, generalmente para autoconsumo, por lo que se pueden encontrar sembradíos de maíz, frijol, haba, trigo y alfalfa. En cuanto a los productos frutícolas se puede encontrar plantaciones de durazno, manzana, tocojote, capulín y pera.

**II.4.3 Ganadería.** Las especies principales en la región son bovinos, porcinos, ovinos, caprinos y aves. Existe la producción de otros productos pecuarios como leche y huevo. En las comunidades del volcán, la ganadería caprina es muy común y se alimenta con pastos de las zonas deforestadas a las que, durante la época de sequía, se les prende fuego para esperar el rebrote en la época de lluvia.

**II.4.4. Silvicultura.** Oficialmente no se reporta ninguna actividad silvícola para la región, pero para los pobladores representa una actividad de autoconsumo, a partir del aprovechamiento de ramas y árboles aislados para la obtención de leña.

Algunas comunidades de la zona aprovechan los productos maderables como tablas, polines, cercas, etc., de hecho, una gran parte de los volúmenes de leña y carbón que se comercializa en las localidades vecinas, no es sino subproductos del aprovechamiento ilegal de árboles en pie.

La mayor explotación se ha desarrollado sobre el bosque de pino-encino, por lo que este bosque se encuentra fuertemente perturbado. Las comunidades locales utilizan los recursos forestales maderables para la fabricación de muebles, cercas y postes y, en el caso del encino, para elaborar carbón vegetal y leña.

### **CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente trabajo es, inicialmente, un estudio de tipo correlacional (Hernández, Fernández-Collado y Baptista, 2006), pues tiene como propósito medir la relación que existe entre el Uso del Suelo (variable independiente), el Cambio de la Calidad de Suelo y sus propiedades hidrológicas (variables dependientes). Para finalmente, en un esfuerzo por ir más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos, responder a las causas de los eventos físico-ambientales, centrando el interés en explicar por qué dos o más variables indicadoras de la Calidad de Suelo están relacionadas con su uso, dando de esta forma una utilidad práctica a los resultados al determinar si el Uso del Suelo y la Calidad, pueden ser considerados como determinantes en la captación de agua por el sistema y su ciclo hidrológico. Es decir, aunque inicialmente este trabajo y sus primeros objetivos, lo sitúan como una investigación correlacional, sin embargo y con base al objetivo final que se persigue, concluye siendo explicativa (Hernández, Fernández-Collado y Baptista, 2006).

Una vez que se ha definido el tipo de estudio a realizar, es primordial el establecimiento del método de investigación para aplicarlo al contexto particular de este estudio. Es decir, el plan o estrategia concebida para responder a las preguntas de investigación.

En este caso el método de investigación que mejor responde a las características de las variables que se analizan es el cuasiexperimental, puesto que los sujetos (los suelos) no pueden ser asignados al azar a los grupos (bosque natural, plantación forestal y agricultura de temporal), ni emparejados; sino que dichos grupos ya estaban formados antes del experimento, son grupos intactos (la razón por la que surgen y la manera como se formaron fueron independientes del experimento) (Hernández, Fernández-Collado y Baptista, 2006). El método a utilizar también se puede clasificar como analítico y comparativo, ya que la obtención de información se hará a partir del análisis de forma directa de propiedades físicas y químicas del suelo en el laboratorio (Textura, Color, Densidad Aparente, pH, % de Carbono y Nitrógeno Orgánicos, contenido en Bases del Suelo y Capacidad de Intercambio Catiónico, etc.), o directamente en el campo (Estructura, Resistencia a la Conductividad Eléctrica, etc).

Teniendo en cuenta que el suelo funciona como compartimiento ambiental que actúa como medio de captación de agua para el acuífero (población en estudio), es un sistema fisicoquímicamente poli-disperso muy complejo (Shaw, 1992). Es decir formado de fases sólida (minerales y materia orgánica), líquida (solución acuosa del suelo) y gaseosa (atmósfera del suelo), donde el medio de dispersión es también muy heterogéneo, no se podrían obtener resultados válidos si se comparan propiedades de diferentes tipos de suelos, por lo que en este trabajo se efectuará la comparación entre suelos cuya composición químico mineralógica sea lo más homogénea posible, por lo que solo se compararan las propiedades entre suelos del mismo tipo, esto pasa a ser una constante en el experimento, sin embargo los resultados del mismo solo serán válidos, comparables o reproducibles para el tipo de suelo que fue seleccionado, que en este caso

es Andosol (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) o Andisol (Soil Survey Staff, 2010). Al ser estos suelos específicamente derivados de rocas volcánicas efusivas (cenizas volcánicas, tobas volcánicas, lapilli, etc.) el origen geológico del sustrato también es relativamente homogéneo y por consiguiente constante.

Con respecto a otras condiciones ambientales como el clima y la vegetación, estas también son constantes en función de que la región estudiada es correspondiente a Bosque de Coníferas y Encinos de clima templado sub-húmedo (Challenger, 1998; Challenger y Soberón, 2008).

Finalmente, el uso del suelo determina también las condiciones ambientales en el sistema, su cambio, de bosque a sistema agrícola y después a plantación forestal, modifica las propiedades indicadoras de la Calidad del Suelos, de Calidad Inherente a Calidad Dinámica.

En resumen, para la realización de este proyecto se hará una comparación entre dos usos de suelo: forestal y agrícola, y tres grupos de cobertura de vegetación: bosque natural, plantación forestal y agricultura de temporal, se seleccionó como estudio de caso el predio denominado Huey Tecoch, ubicado dentro del Parque Nacional Malinche. Para ello se analizarán características físicas y químicas del suelo, las cuales determinarán la calidad del mismo, así como un análisis del comportamiento de la humedad en la región seleccionada, por lo que se ha dividido el trabajo de investigación de la siguiente manera:

- Trabajo de Gabinete
- Trabajo de Campo
- Trabajo de Laboratorio

## II.1 Trabajo de Gabinete

- **Delimitación de la zona de estudio.** Una de las primeras acciones a realizar fue la elaboración de un análisis geográfico y zonificación de la región de estudio a partir de imágenes satelitales tomadas del programa informático Google Earth y de material cartográfico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) tales como: cartas topográficas, fisiográficas, y edafológicas en diferentes escalas y la carta edafológica de la Fundación Alemana para la Investigación Científica a escala 1:100000. Usando como herramienta el programa ArcView GIS versión 3.1.
- **Delimitación de usos de suelo y vegetación.** Después de obtener la ubicación de la región, se realizó la delimitación de las zonas de bosque natural, plantación forestal y agricultura de temporal presentes en la región, a partir de la zona delimitada, y de acuerdo a la imagen satelital tomada del programa informático Google Earth. La información se digitalizó con ayuda del programa ArcView GIS versión 3.1.

- **Delimitación del área de muestreo.** Posterior a la delimitación de uso de suelo y vegetación se estableció el diseño muestral de acuerdo a los usos de suelo identificados, por lo que se establecieron tres bloques: bosque natural, plantación forestal y agricultura de temporal.

## II.2 Trabajo de Campo

### II.2.1 Evaluación en campo de la distribución y del comportamiento estacional del agua del suelo.

- **Selección de sitios para la colocación de los medidores de humedad del suelo.** Para la colocación de los medidores de humedad se seleccionaron dos zonas representativas: Bosque Natural y Plantación forestal, esto de acuerdo al análisis geográfico y del uso de suelo que se observó en la región de estudio. La zona con menor perturbación es el bosque natural, y donde los suelos conservan su vocación forestal. Los sitios de plantación forestal, son suelos que presentaron uso agrícola, por lo que aun presentan un grado de degradación debido a su uso. Es importante mencionar que la zona agrícola no se seleccionó para medir la humedad del suelo, debido a que este lugar presenta un constante manejo del suelo, por lo que el experimento sería perturbado. En ambas zonas se distribuyeron cinco estaciones de medición, cada una conformada por dos sensores (electrodos concéntricos rodeados de yeso), y a profundidades de 1m y 0.5 m, las estaciones son:

**-Estación 1:** Ubicada en las coordenadas (UTM) X: 0598316 Y: 2119267, y a una altura de 2865 msn, en un terreno ondulado con una pendiente no mayor a 60°, perteneciente a la zona de Bosque Natural. La vegetación del lugar corresponde en mayor medida a *Pinus montezumae* y *Abies religiosa*

**-Estación 2:** Se ubica en las coordenadas (UTM) X: 598396, Y: 2119202 a una altura de 2865msn. El terreno es semi ondulado, con una pendiente no mayor a 10°, en el lugar se encuentra una plantación de *Pinus pátula*. Anteriormente esta zona era destinada a la agricultura.

**-Estación 3:** Estación ubicada en un terreno ondulado con pendientes poco pronunciadas (no mayor a 30°), en las coordenadas (UTM) X: 598657, Y: 2119103 con una altura de 2879msn. La estación se encuentra en la zona correspondiente al Bosque Natural, donde se puede ver la presencia dominante de *Abies religiosa* (*oyamel*).

**-Estación 4:** Ubicada en las coordenadas (UTM) X: 598045, Y: 2118712 a una altura de 2814msn. El punto se localiza en la zona de Plantación Forestal, este lugar fue reforestado en el año 2008, con diferentes especies de Pinos, el terreno es ondulado con una pendiente no mayor a 35°.

**-Estación 5:** Se encuentra localizada en el lugar llamado Huey Tecoh (hoyo grande) a una profundidad de 80 m aproximadamente. El sensor está ubicado en un terreno plano con un radio aprox. de 80 m, en las coordenadas (UTM) X 598233, Y 2118915 a una altura de 2837msn. La vegetación presente en la zona

corresponde al tipo arbustiva, y en las laderas se encontró la presencia de algunos pinos, ailes o ilite y oyameles.

- **Colocación de sensores para medir la humedad presente en el suelo:** El equipo usado para medir la humedad en el suelo fue Delmhorst Modelo KS-D1, el cual consiste en electrodos concéntricos cubiertos de yeso. Para la colocación de los sensores se siguieron los siguientes pasos:
  1. Previo a la colocación de los bloques se dejaron remojando en agua destilada por una hora, para posteriormente dejar secar (esto se realizó un día antes a la fecha de instalación o siembra).
  2. Antes de la siembra de los bloques, cada sitio fue georeferenciado con ayuda del geoposicionador Garmin 12XL (marca: COMPENS, modelo: 7003).
  3. Para realizar la siembra se remojaron los bloques nuevamente en agua destilada, durante 3 minutos, esto con la finalidad de mejorar el contacto con el suelo.
  4. Se cavaron dos orificios con ayuda de una barrena de perforación manual, a la profundidad de 0.5 m y 1m.
  5. El suelo extraído se colocó sobre una superficie plástica, procurando no mezclar los horizontes del suelo.
  6. Después se introdujo el bloque a la parte inferior del agujero, con ayuda de una varilla ranurada.
  7. Posteriormente se procedió a llenar el agujero, siguiendo el orden del suelo extraído procurando no alterar los horizontes.

Para la identificación de cada uno de los bloques, se colocaron estacas, en esta, fueron fijados e identificados los cables, con cinta de color azul (0.5m) y rojo (1m) esto con la finalidad de encontrarlos fácilmente y mantenerlos limpios para las mediciones. Así mismo en cada estaca se colocaron las fechas de la siembra, así como la ubicación (coordenada UTM) y nombre de la estación, tal como se muestra en el Cuadro III.1



**Cuadro III.1** Identificación de bloques medidores y estaciones

- **Recolección de datos.** Las mediciones de la resistencia del suelo a la conductividad eléctrica se realizaron de una forma periódica durante 4 meses, por

lo que solo se logró cubrir parte de los periodos climáticos regionales de estiaje y lluvias.

La recolección de datos se realizó de la siguiente manera:

1. Se comprobó la calibración del medidor, el cual debía de señalar 80,0 + -1-0
2. Los extremos estañados de los hilos conductores del bloque se colocaron en los bornes con resorte del medidor
3. Finalmente se obtiene la lectura.

Todos los datos recolectados, fueron anotados en bitácora, registrando fecha, hora, estación y profundidad. Las lecturas que se encontraron fuera del rango de 5,0 a 100,0, se descartaron, esto de acuerdo a lo señalado por el manual del equipo usado.

Los resultados proporcionados por el equipo de medición, se analizaron por el método geoestadístico de Kriging Ordinario (Krasilnikov et al., 2008), el cual consiste en una serie de interpolaciones donde habrá una coincidencia exacta entre los valores interpolados y los puntos de datos originales (Peña, 2006). Para ello se usó el software Surfer v. 8., obteniendo las imágenes de los variogramas, para describir la distribución de la humedad en la región de estudio.

### **II.2.2. Determinación de indicadores físicos de calidad de suelo en campo.**

Se realizaron las determinaciones de textura al tacto, y estructura del suelo, además se tomaron muestras de suelo en núcleos, con las cuales se realizó la determinación de densidad aparente en el laboratorio (USDA, 1999). A continuación se explicara la determinación de estructura del suelo, la textura y densidad aparente se mencionan más adelante.

La estructura del suelo se refiere a unidades compuestas de partículas primarias (Soil Survey Division Staff, 1993), dichas unidades son llamados agregados, unidades estructurales o peds.

El grado de la estructura se estimó observando la nitidez en la definición de las unidades (forma y tamaño), así como la resistencia que demostraron al ser separados cuando se someten a presión entre los dedos pulgar e índice (grado de desarrollo); para caracterizar esta propiedad se usaron los términos relativos: *débil*, *moderada* y *fuerte*, para indicar la menor o mayor resistencia que ofrece el ped a su destrucción. Para aquellos suelos que no presentan estructura se usó el término *suelta* (Jaramillo, 2002), para describir la nitidez en las unidades se aplicaron los términos: laminar, prismática, columnar, bloques angulares, bloques sub angulares, granular o migajosa (Soil Survey Division Staff, 1993).

