



**UAEM**  
Universidad  
Autónoma Del  
Estado De México



Facultad De  
Planeación  
Urbana Y Regional

“CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN LAS  
FUNCIONES ECOSITEMICAS DEL SUELO EN EL  
MUNICIPIO DE JILOTEPEC ESTADO DE MÉXICO”

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

Presenta:

ANDREA CONTRERAS CONTRERAS

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. En. C. GUSTAVO ALVAREZ ARTEAGA

M. EN C. ABEL IBÁÑEZ HUERTA

Toluca de Lerdo a 29 de noviembre, 2016



## *Dedicatoria*

*A la mujer más importante de mi vida, gracias mamá por tanto amor y por todo el apoyo que me brindas.*

*Te quiero mucho...*

*Esto es gracias a ti.*

## *Agradecimientos*

*A Dios por ser mi guía y llenar mi vida de bendiciones...*

*Al profesor Gustavo por la confianza y apoyo para la realización de esta tesis, por todo su tiempo, paciencia y amistad. Sus conocimientos, orientación, su manera de trabajar y su persistencia han sido fundamentales para mi formación.*

*Al maestro Abel por su aporte y enriquecimiento a este trabajo de investigación.*

*A la maestra Belina y la maestra Martha, por brindarme su tiempo para la mejora de este trabajo.*

*A mi hermano por los momentos de alegría que me regala.*

*A Sebastián por su apoyo incondicional, sus consejos y todo su cariño.*

*Al proyecto PROD'EP por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.*



# ÍNDICE

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 1  |
| Introducción .....   | 2  |
| Planteamiento del problema .....                           | 4  |
| Justificación .....  | 6  |
| Hipótesis.....   | 7  |
| Objetivos: .....   | 8  |
| Capítulo 1 .....   | 9  |
| Marco conceptual .....                                     | 9  |
| 1.1 ¿Qué es el suelo?.....                                 | 10 |
| 1.2 La Geografía del Suelo.....                            | 11 |
| 1.3 El estudio del suelo dentro del paisaje .....          | 13 |
| 1.4 Los servicios ecosistémicos del suelo.....             | 16 |
| 1.5 La calidad de suelo .....                              | 19 |
| 1.6 Indicadores de la calidad de suelo .....               | 20 |
| Capítulo 2 .....   | 24 |
| Caracterización biofísica de la zona de estudio .....      | 24 |
| 2.1 Delimitación del municipio.....                        | 25 |
| Capítulo 3 .....   | 36 |
| Materiales y métodos .....                                 | 36 |
| 3.1 Metodología general del estudio .....                  | 37 |
| 3.2 Metodología general de campo .....                     | 38 |
| 3.3 Análisis físicos y químicos.....                       | 40 |
| 3.4 Análisis estadístico .....                             | 41 |
| Capítulo 4 .....   | 42 |
| Resultados .....   | 42 |
| 4.1 Ubicación y delimitación del transecto de estudio..... | 43 |
| 4.2 Indicadores físicos de Calidad del suelo.....          | 50 |
| 4.3 Indicadores químicos de la calidad del suelo .....     | 55 |
| Capítulo 5 .....   | 61 |
| Discusión .....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| 5.1 Análisis de correlación entre indicadores de calidad .....                | 62 |
| 5.2 Correlaciones significativas entre indicadores de calidad del suelo ..... | 64 |
| 5.3 Análisis de las Unidades de Paisaje .....                                 | 66 |
| 5.4 Generación de servicios ecosistémicos por sitio.....                      | 74 |
| Capítulo 6 .....  | 77 |
| Conclusiones .....  | 77 |
| Conclusiones.....   | 78 |
| Bibliografía .....  | 80 |

## DE INDICE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura: 1 Panorama de la degradación de suelos para el año 2002. (Fuente: SEMARNAT y CP, 2003).....                   | 5  |
| Figura: 2 Representación de transecto de tipología de suelos (Fuente: Badía <i>et al.</i> , 2000). .....              | 14 |
| Figura: 3 Representación de una toposecuencia edáfica (Fuente: Badía <i>et al.</i> , 2011).....                       | 14 |
| Figura: 4 Representación de una catena de suelos (Fuente: Madri+d, 2011) .....  | 15 |
| Figura: 5 Servicios ecosistémicos del suelo (Fuente: FAO, 2015).....  | 19 |
| Figura: 6 Delimitación del municipio de Jilotepec dentro del estado de México. (Imagen de dominio público).....       | 25 |
| Figura: 7 Mapa hidrológico de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016).....                     | 28 |
| Figura: 8 Mapa edafológico de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016).....                     | 32 |
| Figura: 9 Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016).....    | 35 |
| Figura: 10 Esquema general del proceso de la investigación.....   | 37 |
| Figura: 11 Esquema general de muestreo, tomado de Álvarez <i>et al.</i> (2013) .....                                  | 38 |
| Figura: 12 Esquema de muestreo en campo tomado de (USDA, 1999).....   | 39 |
| Figura: 13 Distribución de las unidades de paisaje dentro del transecto altitudinal .....                             | 44 |
| Figura: 14 Composición granulométrica de los primeros 30 cm del suelo para las diferentes Unidades de Paisaje.....    | 51 |
| Figura: 15 Valores de Densidad Aparente para los sitios de estudio. ....  | 53 |
| Figura: 16 Porosidad en los primeros 30 cm de profundidad para los suelos de las diferentes Unidades de paisaje ..... | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figura: 17 Contenido de carbono en los suelos superficiales de las diferentes unidades de paisaje. .... | 57 |
| Figura: 18 Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo (30 cm) de las Unidades de Paisaje.....       | 59 |
| Figura: 19 Relación C/N en las diferentes Unidades de Paisaje .....                                     | 60 |
| Figura: 20 Grafica de correlación de variables (elaboración propia en XLSTAT).....                      | 63 |
| Figura: 21 Gráfica de correlación COS / Densidad Aparente. ....   | 64 |
| Figura: 22 Análisis de correlación COS /Arcillas .....  | 65 |
| Figura: 23 Panorámica de la unidad de paisaje (BEC) .....   | 66 |
| Figura: 24 Panorámica de la unidad de paisaje (BED) .....   | 67 |
| Figura: 25 Composición textural del suelo superficial de las Unidades de Paisaje BEC y BED.....         | 68 |
| Figura: 26 Unidad Paisajística Bosque Reforestado (BR).....   | 70 |
| Figura: 27 Composición textural del sitio BR .....  | 71 |
| Figura: 28 Unidad paisajística a pastizal inducido (PI).....  | 72 |
| Figura: 29 Unidad paisajística agricultura de riego (AR).....   | 72 |
| Figura: 30 Composición textural del sitio PI y Composición textural del sitio AR .....                  | 73 |