**II.2.3. Toma de muestras de suelo para la evaluación de los indicadores físicos y químicos de la Calidad de Suelos.** Con ayuda del mapa base se identificaran cada una de las zonas de muestreo, esto de acuerdo al uso de suelo, por lo que se dividió la zona de estudio en tres bloques: Plantación Forestal (P1...n), Agricultura de temporal (A1...n), y Bosque Natural (B1...n y O).

Para la toma de muestras se trazó una línea en zigzag tratando de cubrir toda la unidad de muestreo, en cada una de las zonas pertenecientes a los diferentes bloques. En cada punto se tomaron muestras simples, las cuales consisten en un volumen de suelo representativo, que se obtiene con una sola extracción, tales muestras fueron obtenidas a una profundidad de 20 cm, con ayuda de un barreno de perforación manual.

Después de obtener cada una de las submuestras de una determinada área, se homogenizaron para formar una muestra compuesta, obteniendo una cantidad de 1kg de muestra compuesta para cada una de las zonas pertenecientes a cada uno de los bloques (Plantaciones Forestales, Agricultura de temporal y Bosque Natural), y obteniendo un total de 25 muestras, estas fueron etiquetadas y almacenadas para su posterior análisis en laboratorio.

### **II.3. Trabajo de Laboratorio**

**II.3.1. Evaluación en el Laboratorio de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo.** Las muestras de suelo fueron procesadas en los laboratorios del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias de la BUAP. Antes de caracterizar las muestras de suelo, estas se secaron durante el tiempo necesario bajo techo y a temperatura ambiente. Posteriormente las muestras fueron tamizadas (tamiz malla No.10, apertura de malla de 2 mm), etiquetadas y almacenadas adecuadamente. La caracterización física y química de las muestras de suelo se realizó considerando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, así como bibliografía complementaria para cada determinación. Las propiedades que se determinaron son:

- PROPIEDADES FÍSICAS
  - Densidad Aparente
  - Textura del suelo
  - Color del Suelo
- PROPIEDADES QUÍMICAS
  - pH (medido en agua y KCl) y  $\Delta$ pH (Delta pH)
  - Contenido de Materia Orgánica y Carbono orgánico
  - Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)
  - Nitrógeno Total
  - Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y bases intercambiables, Na, K, Ca y Mg
  - Porcentaje de Saturación en bases Na, K, Ca y Mg

**a) Determinación de densidad aparente por el método del núcleo (USDA, 1999).**

Para la determinación de la densidad aparente se utilizó el método del cilindro o núcleo (Soil Quality Institute Staff, 1999), con la ayuda de una pequeña tabla y un martillo, se golpeó uniformemente un cilindro de volumen conocido (7.5 cm de diámetro por 6 cm de alto, aproximadamente) hasta quedar enterrado completamente en el suelo; se sacó con cuidado utilizando pala y cuchillo y se eliminó el suelo que sobresalía del cilindro. Las muestras dentro del cilindro se protegieron con tapas rotuladas de papel aluminio, se



metieron en bolsas de polietileno y se cerraron perfectamente para evitar pérdidas de humedad y para conservarlas sin disturbar durante su transporte. Ya en el laboratorio, los cilindros con suelo se pesaron, se metieron en una estufa a 105 °C durante 48 h y se volvieron a pesar. El cálculo de densidad aparente se determinó al dividir el peso seco de las muestras entre el volumen del cilindro.

**b) Densidad aparente por el método de la probeta (Palmer y Troeh, 1980).** Para esta determinación se pesó una probeta de 10 ml vacía, posteriormente se agregó suelo hasta los 10 ml y se golpeó ligeramente (unas 10 veces).

A continuación se agregó suelo nuevamente hasta completar los 10 ml, después se procedió a pesar la probeta con el suelo. Para la realización de cálculos se procedió de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{peso del suelo}}{\text{volumen}} = \frac{\text{gr}}{\text{ml}}$$

**c) Determinación de textura del suelo al tacto.** Esta determinación es importante, para caracterizar la textura de suelos difíciles de dispersar como son los Andisoles o los Oxisoles, por lo que la textura al tacto puede resultar más confiable que la determinada en laboratorio por métodos convencionales.

Este método consiste en establecer la clase textural del suelo, basada en la observación de la respuesta de éste al ser sometido a manipulación en diferentes estados de humedad, la cual está directamente relacionada con la proporción en que están presentes los diferentes separados que lo componen (arena, limo y arcilla) (Jaramillo, 2002).

Algunas de las propiedades que se observaron para establecer la clase textural del suelo al tacto son: la sensación que se produce al frotar la muestra entre los dedos, la facilidad de formar cintas y bolas con la muestra y la firmeza de ellas, así como la adhesividad o pegajosidad de la muestra al ser sometida a compresión entre los dedos y posteriormente al ser liberada esta compresión.

La textura del suelo tiene especial significado en: aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, uso y manejo (Jaramillo, 2002).

**d) Determinación de color utilizando la carta Munsell de colores de suelos.** La determinación del color de suelo se llevó a cabo mediante el uso de las Tablas de Color Munsell, a través del método AS-22 de la NOM-021-RECNAT-2000, el cual consiste en comparar una muestra de suelo seco con las placas de colores que componen cada una de las cartas disponibles en la tabla; esta comparación se hizo colocando la muestra en la ventana que se encuentra entre las placas coloreadas, estudiando varias alternativas, hasta que se encontró la placa que coincidió, lo más cerca posible, con el color de cada muestra de suelo. Este mismo procedimiento se realizó con muestras de suelo húmedo.

**e) pH y ΔpH (Delta pH).** Este análisis se realizó a través del método AS-02 y AS-24 medido con potenciómetro (Potenciometro: Conductronic pH 20) de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, utilizando una relación suelo-agua (ó KCl 1N) de 1:2. En un frasco pequeño se pesaron 10 gramos de suelo y se agregaron 20 ml de agua destilada, luego se agitó durante 30 minutos a 150 rpm e inmediatamente después se leyó el pH. Este mismo procedimiento se hizo para una solución de Cloruro de Potasio 1 N.

El ΔpH se obtuvo realizando la siguiente operación:

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$$

**f) Determinación de materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico.** Para determinar el contenido de materia orgánica en las muestras de suelo, se siguió el método de Walkley y Black establecido en la NOM-021-RECNAT-2000.

El método usado determina el carbono orgánico contenido en los suelos por combustión húmeda y el cual consiste en la oxidación del carbono orgánico presente en la muestra por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un tiempo de espera (30 min.) se adiciona ácido fosfórico y el dicromato residual es valorado con sulfato ferroso. Para obtener los porcentajes de %M.O. y % de Carbono se usaron las siguientes formulas:

$$\% \text{ de M. O} = \frac{5 - (\text{ml. de FeSO}_4 * N_{\text{real}})}{\text{g de muestra}} * 0.69$$

Donde N real es:

$$N_{\text{real}} = \frac{10 * 0.5}{\text{ml. de SO}_4 \text{ (gastados en el blanco)}}$$

$$\% \text{ de Carbono} = \frac{\% \text{ M. O.}}{1.724}$$

**g) Relación Carbono-Nitrógeno (C/N).** La relación C/N se obtuvo de dividir el porcentaje de carbono orgánico entre el porcentaje de nitrógeno total de cada muestra.

**h) Determinación de nitrógeno total en el suelo.** El método usado para esta determinación fue el de micro Kjeldahl de acuerdo al método AS-25 de la NOM-021-RECNAT-2000, el cual implica la conversión de nitrógeno a sulfato ácido de amonio mediante la digestión de suelo con ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador. Una vez terminada la digestión, la mezcla se neutraliza agregando solución de hidróxido de sodio al 50 % y se pone a destilar. El destilado se va depositando en un matraz que contiene ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) al 4 % y 5 gotas de indicador mixto; por último, se titula con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N. El porcentaje de nitrógeno total se calcula con la fórmula que aquí se muestra:

$$\%N \text{ total} = \frac{(V_m - V_b) * N * 14}{p * 10}$$

Donde:

V<sub>m</sub>= Volumen de ácido sulfúrico empleado en titular la muestra

V<sub>b</sub>= Volumen de ácido sulfúrico empelado en titular el blanco

N= Normalidad exacta del ácido sulfúrico

14= Peso equivalente del nitrógeno

10= Factor de conversión a porcentaje

p= Peso de la muestra de suelo en g.

**i) Determinación de capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>.** La determinación se realizó siguiendo el método AS-12 con acetato de amonio 1N pH 7, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, el cual consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el ion amonio. Después de la saturación el exceso de saturante es lavado con alcohol para posteriormente hacer un desplazamiento del catión índice con potasio y determinar el amonio mediante destilación. El destilado recolectado se tituló con HCl 0.01N. Los resultados se obtuvieron a partir de la siguiente formula:

$$CIC = 100(V)(N)$$

Donde:

V= volumen (ml) de HCl empleado al titular la destilación en la solución borada

N= normalidad de HCl

Para determinar Ca, Mg, Na y K intercambiables se realizó de acuerdo al método AS-12, y los cálculos realizados se hicieron de acuerdo a lo señalado por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo:

$$\text{meq} \frac{M^+}{100g} = \frac{100}{\text{peso de suelo (g)}} * \frac{\text{Vol. del extracto (ml)}}{1000} * \text{meqM}^+/1$$

**j) Determinación del porcentaje de saturación de bases Na, K, Ca y Mg.** Se cuantifico de acuerdo al método AS-21 de la NOM-021-RECNAT-2000.

$$\% \text{ de saturacion en bases} = \frac{\text{suma de bases intercambiables (Cmol(+)Kg}^{-1})}{CIC \text{ (Cmol(+)Kg}^{-1})}$$

#### II.4. Análisis estadístico de los resultados.

Después del análisis de laboratorio y de realizar los cálculos correspondientes, se procedió al análisis estadístico inferencial, el cual consiste en la aplicación de pruebas de hipótesis estadísticas para comparar las medias de los diferentes indicadores de Calidad

de Suelo, por ello se consideraron tres bloques de muestras (bosque natural  $B_{1...n}$ , plantación forestal  $P_{1...n}$  y agricultura de temporal  $A_{1...n}$ ).

Se utilizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA one-way) para probar la hipótesis nula  $H_0: \mu_B = \mu_P = \mu_A$  contra la alternativa de que alguna de las medias fuera diferente. Este análisis de varianza tiene una clasificación donde el factor (suelo) tiene tres niveles o bloques.

Nivel B= Bosque natural

Nivel P= Plantaciones forestales

Nivel A= Agrícola

Para ello se utilizó el programa MINITAB 14 (2003) y se consideró un nivel de significancia de un 5% ( $\alpha=0.05$ ) con un intervalo de confianza del 95%. Para rechazar la hipótesis nula se comprobó que el nivel de significancia obtenido en el análisis estadístico (P) fuera menor a  $\alpha = 0.05$ , con lo que se comprueba una diferencia significativa entre las medias de los bloques de estudio.

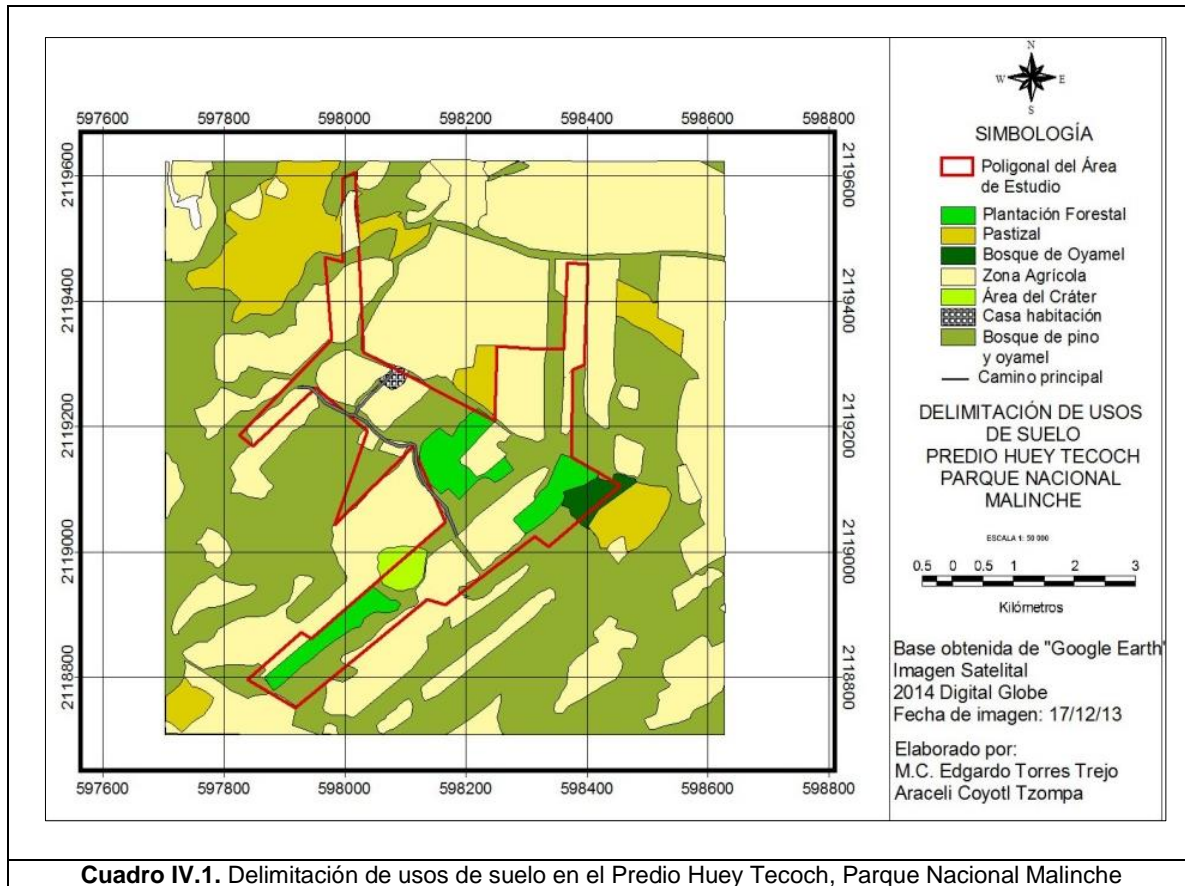
Por el contrario si el valor de  $P>0.05$  no existe diferencia significativa entre alguna de las medias de los bloques de estudio y la hipótesis alternativa se rechaza.

Previo a estos análisis se llevó a cabo los análisis exploratorios univariados correspondientes con el fin de hacer transformaciones en las variables que lo requerían para conseguir normalidad (Linares, 1990).

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1 Delimitación de la zona de estudio, uso de suelo y vegetación.

Se identificó la región se estudió Huey Tecoch, dentro del Parque Nacional Malinche, posteriormente se delimitaron los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación presente, logrando identificar los siguientes bloques: Plantación Forestal, Pastizal, Bosque de Oyamel, Zona Agrícola, Área del Cráter y Bosque de Pino y Oyamel (Cuadro IV.1).



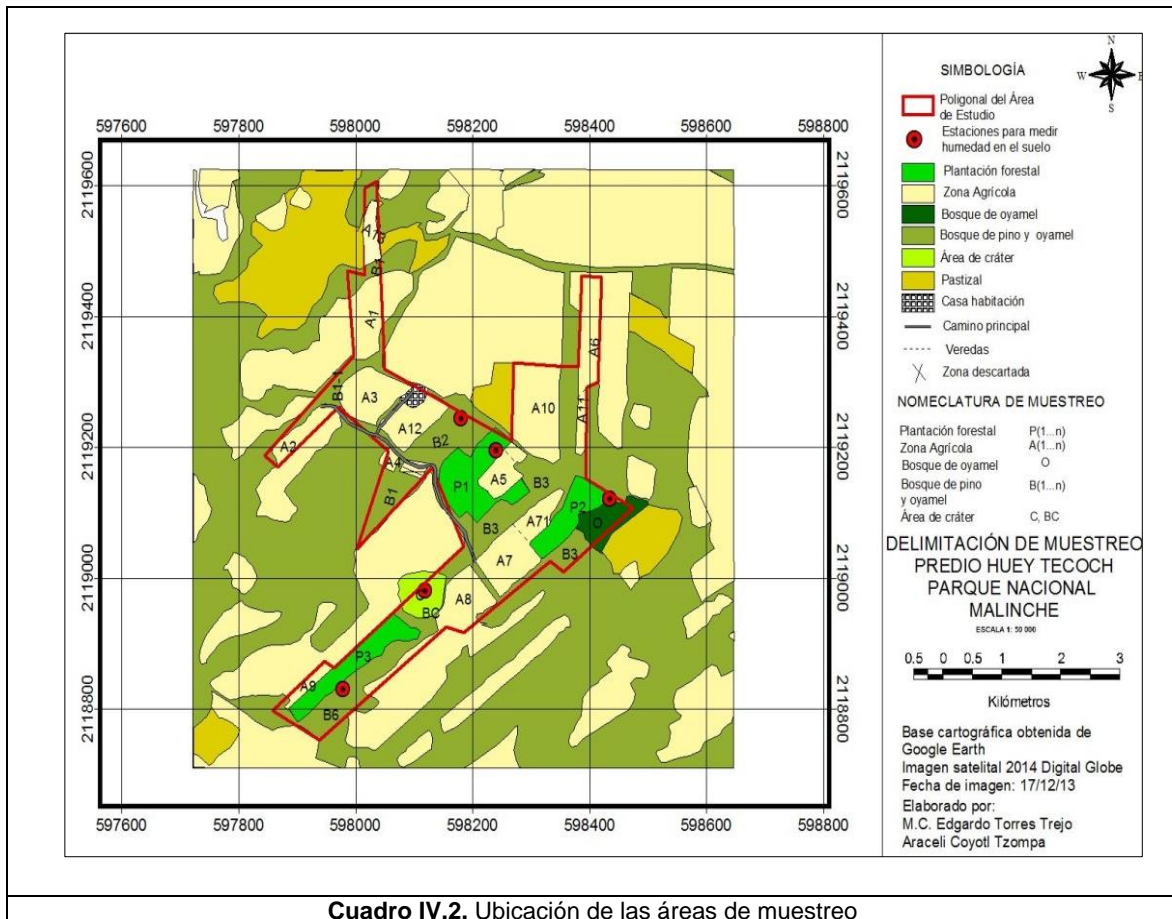
Las áreas de *Bosque de Oyamel*, *Cráter* y *Bosque de pino y oyamel*, son las regiones que presentan una menor perturbación por actividades antropogénicas siendo los lugares *Bosque de Oyamel* y *Área del Cráter*, los que conservan la mayor parte de la vegetación nativa, en conjunto con vegetación oportunista que surge como producto de los espacios vacíos que deja la tala o fuego. Algunas de estas especies son: el oyamel (*Abies religiosa*), te de monte (*Salvia elegans*), frambuesas (*Rubus idaeus*), flor de monte (*Cirsium sp*), aile o ilite (*Alnus firmifolia* y *Alnus jorullensis*), chicalotl (*Eryngium monocephalum*), etc. En la zona correspondiente a *Bosque de pino y oyamel*, se encuentran especies nativas de la región, en conjunto con especies sembradas en la misma zona, como son los *Pinus patula* y *P. montezumae*, además de *Abies religiosa* *P. hartwegii* y algunas especies de encino. Las áreas de Plantaciones Forestales,

corresponden a zonas de reforestación, con un tiempo aproximado de 7 años de siembra. En esta región se observan *Pinus*, principalmente de, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. oxacana*, además de *Cupressus sp.*

En la parte agrícola de la zona de estudio, se practica la agricultura de temporal y subsistencia obteniendo productos como; maíz, haba y frijol, y en menor proporción se encuentran árboles frutales de durazno, manzana y pera. Además se observó la presencia de ganado bovino y ovino, en ciertos lugares de esta zona.

#### IV.2 Diseño y localización de los puntos de muestreo.

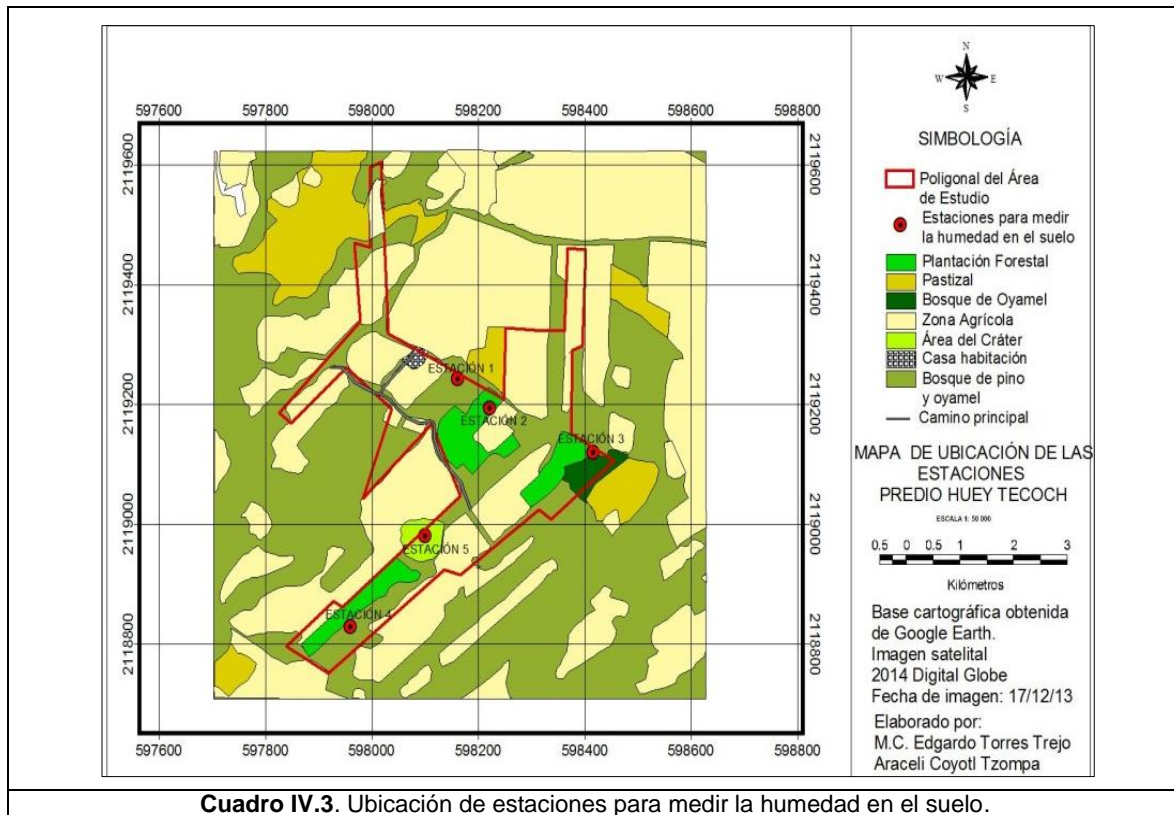
El diseño de muestreo se estableció en toda el área de estudio, la cual comprende una extensión de 25 hectáreas. El muestreo fue establecido por bloques: Bosque de pino y oyamel, Zona agrícola y Plantaciones forestales, obteniendo de esta forma muestras para cada uso de suelo presentes en la zona. El número de muestras simples establecidas para cada zona ( $B_{1...n}$ ,  $P_{1...n}$ ,  $A_{1...n}$ ) perteneciente a los distintos bloques de estudio (Bosque, Plantaciones forestales y Agrícola), fue de 10; para posteriormente formar una muestra compuesta por cada zona, obteniendo un total de 25 muestras (Cuadro IV.2).



Cuadro IV.2. Ubicación de las áreas de muestreo

### IV.3. Evaluación en campo de la distribución y del comportamiento estacional del agua del suelo.

La evaluación de la distribución y comportamiento de la humedad en el suelo, se realizó en base a las estaciones colocadas en el predio Huey Tecoch (Cuadro IV.3), las cuales fueron colocadas en base en función al uso de suelo y vegetación presente en la zona de estudio.



En cada una de las estaciones fueron colocados dos bloques para medir humedad, a las profundidades de 0.5m y 1m, por lo que se obtuvieron datos de 10 sensores, dos en cada estación. La recolección de datos se realizó durante los meses de Febrero a Junio, obteniendo en este último mes datos irrelevantes, esto como producto de la disolución de los bloques de yeso, por lo que dichos datos fueron descartados.

**IV.3.1 Análisis de la distribución de humedad en el suelo.** Con los datos obtenidos se realizó una representación de la modelación estocástica, mediante el Kriging Ordinario, del comportamiento de la humedad del suelo a dos profundidades, abarcando las temporadas de estiaje y lluvias. Estos datos fueron interpretados en porcentaje de humedad disponible en el suelo (Tabla IV.1), esto de acuerdo a los gráficos proporcionados en el manual Delmhorst.

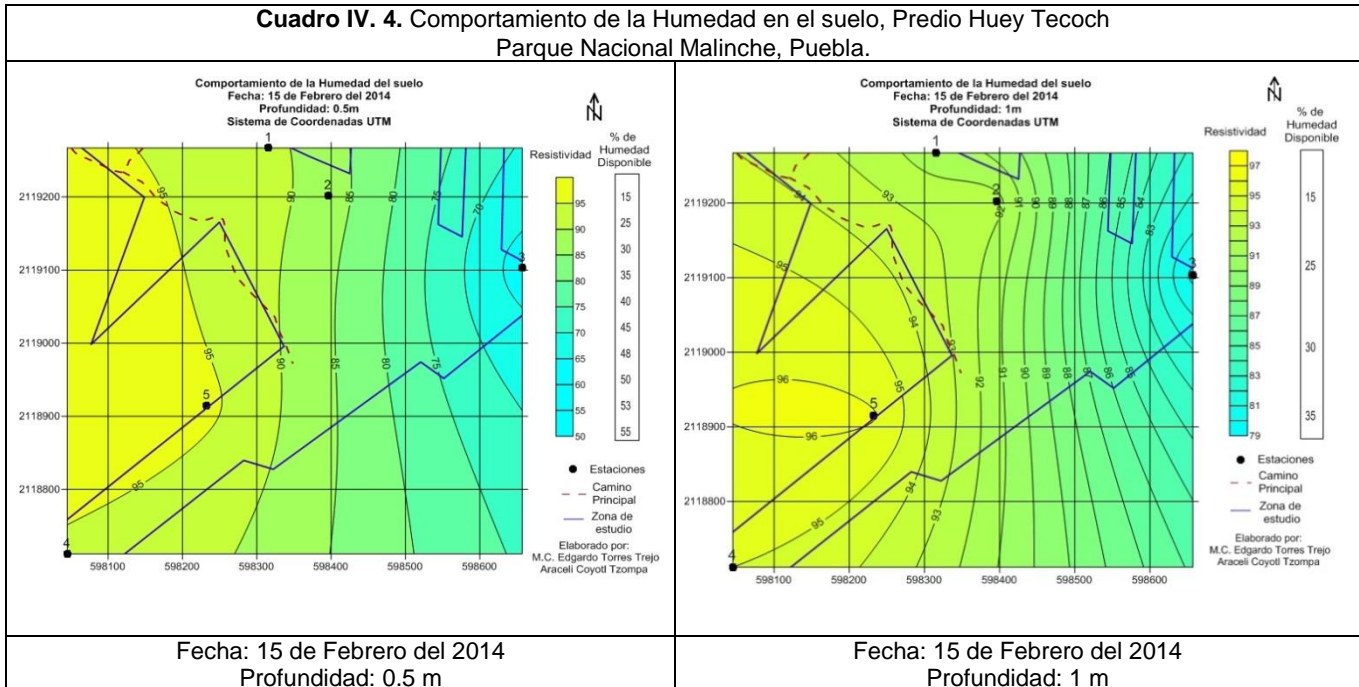
Se obtuvieron un total de 14 mapas, abarcando los meses de Febrero a Mayo, en el Cuadro IV.4 y IV.5 se muestran los mapas correspondientes a los meses de febrero y

marzo, época de estiaje. En los Cuadros IV.6 y IV.7 se presentan los variogramas de los meses de abril y mayo, propios a la temporada de lluvia.

**Tabla IV.1.** % de Humedad disponible en el suelo

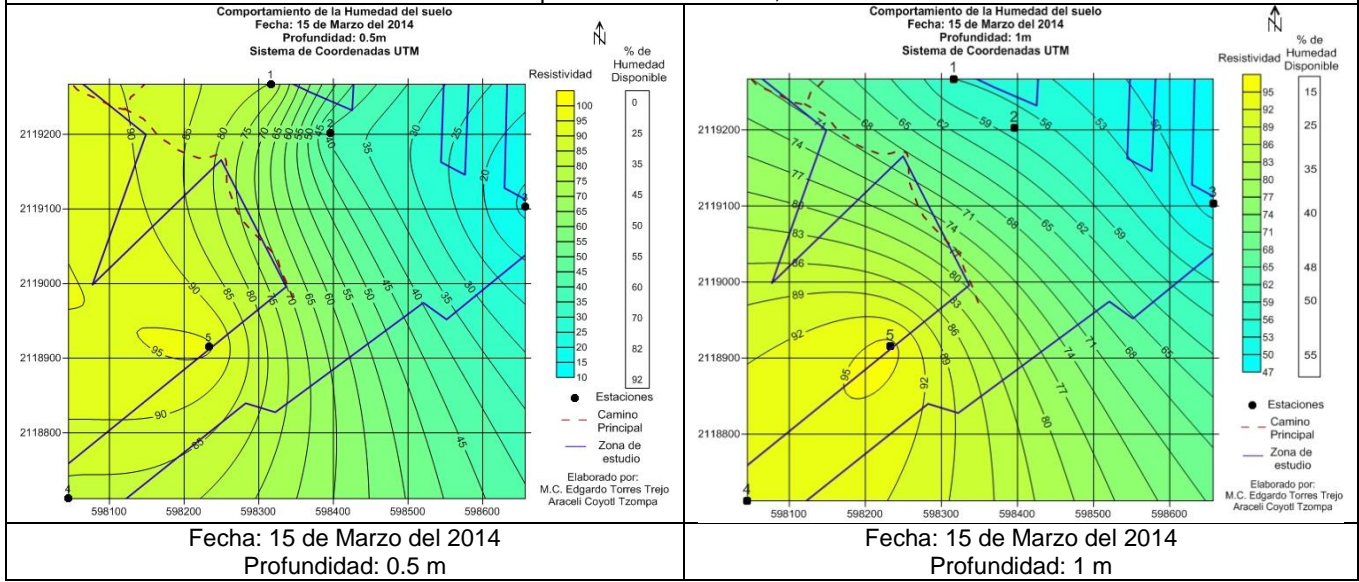
Escala de Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	% Humedad Disponible
100	0
95	15
90	25
85	30
80	35
75	40
70	45
65	48
60	50
55	53
50	55
45	58
40	60
35	65
30	70
25	75
20	82
15	85
10	92
5	95
0	100

**Cuadro IV. 4.** Comportamiento de la Humedad en el suelo, Predio Huey Tecoch Parque Nacional Malinche, Puebla.

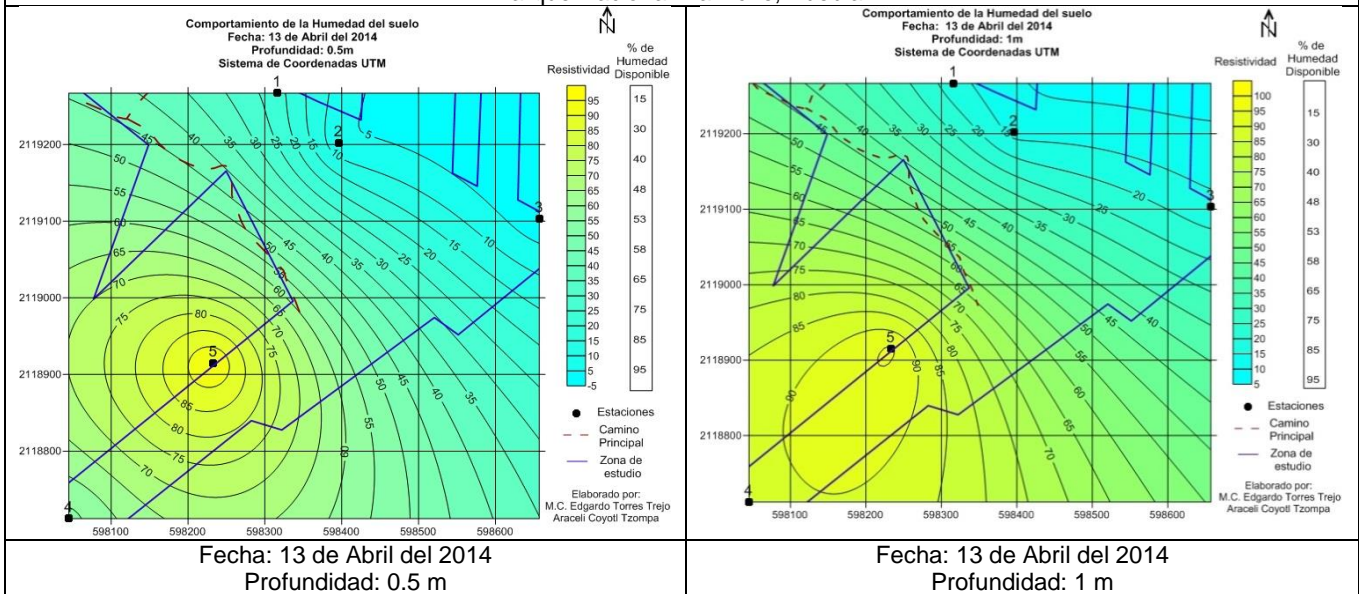




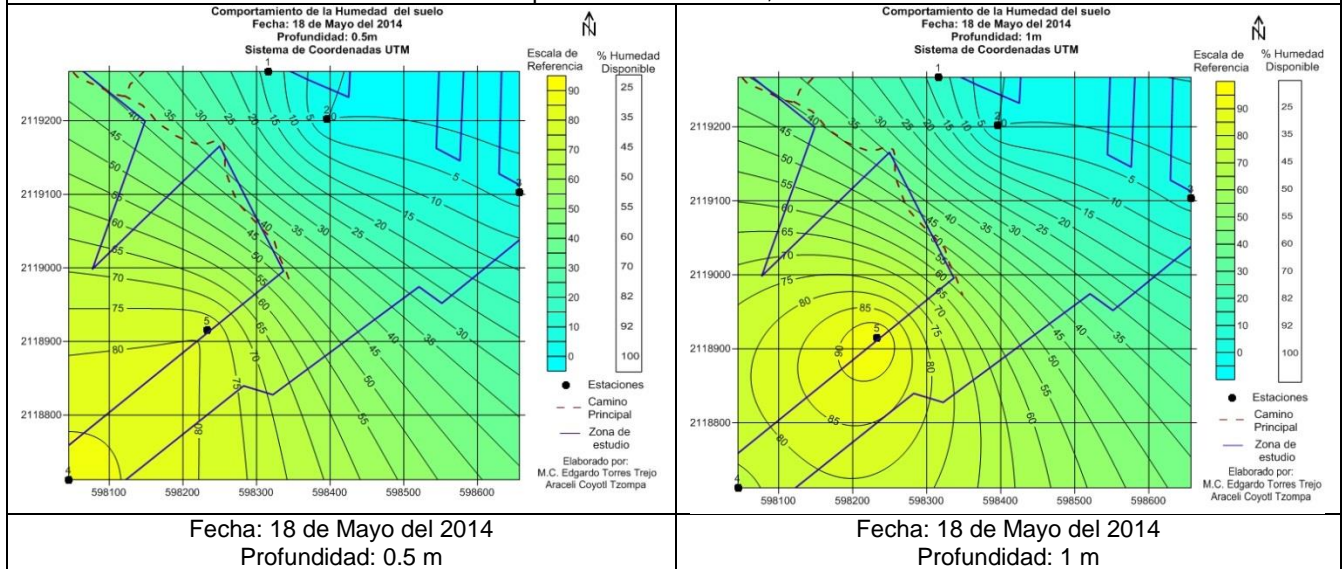
**Cuadro IV. 5. Comportamiento de la Humedad en el suelo, Predio Huey Tecoch Parque Nacional Malinche, Puebla.**



**Cuadro IV.6. Comportamiento de la Humedad en el suelo, Predio Huey Tecoch Parque Nacional Malinche, Puebla.**



**Cuadro IV.7.** Comportamiento de la Humedad en el suelo, Predio Huey Tecoch  
Parque Nacional Malinche, Puebla.



De acuerdo a las modelaciones obtenidas, para el mes de Febrero a profundidad de 0.5m (Cuadro IV. 4), se observó que la humedad en el suelo se concentra en el cuadrante Noreste, donde se encuentra ubicada la Estación 3. La humedad en la zona, forma una curva convexa, desplazándose en dirección Noroeste entre los puntos  $Y=211900$  y  $Y=2119200$ , la cresta se presenta en el punto  $Y=2119100$  y  $X=598650$  aproximadamente, con un 48% de humedad disponible, además de presentarse un desplazamiento hacia el Sureste entre los puntos  $Y=211900$  y  $Y=2118700$  y al Suroeste entre las puntos  $X=598600$  y  $X=598400$ . La zona con menor porcentaje de humedad corresponde a la zona Noroeste y Suroeste con porcentajes de humedad que van de un 25% al 35%, encontrándose el menor porcentaje de humedad en la Estación 5 con un 15%.

Para el mismo mes a profundidad de 1m, se observa un comportamiento similar, la formación de una curva convexa alrededor de la Estación 3, que no sobrepasa el punto  $X=598600$ , con un porcentaje de humedad del 35% y la cual se desplaza hacia la zona Noroeste y Suroeste. La región con menor cantidad de humedad retenida en el suelo corresponde a la región Noroeste y Suroeste de la zona de estudio, con un 15 % disponible.

La modelación realizada para el 15 de Marzo a 0.5m (Cuadro IV. 5) muestra un incremento en la humedad disponible del suelo para la zona Noreste ( $Y=2119100$  y  $X=598650$ ), donde se presente un máximo del 85% y a partir del cual, el agua se desplaza horizontalmente hacia el Noroeste, alcanzando en la Estación 1 el 35%, esta curva se desplaza hacia el Suroeste, por lo que la estación 4 queda entre el 30% y 35% de agua disponible, y a medida que el desplazamiento de la humedad va aproximándose a la Estación 5 esta disminuye, llegando a un 15%. A 1m de profundidad, se obtuvieron valores del 55% para el cuadrante Noreste, donde el desplazamiento también sigue el

sentido Noroeste, debido a esto en las Estaciones 1 y 2 se obtuvieron valores cercanos al 50% de humedad disponible, para la zona Suroeste se observó que la humedad disminuye, llegando a un 15% de humedad.

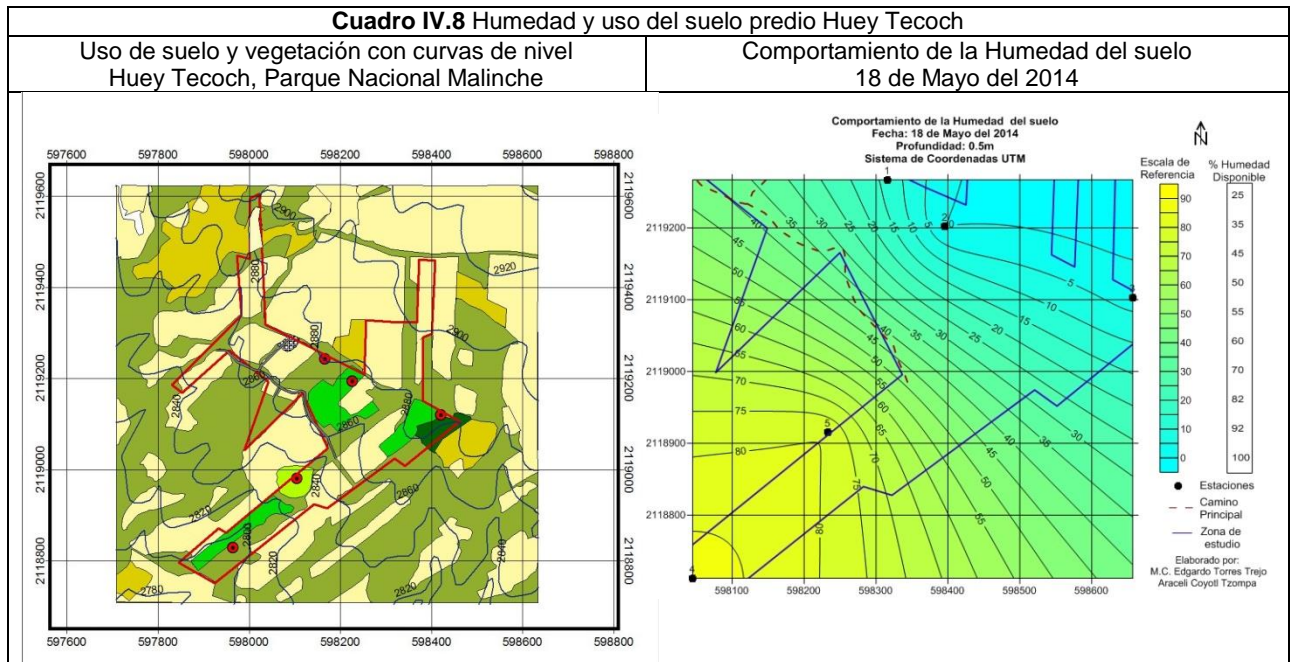
En base a los variogramas se identificaron entre los días 31 de Marzo y 13 Abril, un aumento considerable del agua en el suelo, por lo que se indica el inicio de precipitaciones en la región. Para el 13 de Abril a 0.5m (Cuadro IV.6) se localizó la zona Noreste, como el cuadrante con mayor humedad disponible con aproximadamente un 100 %, con lo que se alcanza la capacidad de Campo.

El movimiento del agua sigue el mismo patrón a los meses de estiaje, sin embargo es mayor la presencia de humedad en la zona, por lo que para la Estación 2 se obtuvieron valores cercanos al 80% y para la Estación 1 del 75%. Nuevamente la zona con menor humedad es la Estación 5, aunque se observa un ligero aumento del agua disponible llegando al 25%. A profundidad de un 1m, en la zona Noreste, se obtuvieron valores del 85% de humedad disponible, la cual tiende a moverse de tal forma que rodea la estación 5 correspondiente al Cráter, donde se concentra la menor cantidad de agua en el suelo, con valores que van del 30% al 15%.

Para el 18 de Mayo a profundidad de 0.5m (Cuadro IV.7) se observa un 100% de humedad disponible en el Noreste, por otra parte en el Suroeste, lugar de la Estación 5 se ve un aumento en la humedad disponible, alcanzando el 45%. A profundidad de 1m se llegó a la saturación del suelo en la región Noreste, principalmente en la estación 2 y 3 con un 100%, para la estación 1 se encontraron valores del 92%, muy próximo a la saturación. Para las estaciones 4 y 5 se presentaron valores que van del 35% al 25%.

Durante los meses de Febrero a Mayo el movimiento del agua siguió el sentido Noreste y Sureste, hacia las estaciones 1 y 2 principalmente siguiendo las curvas de nivel de la región, y concentrándose donde existe mayor vegetación (Cuadro IV.8), por lo que se muestran que la humedad del suelo está condicionada por diferentes factores, tales como, topografía, cobertura que soporta, y uso del suelo, además del clima y propiedades del suelo. Por otra parte la diferencia de humedad disponible entre las profundidades medidas, para cada uno de los meses, muestra el movimiento de agua en los diferentes horizontes del suelo.

Es importante mencionar que la humedad del suelo cumple con diversas funciones ecológicas entre ellas, está ser la fuente de agua para la vegetación nativa en sus diferentes estratos, así como la recarga de acuíferos, por lo que contar con un punto de recarga de agua es importante. Esto sucede en la Estación 3, ubicado en el Bosque de Oyamel. En esta estación la humedad del suelo se mantuvo por encima de los valores obtenidos en las otras estaciones debido a que no ha sufrido cambios en el uso de suelo, por lo que sus propiedades favorecen la absorción e infiltración del agua; ejemplo de ello es la presencia de materia orgánica aportada por el bosque, la cual ayuda a la formación de agregados en el suelo por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia orgánica. Esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua de tres a cinco veces (Hillel, 1998).



La topografía de la zona de estudio, y la presencia del cráter ubicado en la Estación 5 hace que esta zona funcione como una barrera orográfica, la cual impide el movimiento del agua hacia la zona suroeste (Estación 4). Por otra parte la presencia de una incipiente capa de suelo (40 cm), y un subsuelo formado por gravas en el cráter, favorece la poca retención de agua, pero también muestra la alta capacidad de infiltración de agua en este punto, por lo que se trata de una importante zona de recarga del acuífero.

#### IV.4. Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Las 25 muestras de suelo obtenidas del predio Huey Tecoch perteneciente a La Malinche (Tabla IV.2), fueron mantenidas en frascos de plástico a temperatura ambiente para su posterior análisis, y fueron nombradas de acuerdo a los distintos bloques de estudio, como se indica a continuación:

- Suelo con uso Agrícola : clave ( $A_{1...n}$ )
- Suelo con presencia de Bosque: clave ( $B_{1...n}$ , C, BC, O)
- Suelo con Plantaciones Forestales: clave ( $P_{1...n}$ )

Tabla IV.2. Claves utilizadas para nombrar los suelos de la región de estudio

Zona Agrícola	Bosque	Plantaciones Forestales
A1	B1	P1
A2	B1-1	P2
A3	B2	P3
A4	B3	
A5	B6	
A6	BC	
A7	C	
A71	O	
A8		
A9		
A10		
A11		
A12		
A13		

**IV.4.1. Análisis Físico y Químico del suelo.** Las muestras de suelo de la región de La Malinche fueron caracterizadas, considerando las siguientes propiedades:

Propiedades físicas

- Densidad Aparente
- Textura del suelo
- Color del Suelo

Propiedades químicas

- pH (medido en agua y KCl) y  $\Delta$ pH (Delta pH)
- Contenido de Materia Orgánica y Carbono orgánico
- Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)
- Nitrógeno Total
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y bases intercambiables, Na, K, Ca y Mg
- Porcentaje de Saturación en bases Na, K, Ca y Mg

**IV.4.1. Propiedades físicas de la región de estudio.** Las propiedades físicas evaluadas en cada una de los bloques de estudio se muestran en las Tablas IV.3 – IV.5

**Tabla IV.3.** Propiedades físicas del suelo en la Zona Agrícola, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	Estructura	Textura	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>		Color	
			Núcleo	Probeta	Suelo Seco	Suelo Húmedo
A1	Sin estructura	franco arenosa	1.21	1.26	10YR 5/3	10YR 3/2
A2	Sin estructura	franco arenosa	0.97	1.07	10YR 5/4	10 YR 3/2
A3	Sin estructura	franco arenosa	1.26	1.34	10YR 5/3	10YR 3/2
A4	Sin estructura	franco arenosa	1.29	1.23	10YR 5/3	10YR 3/2
A5	Sin estructura	franco arenosa	1.40	1.34	10YR 5/4	10YR 3/3
A6	Sin estructura	franco arenosa	1.24	1.29	10YR 4/3	10YR 3/2
A7	Sin estructura	franco arenosa	1.33	1.32	10YR 5/3	10YR 3/2
A71	Sin estructura	franco limosa	1.23	1.25	10YR 6/6	10YR 4/4
A8	Sin estructura	franco arenosa	1.39	1.4	10YR 5/3	10YR 3/2
A9	Sin estructura	franco arenosa	1.31	1.35	10YR 5/3	10YR 3/2
A10	Sin estructura	franco arenosa	1.14	1.22	10YR 5/3	10YR 3/2
A11	Sin estructura	franco arenosa	1.15	1.23	10YR 5/4	10YR 3/4
A12	Sin estructura	arenosa	1.37	1.26	10YR 5/4	10 YR 3/2
A13	Bloques sub-angulares que se descomponen en pequeños, friable.	arenosa	0.97	1.01	10YR 4/3	10YR 3/1

**Tabla IV.4.** Propiedades físicas del suelo en la Zona de Bosque, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	Estructura	Textura	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>		Color	
			Núcleo	Probeta	Suelo seco	Suelo húmedo
B1	Bloques sub-angulares medianos y pequeños	franca arenosa	0.70	0.81	10YR 4/3	10YR 2/2
B1-1	Bloques sub-angulares medianos y pequeños	franca arenosa	0.89	1.06	10YR 4/2	10YR 2/1
B2	Bloques sub-angulares, grandes que se descomponen en estructura migajosa	franca arenosa	0.85	0.98	10YR 4/3	7.5YR 2.5/1
B3	Bloques sub-angulares pequeños, friables en seco	franca arenosa	0.99	1.08	10YR 5/3	10YR 3/2
B6	Migajosa de mediana a grande	franca arenosa	0.66	0.78	10YR 4/2	7.5YR 2.5/1
BC	Migajosa que va de mediana a pequeña, muy friable	franca arenosa	0.99	0.81	10YR 4/2	10YR 2/1
C	Migajosa de mediana a pequeño, muy friable	franco limosa	1.05	1.21	10YR 4/2	10YR 2/1
O	Granular mediana	franco limosa	0.65	0.78	10YR 4/2	10YR 2/1

**Tabla IV.5.** Propiedades físicas del suelo en la Zona de Plantaciones, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	Estructura	Textura	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>		Color	
			Núcleo	Probeta	Suelo Seco	Suelo Húmedo
P1	Bloques sub-angulares grandes que se descomponen en bloques sub-angulares medianos	franco arenosa	0.8927	1.03	10YR 4/3	10YR 3/1
P2	Bloques sub-angulares que se descomponen en estructuras migajosas	franco arenosa	0.5496	0.83	10YR 5/4	10YR 3/2
P3	Bloques sub-angulares grandes que se descomponen en bloques sub-angulares pequeños	franco arenosa	1.1243	1.25	10YR 5/4	10YR 3/2

**IV.4.2. Propiedades químicas de la región de estudio.** Las propiedades químicas evaluadas en cada una de las zonas de muestreo se presentan en las Tablas IV.6. – IV.8.

**Tabla IV.6.** Propiedades químicas del suelo en la Zona Agrícola, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	% M.O	% Carbono	Relación C/N	% Nitrógeno	pH		$\Delta$ pH	CIC	Bases intercambiables meq/100g				% Saturación en bases
					H <sub>2</sub> O	KCl			Cmol(+)/kg	[Ca] <sup>++</sup>	[Na] <sup>+</sup>	[Mg] <sup>++</sup>	
A1	3.4	1.96	22.46	0.09	5.1	4.6	-0.5	12.1	1.56	0.28	0.3	0.19	19.26
A2	5.9	3.43	15.95	0.22	5.1	4.5	-0.5	8	4.92	0.46	0.74	0.37	81.13
A3	2.2	1.3	8.07	0.16	5.1	4.7	-0.4	7	3.93	0.24	0.89	0.44	78.57
A4	5.3	3.05	13.35	0.23	5.3	4.3	-1	8.9	2.48	0.48	0.42	0.35	41.91
A5	4.1	2.38	16.11	0.15	4.8	4.8	-0.1	7.3	2.94	0.23	0.47	0.22	52.88
A6	3.8	2.2	23.4	0.09	5.9	4.6	-1.3	4	2.95	0.36	0.46	0.29	101.50
A7	3.6	2.09	15.57	0.13	5	4.5	-0.5	5.3	2.95	0.46	0.49	0.39	80.94
A71	3.3	1.9	31.43	0.06	5	4.6	-0.4	9.7	3.75	0.42	0.83	0.47	56.39
A8	3.8	2.2	10.24	0.22	4.8	4.6	-0.2	22.6	2.8	0.72	0.38	0.27	18.45
A9	4.1	2.4	17.87	0.13	4.4	4.2	-0.2	4.8	1.76	0.66	0.25	0.2	59.79
A10	7.6	4.4	17.71	0.25	4.6	4.6	-0.1	13.1	2.78	0.98	0.6	0.42	36.49
A11	3.3	1.9	20.21	0.09	4.9	4.6	-0.3	10.5	2.81	0.55	0.58	0.28	40.19
A12	4.3	2.48	10.53	0.24	5.2	4.7	-0.4	20.3	3.12	0.38	0.48	0.23	20.74
A13	7.6	4.4	16.8	0.26	5.1	4.6	-0.5	39.9	4.9	0.43	0.83	0.26	16.09



Tabla IV.7. Propiedades químicas del suelo en la Zona de Bosque, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	% M.O	% Carbono	Relación C/N	% Nitrógeno	pH		$\Delta$ pH	CIC	Bases intercambiables meq/100g				% Saturación en bases
					H <sub>2</sub> O	KCl			Cmol (+)/kg	[Ca] ++	[Na]+	[Mg] ++	
B1	9.2	5.3	37.8	0.14	5.7	4.7	-1	17.5	8.44	0.52	1.57	0.34	62.11
B1-1	8.3	4.8	8.2	0.58	5.3	4.9	-0.4	10.6	8.62	0.27	1.54	0.68	104.81
B2	6.9	4	39.7	0.1	5.1	4.9	-0.21	14.6	7.69	0.23	1.94	0.52	71.10
B3	5.9	3.4	13	0.26	5.2	4.7	-0.47	9.1	6.32	0.24	1.26	0.38	90.11
B6	10	5.8	17	0.34	5.5	5.1	-0.36	13.8	8.96	0.54	1.94	0.61	87.32
BC	7.9	4.6	11.4	0.4	5	4.7	-0.22	12.7	8.26	0.56	2.15	0.39	89.45
C	14.1	8.2	11.7	0.7	5.1	4.9	-0.2	37.5	17.85	0.54	3.89	1.39	63.12
O	10.1	5.9	13.3	0.44	5.1	4.9	-0.18	35	1.92	0.47	2.37	0.47	14.94

Tabla IV.8. Propiedades químicas del suelo en la Zona de Plantaciones, Predio Huey Tecoch. Parque Nacional Malinche

Muestra	% M.O	% Carbono	Relación C/N	% Nitrógeno	pH		$\Delta$ pH	CIC	Bases intercambiables meq/100g				% Saturación en bases
					H <sub>2</sub> O	KCl			Cmol(+) /kg	[Ca]++	[Na]+	[Mg]++	
P1	4.8	2.8	24.5	0.11	5.1	4.9	-0.21	20	5.53	0.15	0.84	0.45	34.85
P2	5.9	3.4	10.1	0.34	5.4	4.9	-0.51	7.5	7.49	0.47	1.09	0.47	126.87
P3	5.2	3.0	14.9	0.20	4.7	4.5	-0.24	8.2	3.20	0.55	0.45	0.27	54.42

#### IV.5. Discusión sobre las propiedades físicas de los suelos.

**IV.5.1. Densidad Aparente.** La densidad aparente es expresada como el contenido de sólidos por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ). En este estudio la determinación de densidad aparente fue necesaria para estimar el grado de deterioro del suelo y con ello obtener un indicador de la calidad del mismo. Teniendo en cuenta que a medida que aumenta su valor, se produce una degradación de la estructura del suelo (Jaramillo, 2002). En la Tabla IV.9 se muestran los resultados obtenidos durante las determinaciones.

<b>Tabla IV.9.</b> Comparación entre las densidades aparentes de los suelos					
Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	Densidad aparente $\text{g/cm}^3$	Muestra	Densidad aparente $\text{g/cm}^3$	Muestra	Densidad aparente $\text{g/cm}^3$
A1	1.21	B1	0.70	P1	0.8927
A2	0.97	B1-1	0.89	P2	0.5496
A3	1.26	B2	0.85	P3	1.1243
A4	1.29	B3	0.99		
A5	1.40	B6	0.66		
A6	1.24	BC	0.99		
A7	1.33	C	1.05		
A71	1.23	O	0.65		
A8	1.39				
A9	1.31				
A10	1.14				
A11	1.15				
A12	1.37				
A13	0.97				
<b>Promedio</b>	<b>1.23</b>	<b>Promedio</b>	<b>0.85</b>	<b>Promedio</b>	<b>0.86</b>

La densidad aparente también indica la compactación del suelo que causa disminución de la macroporosidad y con ello la capacidad de infiltración del agua, ocasionando un mayor escurrimiento superficial, erosión y una menor capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo. También origina una barrera o impedimento mecánico para la penetración de las raíces, disminuyendo con ello su capacidad de exploración y extracción de agua y nutrientes (Medina *et al.*, 2006).

En áreas agrícolas, generalmente la compactación tiende a ser mayor, y por ende la densidad aparente también aumenta, lo que indica un suelo con reducida porosidad, aireación deficiente e infiltración lenta del agua. Por el contrario, la densidad aparente tiende a bajar, cuando la estructura del suelo es buena y su porosidad es mayor tal como ocurre en áreas forestales.

Los resultados obtenidos muestran una alta densidad aparente en el área agrícola, lo que indica una degradación de la estructura del suelo, debido al manejo aplicado en la zona. Por otra parte, se encuentra una similitud entre las densidades aparentes de bosque y plantaciones (Tabla IV.9.), esta similitud es causada por el cambio de uso de suelo en la zona de plantaciones (anteriormente agrícola), lo que demuestra la eliminación de prácticas mecánicas que causaron la degradación de la estructura del suelo.

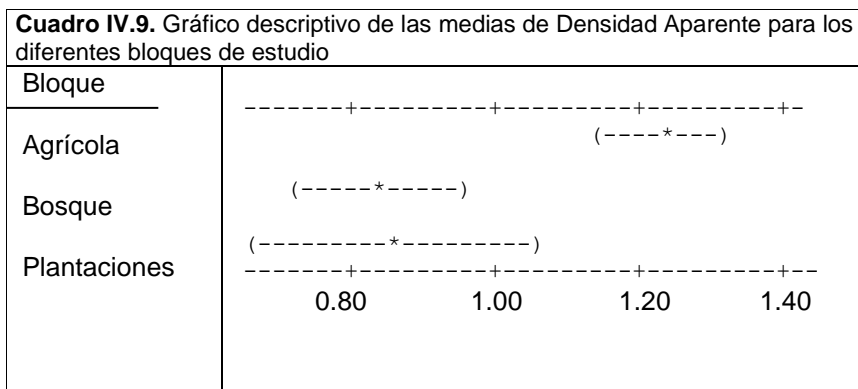
El análisis estadístico inferencial se realizó usando la prueba ANOVA de una vía, la cual fue aplicada a los diferentes bloques de estudio. De acuerdo al resultado obtenido en el nivel de significancia (P) indico una diferencia significativa al menos una de las medias de alguno de los tres bloques (Tabla IV.10), por lo que se rechaza la hipótesis nula.

**Tabla IV.10.** ANOVA de una vía de Densidad Aparente

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Zona	2	0.9045	0.4523	16.82	0.000
Error	22	0.5916	0.0269		
Total	24	1.4962			

**Tabla IV.11.** Estadísticos inferenciales de densidad aparente

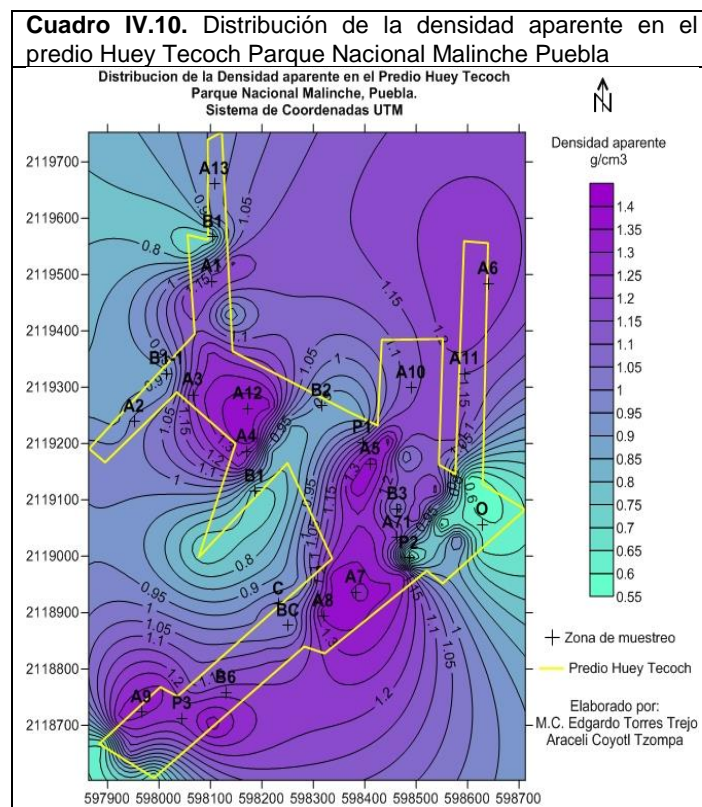
Bloque	N	Media	Desv. estándar
Agrícola	14	1.2329	0.1373
Bosque	8	0.8475	0.1601
Plantaciones	3	0.8555	0.2891



De acuerdo a la tabla IV.11., y el cuadro IV.9, se observa una diferencia entre la media agrícola en comparación con el bloque de bosque y plantaciones. Este cambio en la densidad aparente fue causado por el cambio de uso de suelo en la región, causando una degradación física, este proceso se expresa por el aumento en la densidad aparente del suelo y por consiguiente una pérdida de porosidad y destrucción de la estructura.

Los bloques de bosque y plantaciones muestran un traslape en las medias, esto debido a que el bloque correspondiente a Plantaciones cuenta con un cambio de uso y manejo, lo que implica la eliminación de prácticas mecánicas y la agricultura aproximadamente por 7 años, lo cual ha favorecido la estructura y porosidad del suelo y con ello la disminución de la densidad aparente, esto explica la similitud con el Bosque además de reflejar la alta capacidad amortiguadora o resiliente del sistema suelo, en particular de aquel formado o derivado de materiales piroclásticos en condiciones de vegetación de bosque templado.

En cuadro IV.10 se puede apreciar la distribución de la densidad aparente en el área de estudio.



**IV.5.2. Porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico.** La materia orgánica es un indicador clave de la calidad del suelo debido a que tiene gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (FAO, 2002). Un componente importante de la materia orgánica es el carbono orgánico.

La materia orgánica y el carbono orgánico, tiene efecto en las propiedades físicas del suelo, por una parte la materia orgánica favorece la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo y con ello incrementa la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica (FAO, 2002) y por otra parte el carbono orgánico tiene efecto en la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo (Martínez *et. al.*, 2008). Ambas propiedades dependen no solo de las condiciones ambientales, sino que son afectadas fuertemente por el manejo del suelo.

Debido a que en la zona de estudio, las prácticas de manejo han modificado características del suelo, la determinación de materia orgánica y carbono orgánico fue necesaria. En la tabla IV.13., se muestran los resultados obtenidos en contenido de materia orgánica. Los valores de referencia para clasificar los suelos derivados de materiales piroclásticos en relación a su porcentaje de materia orgánica se muestran en la tabla IV.14 (NOM-021- RECNAT-2000).

<b>Tabla IV.13. Comparación del % de Materia Orgánica de los suelos</b>					
Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	% Carbono Orgánico	Muestra	% Carbono Orgánico	Muestra	% Carbono Orgánico
A1	3.4	B1	9.2	P1	4.8
A2	5.9	B1-1	8.3	P2	5.9
A3	2.2	B2	6.9	P3	5.2
A4	5.3	B3	5.9		
A5	4.1	B6	10.0		
A6	3.8	BC	7.9		
A7	3.6	C	14.1		
A71	3.3	O	10.1		
A8	3.8				
A9	4.1				
A10	7.6				
A11	3.3				
A12	4.3				
A13	7.6				
<b>Promedio</b>	<b>4.45</b>	<b>Promedio</b>	<b>9.06</b>	<b>Promedio</b>	<b>5.3</b>

<b>Tabla IV.14. Porcentajes de materia orgánica</b>		
Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

De acuerdo a los valores proporcionados por la tabla IV.4 el bloque agrícola presenta valores bajos a medios, obteniendo un mínimo de 2.2%, máximo de 7.6%, y un promedio de 4.45%. Para lo zona correspondiente a bosque se obtuvieron porcentajes que van de bajos a altos, con un mínimo de 5.9%, máximo de 14.1% y con un promedio de 9.06%. En el bloque correspondiente a plantaciones los valores obtenidos se encuentran dentro de la clase baja, con un porcentaje mínimo de 4.8%, máximo de 5.9% y con un promedio de 5.3%.

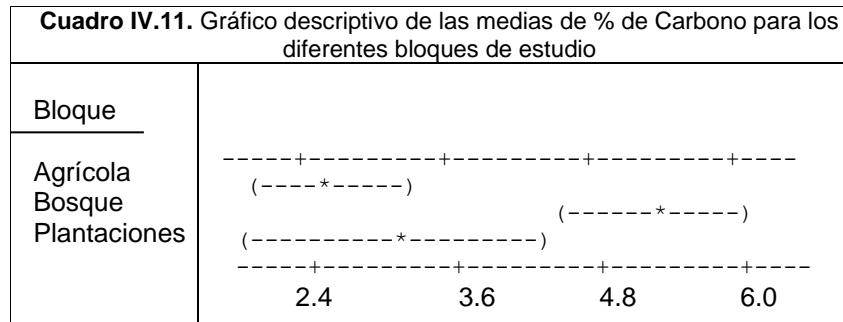
Para determinar el porcentaje de carbono orgánico en los suelos de la región de la Malinche, se recurrió a la suposición convencional de que la materia orgánica es 1.724 veces mayor que el carbono orgánico, en base a esta información se hizo el cálculo para conocer el porcentaje de carbono orgánico del suelo partiendo del contenido de la materia orgánica (Aguilar *et al.*, 1987). En la tabla IV.15., se muestran los resultados en porcentajes del carbono orgánico contenido en los suelos estudiados.

<b>Tabla IV.15. Comparación del % de Carbono Orgánico de los suelos</b>					
Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	% Carbono Orgánico	Muestra	% Carbono Orgánico	Muestra	% Carbono Orgánico
A1	1.96	B1	5.3	P1	2.8
A2	3.43	B1-1	4.8	P2	3.4
A3	1.30	B2	4.0	P3	3.0
A4	3.05	B3	3.4		
A5	2.38	B6	5.8		
A6	2.20	BC	4.6		
A7	2.09	C	8.2		
A71	1.90	O	5.9		
A8	2.20				
A9	2.40				
A10	4.40				
A11	1.90				
A12	2.48				
A13	4.40				
<b>Promedio</b>	<b>% 2.58</b>	<b>Promedio</b>	<b>% 5.26</b>	<b>Promedio</b>	<b>% 3.07</b>

De acuerdo a los promedios obtenidos, el valor más alto se presenta para la zona de bosque, seguido del bloque plantaciones y por último la zona agrícola. El análisis estadístico se hizo con base en la prueba ANOVA de una vía aplicado a los diferentes bloques de estudio. El valor de significancia obtenido (P) muestra una diferencia significativa entre las medias de los diferentes bloques de estudio, con lo que se rechaza  $H_0$  (Tabla IV.16).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Zona	2	36.97	18.48	15.43	0.000
Error	22	26.35	1.20		
Total	24	63.32			

Bloque	N	Media	Desv. Estándar
Agrícola	14	2.578	0.925
Bosque	8	5.250	1.466
Plantaciones	3	3.067	0.306



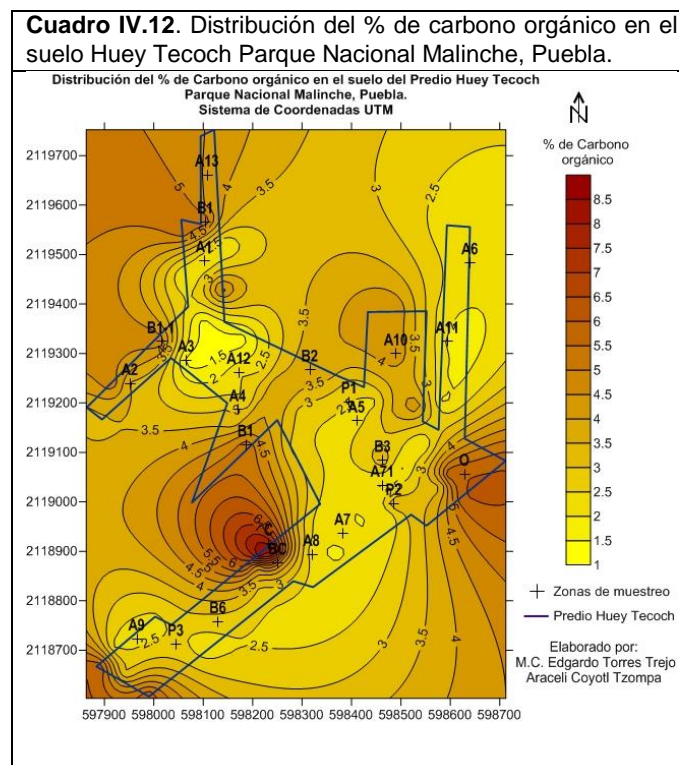
La media de porcentaje de carbono orgánico correspondiente al bloque agrícola es menor al compararlo con el bosque, sin embargo se observa una similitud con la media de plantaciones (Tabla IV.17), por lo que se da un traslape entre ambos bloques tal como se muestra en el cuadro IV.11.

Como se mencionó anteriormente, la materia orgánica presente en el suelo está ligada estrechamente con el carbono orgánico por lo que esta diferencia entre las zonas de bosque y agrícola es provocado por el uso de suelo. Las prácticas agrícolas implican la

eliminación de la cobertura vegetal para poder obtener áreas de siembra. Con ello se elimina la aportación de materia orgánica al suelo y la formación de carbono orgánico.

La similitud entre el bloque agrícola y plantaciones es causada por la transición en la que se encuentra dicha zona. Esta área presenta vegetación forestal joven (aproximadamente cuenta con 7 años) por lo que en esta área la acumulación de materia orgánica es menor comparada con el bosque, lo que implica una similitud en la cantidad de carbono orgánico con la zona agrícola. De acuerdo a Llaguno (2007), la región de estudio posee una capacidad de resiliencia de 16 años, la cual fue vencida. Por lo que se podría esperar que en 16 años estas características del suelo puedan ser las mismas a las de un bosque propio de la zona.

La alta acumulación de materia orgánica en la región de bosque da como resultado una media alta al comparar con los bloques plantaciones y agrícola, esto debido a la presencia de cobertura vegetal aunado a la conservación de la zona, lo que favorece la retención de agua así como resistencia contra la erosión hídrica y eólica. En el cuadro IV.12 se muestra la distribución del carbono orgánico en el área de estudio.



**IV.5.3 Relación C/N.** La acción microbiana puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno. El principal factor que determina cuál de los dos procesos va a ocurrir es la relación C/N. La relación C/N es un factor que determina el grado de mineralización de la materia orgánica que existe en el suelo, para su cálculo se consideran por lo general los valores de N total, los que están constituidos hasta en un 98% por la fracción orgánica (Fassbender, 1975).



Aunque el material orgánico del suelo posee una relación C/N amplia, el nitrógeno eventualmente llega a mineralizarse. Cuanto mayor sea la relación C/N más largo es el periodo para la inmovilización neta. Cuanto menor es la relación C/N, antes se realiza la mineralización del nitrógeno (Thompson y Troeh, 1988). El nitrógeno de los materiales orgánicos queda disponible para las plantas superiores solamente después de que la relación C/N se aproxima al valor de 10 (Pritchett, 1986).

<b>Tabla IV.18.</b> Comparación de la relación C/N					
Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	C/N	Muestra	C/N	Muestra	C/N
A1	22.5	B1	37.8	P1	24.5
A2	16.0	B1-1	8.2	P2	10.1
A3	8.1	B2	39.7	P3	15.0
A4	13.3	B3	13.0		
A5	16.1	B6	17.0		
A6	23.4	BC	11.4		
A7	15.6	C	11.7		
A71	31.4	O	13.3		
A8	10.2				
A9	17.9				
A10	17.7				
A11	20.2				
A12	10.5				
A13	16.8				
<b>Promedio</b>	<b>17.12</b>	<b>Promedio</b>	<b>19.02</b>	<b>Promedio</b>	<b>16.51</b>

En la tabla IV.18., se observan los resultados obtenidos en la relación C/N para cada uno de los bloques de estudio. Los valores obtenidos en el bloque agrícola comprenden un mínimo de 8 a un máximo de 31.5 con un promedio de 17.2, para el bosque se tiene un mínimo de 8 y un máximo de 38 con un promedio de 19.02. En el caso de plantaciones el valor mínimo es de 15 y el máximo de 24.5 con un promedio de 16.51.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado en base a la prueba ANOVA (Tabla IV.19.), señala que no existe diferencia significativa entre las medias de los tres bloques estudiados ( $P > \alpha$ ).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Ajuste de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Zona	2	22.73	22.73	11.37	0.15	0.861
Error	22	1664.59	1664.59	75.66		
Total	24	1687.32				

La interpretación de estos resultados es que los suelos poseen un tiempo amplio para que se lleve a cabo la mineralización, dejando así el nitrógeno disponible a las plantas.

**IV.5.4. Acidez hidrolítica.** El pH del suelo expresa la actividad de los iones hidrogeno en la solución del suelo (FAO, 2009) a su vez es una medida indirecta de otras propiedades químicas, entre ellas aquellos iones que por hidrolisis aportan acidez, como es el caso del  $Al^{+3}$ . El pH afecta la disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas así como a muchos procesos del suelo (Zapata, 2002).

Factores importantes que afectan el pH edáfico son temperatura y precipitaciones, que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo. La acidez por lo general está asociada con suelos lixiviados; la alcalinidad mayormente aparece en regiones más secas. Sin embargo, prácticas agrícolas, tales como el encalado o el agregado de fertilizantes de amonio, puedan alterar el pH (USDA, 1999). En la tabla IV.20., se muestran los resultados obtenidos para los tres bloques de estudio.

Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	pH	Muestra	pH	Muestra	pH
A1	5.1	B1	5.3	P1	5.1
A2	5.1	B1-1	4.8	P2	5.4
A3	5.1	B2	4.0	P3	4.7
A4	5.3	B3	3.4		
A5	4.8	B6	5.8		
A6	6.0	BC	4.6		
A7	5.0	C	8.2		
A71	5.0	O	5.9		
A8	4.8				
A9	4.4				
A10	4.6				
A11	5.0				
A12	5.2				
A13	5.1				
<b>Promedio</b>	<b>5.0</b>	<b>Promedio</b>	<b>5.3</b>	<b>Promedio</b>	<b>5.1</b>

<b>Tabla IV.21.</b> Clasificación de los suelos en función del pH (suelo:agua relación 1:2)	
<i>Grado de acidez o alcalinidad</i>	<i>pH</i>
Extremadamente ácido	< 4.6
Ácido	4.6 – 5.4
Moderadamente ácido	5.5 – 6.4
Neutro	6.5 – 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 – 8.1
Alcalino	8.2 – 8.8
Extremadamente alcalino	> 8.9

El pH de los suelos (medidos en suelo:agua, relación 1:2) se muestra en las tabla IV.20 (Castellanos, Uvalle-Bueno y Aguilar-Santelises, 2000) Los suelos estudiados para el bloque agrícola presentan valores de pH que se encuentran clasificados entre extremadamente ácidos y moderadamente ácidos, con un promedio de 5 correspondiente a ácido.

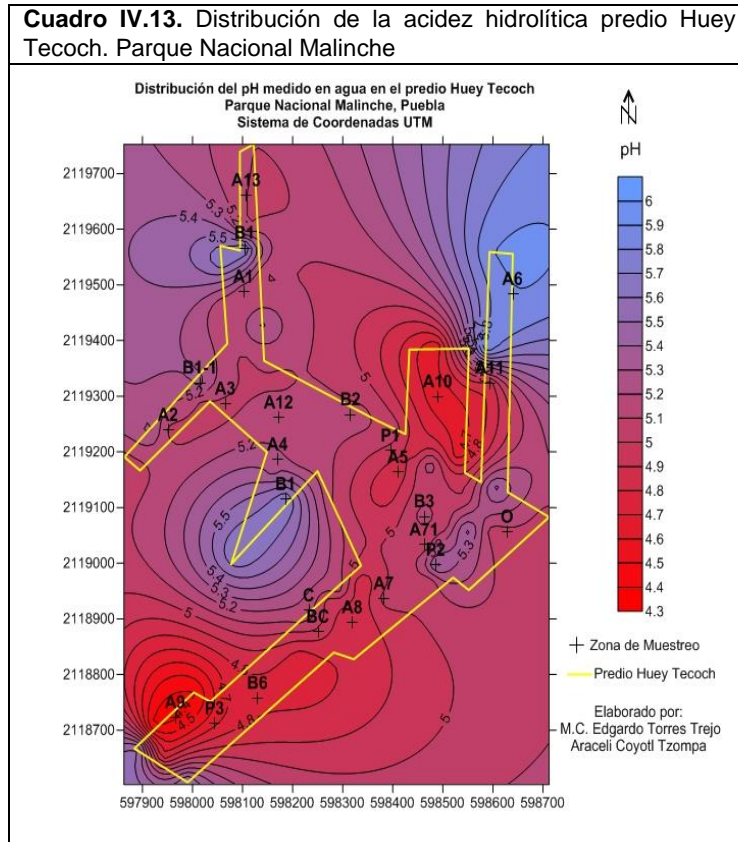
En el bloque correspondiente a bosque se presentan valores de pH con una clasificación extremadamente ácidos a moderadamente alcalinos, con un pH mínimo de 3.4 y un máximo de 8.2, y con un pH promedio de 5.2. Los resultados obtenidos en la zona de plantaciones arrojan valores de pH clasificados como ácidos.

De forma general y de acuerdo a los promedios obtenidos en cada uno de los bloques de estudio, el pH del suelo se encuentra clasificado como ácido, por lo que el suelo contiene cantidades elevadas de aluminio propio de suelos de origen volcánico o Andosoles (Castellanos, Uvalle-Bueno y Aguilar-Santelises, 2000).

Los resultados de la prueba ANOVA (Tabla IV.22.) para acidez hidrolítica indico que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques estudiados ( $P > \alpha$ ).

<b>Tabla IV.22.</b> ANOVA Modelo Lineal General Acidez Hidrolítica						
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Ajuste de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Zona	2	0.2698	0.2698	0.1349	1.33	0.285
Error	22	2.2302	2.2302	0.1014		
Total	24	2.5000				

De acuerdo a los resultados obtenidos el pH del suelo medido en agua no se ve afectado por el uso de suelo. La distribución de pH para la zona de estudio se puede apreciar en el cuadro IV.13, donde se describe gráficamente lo señalado en la tabla IV.20.



**IV.5.5. Delta pH.** Uno de los métodos más aceptados para determinar si un suelo es de carga variable es la determinación del  $\Delta\text{pH}$  (Uehara y Gillman, 1981). Los valores de  $\Delta\text{pH}$  indican lo siguiente:

- El signo y la magnitud de  $\Delta\text{pH}$ , corresponden al signo y a la magnitud de la carga superficial.
- Valores de  $\Delta\text{pH}$  mayores de -0.5 indican que el suelo predominante es de carga variable.
- Valores de  $\Delta\text{pH}$  menores de -0.5, indican que el suelo es de carga permanente.

En suelos ácidos el valor de  $\Delta\text{pH}$  cercano a cero, da indicios de que la muestra presentará bajos contenidos de aluminio extraíble.

Los resultados obtenidos para la región de estudio se muestran en la tabla IV.23., donde los promedio obtenidos en cada uno de los bloques señalan que en los suelos estudiados predomina una carga variable. Este tipo de carga corresponde a aquella que se desarrolla con el coloide cuando cambian las condiciones ambientales del medio en el

cual se encuentra, siendo la propiedad que más afecta a los coloides el pH (Jaramillo, 2002).

<b>Tabla IV.23.</b> Comparación de $\Delta$ pH de los suelos					
Agrícola		Bosque		Plantaciones	
Muestra	$\Delta$ pH	Muestra	$\Delta$ pH	Muestra	$\Delta$ pH
A1	-0.5	B1	-1.0	P1	-0.2
A2	-0.5	B1-1	-0.4	P2	-0.5
A3	-0.4	B2	-0.2	P3	-0.2
A4	-1.0	B3	-0.5		
A5	-0.1	B6	-0.4		
A6	-1.3	BC	-0.2		
A7	-0.5	C	-0.2		
A71	-0.4	O	-0.2		
A8	-0.2				
A9	-0.2				
A10	-0.1				
A11	-0.3				
A12	-0.4				
A13	-0.5				
<b>Promedio</b>	<b>-0.46</b>	<b>Promedio</b>	<b>-0.38</b>	<b>Promedio</b>	<b>-0.32</b>

De acuerdo al análisis estadístico realizado con ANOVA, señala que no existe diferencia significativa entre las medias de  $\Delta$ pH.

<b>Tabla VI.7.</b> ANOVA Modelo Lineal General $\Delta$ pH						
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Ajuste de cuadrados	Cuadrados medios	Prueba F	Valor P
Zona	2	0.06171	0.06171	0.03086	0.34	0.717
Error	22	2.00909	2.00909	0.09132		
Total	24	2.07080				

## CONCLUSIONES

Con respecto a los objetivos generales planteados podemos concluir que:

- a) La calidad de suelo en el predio Huey Tecoch cumple con lo necesario para funcionar dentro de los límites del ecosistema tanto natural (bosque) como manejado (plantaciones y zonas agrícolas), pues son capaces de sostener la productividad de las plantas y animales, contribuyendo a mantener la calidad del aire, pero sobre todo la del agua.
- b) El experimento permitió demostrar que los suelos pertenecientes al predio “Huey Tecoch” proporcionan servicios ambientales importantes como el almacenamiento y distribución de agua, sin embargo la prestación de este servicio se ve afectada por el uso de suelo.

## RECOMENDACIONES

Se recomiendan las siguientes estrategias para mejorar la calidad de los servicios ambientales que proporcionan los suelos de la región de estudio:

- a) En las zonas de bosque menos perturbado, es importante realizar labores para recuperar una mayor densidad de población de árboles dominantes como *Abies religiosa* y *Pinus montezumae* controlando el aumento en la población de *Ailes sp.*
- b) Efectuar un aclareo en las plantaciones de más de 10 años de antigüedad para evitar la competencia entre los arboles dominantes, debido a que fueron plantados muy próximos uno de otro.
- c) Para las zonas agrícolas se sugiere establecer medidas de conservación de suelos como son construir barreras vegetativas, realizar siembras al contorno, realizar desagües protegidos con vegetación, construcción de franjas de amortiguamiento de vegetación, conservar el rastrojo en el suelo después de retirar la cosecha.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acton y Gregorich L.J. (Ed.) (1995). *The Health of Our Soils: Toward sustainable agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research. Agriculture and Agri-Food Canada.
- Aguilar, A.; Etchevers, J. D. y Castellanos, J. Z. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. Publicación especial No. 1. 217 páginas.
- Aguilera, N., T. M. Dow y R. Hernández S. (1962). Suelos, problema básico en silvicultura. *In: Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas*. Inst. Nac. Invest. Forest. Publ. Esp. 1. México, D. F. pp. 108-140.
- Alcocer, J.; Escolero, F. O. A.; y Marín, L. E. (2005). Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala, p. 57-77. En: *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México, D.F.
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp\\_106.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_106.pdf) (Acceso: 2 de Marzo 2014) última fecha de consulta: 12 Octubre del 2014.
- Artieda Octavio (2008), *Papel del suelo en el ciclo hidrológico*, Área de Edafología y Química Agrícola. Centro Universitario de Plasencia; Universidad de Extremadura.
- Bautista Cruz A., Etchevers Barra J., del Castillo R.F, Gutiérrez C., (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores Ecosistemas* 13 (2): 90-97
- Baver, L.D.; Gardner H. W.; Gardner R. H., (1991). *Física de suelos*. Limusa.
- Beare, M.H.; Cameron, K.C.; Williams, P.H. y C.Doscher. (1997). *Soil Quality Monitoring for Sustainable Agriculture*. NZPPs paper-Soil Quality Monitoring for Sustainable Agriculture. <http://www.hortnet.co.nz> (versión noviembre de 1999).
- Blum, W. E., (2006). The future of soil science, p. 17 - 19 En: *The Future of Soil Science*. ISBN 90-71556-16-6, Den Haag. Alfred E. Wageningen (ed). IUSS International Union of Soil Sciences. CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek.
- Bori, G. (2009), *Influencia de la variación del clima y la tala del bosque en la recarga del acuífero del Parque Nacional "La Malinche", Puebla México*. Tesis de Fin de Carrera. BUAP – Universitat de Lleida. México –España.
- Buckman H. O.; Brady N. C.(1977). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Barcelona, España, Montanery Simons.
- Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Janzen, H.H. y F.J.Pierce. (1997). Concepts of Soil Quality and their Significance. En: *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25*. Gregorich, E.G and Carter, M.R (eds.) Elsevier Sc.

- Castellanas J. Z.; Uvalle-Bueno J. X.; Aguilar-Santelises A. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. 2° Edición. México, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Castro P. F. (2004). La política gubernamental para el manejo del Parque Nacional “La Malinche”: una visión etnográfica desde el interior de las instituciones ambientalistas, p. 11-18. En: *Décimo Congreso Bienal de la Asociación Internacional para el Estudio de la Propiedad Colectiva (IASCP)*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Castro- Govea R.; Siebe C.( 2007) Late Pleistocene–Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central México en: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.162 (2007) p. 20-42.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro*. CONABIO, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre, S. C. México
- Challenger, A., y J. Soberón. (2008). Los ecosistemas terrestres, p. 87-108. En: *Capital natural de México*, vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Conabio, México.
- CONANP. (2012). *Ficha Descriptiva del Área Natural Protegida*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. Disponible en: [https://simec.conanp.gob.mx/Info\\_completa\\_ext.php?id\\_direccion=199](https://simec.conanp.gob.mx/Info_completa_ext.php?id_direccion=199). (Acceso: 1 Marzo de 2014). Última fecha de consulta: 12 de octubre del 2014.
- Cruz M.A, Valera P. M.A., Hidalgo M. C. I., y Tenorio A. M. G. (2000) *Calidad de suelo y Sustentabilidad*. XX Diplomado Internacional de Edafología “Nicolás Aguilera”
- Delmhorst Soil moisture tester Model KS-D1
- Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality, pp. 3-21. En: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sci. Soc. Am. Sp. Pub. No. 35. Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F., and B. A. Stewart (eds) Am. Soc. of Agron., Madison, Wisc. USA.
- Driessen, P., Deckers, J., Nachtergaele, F., y Spaargaren, O. (2001). *World Reference Base for Soil Resources In A Nutshell European Soil Bureau*. Research Report No. 7.
- FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma.
- FAO. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra en: *Informes sobre recursos mundiales de suelos*, ISSN 1020-430-X. Roma.
- Fassbender H. W. (1975). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica.
- Florentino, A. (2011). *Métodos para medir el contenido de agua en el suelo*. Venesuelos 14(1):48-70.
- García José R., Sosa Francisco, Fernández de Ullivarri Juan (n.d) *El agua del suelo*. Catedra de Edafología, Universidad Nacional de Tucumán



- García, E. (2008) *Climas (clasificación de Köppen, modificado por García) Escala 1:1000000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Acceso: 15 de Octubre 2014).
- Gisbert- Blanquer J. M.; Ibañez- Asensio S.; Moreno R. H. (n.d). *El espacio poroso del suelo*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universitat Politècnica de Valencia.
- GOBIERNO DE LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA. (2002). Programa Integral de Manejo del Parque Nacional La Malinche. SEMARNAT; SEDURBECOP; CGE; SDR. México.
- González C. J. C.; Licea R. A. E.; Alcalá J. M. (n.d). Cobertura vegetal variación del contenido de humedad del suelo en un bosque templado fragmentado.
- Guatemala. Instituto Nacional de Bosques. (2005). Programa de Investigación de Hidrología Forestal. Instituto Nacional de Bosques. Editado en Guatemala. 38 p.
- Hernández, R.; Fernández-Collado, C.; y Baptista, L. (2006). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill
- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. U.S.A.
- INEGI (1986). *Síntesis geográfica de Tlaxcala*. Secretaría de programación y presupuesto. México.
- Instituto Nacional de Ecología, (2002). *Estimación del Costo de Oportunidad del Uso de Suelo Forestal en Ejidos a Nivel Nacional*. SEMARNAT
- ISRIC, 1988) ISRIC. 1988. Guidelines for general assesment of the status of human-induced soil degradation. Editado por L. R. Oldeman. Wageningen, Netherlands.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jaramillo F. D. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Jaramillo, D. F.; L. N. Parra y L. H. González. (1994). *El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación*. 88 p, Universidad Nacional de Colombia Medellín.
- Jenny, H. (1980). The Soil Resource. Springer-Verlag, New York, USA
- Jenny, H. 1994. Factors of Soil Formation Dover Publications, Inc, New York.
- Karlen, D. L.; Mausbach, M. J.; Doran, J. W.; Cline, R. G.; Harris, R. F., y G. E. Schuman. (1997). "Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Krasilnikov, P., Carré, F., y Montanarella, L. (eds.). (2008). *Soil geography and geostatistics; JRC Scientific and Technical Reports, Concepts and Applications*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Printed in Luxembourg.
- Lal, R. (1999). "Soil Quality and Food Security: The Global Perspective". En: Lal, R. (ed) *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press. p. 3-16.

- Licona V. E.; Gámez E. A.; Ramírez. R. R. (2013). *San Miguel Canoa Pueblo Urbano*. Facultad de Filosofía y Letras. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Linares, G. (1990). *Análisis de Datos*. Ministerio de Educación Superior. La Habana, Cuba. 320p.
- Lizcano, A., Herrera, M. C., y Santamarina J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Revista. Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*. 6, p. 167-196
- Llaguno J. (2007). *Emisiones del gas de efecto invernadero 'dióxido de carbono' en los suelos forestales del volcán la Malinche, Estado de Puebla*. Tesis de fin de carrera, BUAP.
- Manson, Robert H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques [versión electrónica]*, 10(1), p. 3-20.
- Martínez F. J.; Cano A.; Hernández-Santana V.; Moran C. (2007) Evaluación de la humedad del suelo bajo diferentes tipos de cubierta vegetal en la Cuenca del Duero en: *Estudios de la zona no saturada del suelo*. 8, 2007.
- Martínez H. E.; Fuentes E. J. P.; Acevedo H. E. (2008). “Carbono orgánico y propiedades del suelo” en: *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* v.8 (1) 2008, pp. 68-96.
- Medina-Méndez, J.; Volke-Haller, V. H.; González-Ríos, J.; Galvis-Spínola, a.; Santiago-Cruz, M. J.; Cortés-Flores J. I. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche en: *Universidad y Ciencia de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. 22 (2):175-189, 2006.
- Meza P. E. (1996). *Estudio comparativo de las propiedades físicas e hídricas entre los Andosoles de cultivo de bosque y bosque del Cofre de Perote Estado de Veracruz, México*. Tesis de fin maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Miller C., L. Turk, y H. Foth. (1981). *Fundamentos de la Ciencia del Suelo*. 5ª Impresión. CECSA. México.
- Miller, T. G. (1994). *Ecología y Medio Ambiente*. Grupo Editorial Iberoamericano. México.
- MINITAB 14. (2003). Release 14.1 Minitab Inc
- NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*: 31/12/2002
- NRSC (Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture and Soil Quality Institute). (2001). *Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning*.
- Pagiola Stefano, Bishop Joshua y Landell-Mills Natasha.(2003). *La venta de servicios ambientales forestales*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)

- Palmer, R. y F. Troeh. (1980). *Introducción a la Ciencia del Suelo: Manual de Laboratorio*. Traducción al Español de la segunda edición por F. Márquez. S. G.T. Editor S.S. Cd. De Mex. D.F. México
- Peña L. J. (2008). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. 3º edición, editorial Club Universitario. España.
- Pritchett, W. L. (1986). *Suelos Forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento*. Traducción al español de J. Hurtado V. Ed. LIMUSA, S.A. de C.V. México.
- Rios P. A. (2014). *Calidad del carbono secuestrado en suelos de los sistemas forestales de la zona del volcán La Malinche, Estado de Puebla*. Trabajo final de Maestría. BUAP.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 1ª. Edición digital México.
- Salas, G. De las, (1987). *Suelos y ecosistemas forestales; con énfasis en América Tropical*. IICA, Costa Rica. [versión en línea].
- Sampurno B. (1997) *Hidrología de las plantaciones forestales en los trópicos en: Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests*. CSIRO Canberra Australia. 1997. 571p.
- Santa-Olalla M. F. M.; López F. P.; Calera B. A. (2005). *Agua y agronomía*. Ediciones Mundi-Prensa. Universidad de Castilla de la Mancha. España.
- SEMARNAT. 2005. *Informe de la situación del Medio Ambiente en México*. Compendio de Estadísticas Ambientales. México, D.F.
- Shaxson F. y Barber. R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: El significado de la porosidad del suelo*. Boletín de suelos de la FAO 79. Roma
- Sims, J. T., Cunningham, S. D., y Sumner, M. E. (1997). *Assessing Soil Quality for Environmental Purposes: Roles and Challenges for Soil Scientists*. J. Environ. Qual. 26: 20-25.
- Singer, M. J., y Ewing, S. (2000). "Soil Quality". In: Sumner, M. E. (ed). *Handbook of Soil Science*. CRC Press.
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Examination and Description of Soils in: Soil survey manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Handbook Number 436. United States Department of Agriculture Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Thompson L. M. y Troeh F. R. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. 4º ed. Reverté. Barcelona.
- Uehara, G. & G. Guilman. (1981). *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays*. Westview Press, Boulder, Colorado.

- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. USA: USDA.
- Valera, M. A. (1996). Degradación Química y Biológica de Suelos Forestales. Proyecto de Investigación del Sistema de Investigación Zaragoza (SIZA-CONACYT), clave 960602012.
- Várallyay, G. (2006). Ideas on the future of soil Science p 145-146. En A. E. Hartemink, *The future of soil science*. The Netherlands: IUSS International Union of Soil Sciences.
- Warkentin, B. P. (1995). The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 50 (3):226-228.
- Werner, G. 1996. Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano. Universidad Autónoma de Tlaxcala-Centro de Estudios Municipales. Tlaxcala, México. pp. 3-17.
- Zamora J. C.; Crisancho F. (2008). La humedad en las Propiedades Físicas del suelo. Departamento de física, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Zamora, I. (2005). *Que se sabe sobre la calidad del suelo y su importancia*, en *Gaceta Universidad de Veracruz*, N° 94-96. [versión electrónica].
- Zapata-Hernández. R. D. (2002). *Química de los procesos pedogenéticos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- López D. J. C.; Bautista S. C. (n.d). *Biodiversidad del Parque Nacional Malinche-Tlaxcala*. Compiladores: Fernández F. J. A.; y López D. J. C. pp. 110-150

### Referencias web

- CONABIO. (2014). Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/servicios-ambientales>  
Fecha de consulta: 5 de Septiembre del 2014
- CONAFOR. (n.d) Servicios Ambientales y cambio climático. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/24/2727DOSSIER.pdf> Fecha de consulta: 5 de Septiembre del 2014
- ESA. (2014). Disponible en: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/SMOS/Mapping\\_moisture](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Mapping_moisture)  
fecha de consulta: 12 de octubre del 2014
- Higuera P. y Oyarzun R., (n.d). *El agua en los suelos*. Obtenido el 16 de Junio del 2014, de [http://www.uclm.es/users/higuera/mga/Tema03/Tema\\_03\\_Suelos\\_3\\_2.htm](http://www.uclm.es/users/higuera/mga/Tema03/Tema_03_Suelos_3_2.htm)
- SEMARNAT. (n.d.). disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/07\\_agua/recuadros/c\\_rec2\\_07.htm](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/recuadros/c_rec2_07.htm)  
fecha de consulta: 8 de Septiembre del 2014

- UNAD. (2014) disponible en:  
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201616/contLinea/\\_23.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201616/contLinea/_23.html) Fecha de  
consulta 25 de Noviembre del 2014.
- [www.unavarra.es/directo/congresos/apoyo/izns/15.pdf](http://www.unavarra.es/directo/congresos/apoyo/izns/15.pdf)