## ÍNDICE DE CUADROS DE CONENIDO

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 1 Indicadores físicos de calidad del suelo seleccionados .....               | 40 |
| Cuadro 2 Indicadores químicos de calidad del suelo seleccionados.....               | 40 |
| Cuadro 3 Unidades de paisaje representativas de la zona de estudio.....             | 43 |
| Cuadro 4 Resultados de análisis físicos.....  | 50 |
| Cuadro 5. Resultado de los indicadores químicos de la calidad del suelo .....       | 55 |
| Cuadro 6 Matriz de correlaciones lineales mediante el método de Pearson. ....       | 62 |
| Cuadro 7 Efectos de los servicios ecosistémicos por uso y manejo (FAO. 2015).....   | 74 |
| Cuadro 8 Generación de servicios ecosistémicos del suelo por Unidad de Paisaje..... | 76 |



## **Acrónimos**

|          |   |
|----------|---|
| BEC      | Bosque de Encino Conservado   |
| BED      | Bosque de Encino Degradado  |
| BR       | Bosque Reforestado  |
| PI       | Pastizal Inducido   |
| AR       | Agricultura de Riego  |
| FAO      | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| MO       | Materia Orgánica  |
| SEMARNAT | Secretaría del Medio Ambiente Y Recursos Naturales                        |
| USDA     | Departamento de Agricultura de los Estados Unidos                         |
| UP       | Unidades de Paisaje   |
| DA       | Densidad Aparente   |
| DR       | Densidad Real   |
| CIC      | Capacidad de Intercambio Catiónico  |

## **Resumen**

Los cambios espacio temporales en las propiedades del suelo constituyen indicadores de su funcionamiento y del manejo a que es sometido; sin embargo, deben considerarse para su mejor comprensión las variables, factores y mecanismos que intervienen en su funcionamiento, los cuales se deben estudiar de manera independiente, para poder inferir su comportamiento (Mortola y Lupi, 2011).

Para identificar las variaciones en su condición y aquellos posibles procesos degradativos en el suelo, es de gran utilidad analizar algunas sus propiedades físicas, químicas o biológicas que permitan establecer su calidad o salud bajo las condiciones de uso y manejo actual. El cambio de uso de suelo forestal hacia la expansión agrícola y pecuaria influye directamente en los servicios ecosistémicos, ejemplo de esto son los ciclos del agua, el carbono y el nitrógeno tanto en la biosfera como en el suelo, las emisiones de gases de efecto invernadero y la pérdida de biodiversidad.

En esta investigación se emplearon métodos de diagnóstico en campo y laboratorio para identificar aquellas propiedades del suelo que permitan establecer su grado de salud o calidad, para ello se trabajó en una zona de transición de usos de suelo, partiendo del uso forestal hasta un uso agrícola y pecuario. Los resultados indicaron que en función del cambio de uso, las propiedades que más identifican su grado de deterioro son el incremento de la densidad aparente, la disminución de la porosidad, del contenido de materia orgánica y nitrógeno total, así como la disponibilidad de nutrientes en el suelo del área de estudio, ubicada dentro del municipio de Jilotepec, Estado de México.

A partir de lo anterior es posible aseverar que las implicaciones de estas propiedades en el suelo afectan la viabilidad de los servicios ecosistémicos como la captura de carbono, la captación e infiltración de agua, preservación de la biota, condiciones que repercuten en la población local.

## **Introducción**

En las últimas décadas el cambio del uso del suelo se ha constituido como uno de factores plenamente implicados en el deterioro global del suelo, alterando procesos y ciclos biogeoquímicos; lo anterior se vuelve trascendental si se considera que es a través de estas transformaciones donde se materializa la relación entre el hombre y el medio ambiente (Lambin *et al.*, 1999).

De acuerdo a la SEMARNAT (2010), la alteración de la cubierta vegetal en México ha sido impulsada en gran parte por el crecimiento de la población y la presión que ello implica sobre el aprovechamiento de los recursos naturales y la transformación del paisaje. Entre las consecuencias más importantes del cambio de uso del suelo están las alteraciones en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (agua y carbono). Dentro de este contexto, se puede considerar que el suelo puede actuar como un registro histórico de dichas variaciones que tienen lugar en los ecosistemas, ya sea por causas antrópicas o naturales, lo cual puede evidenciarse a través de su estudio sistemático (Benítez & Bellot, 2003).

Tomando en cuenta el escenario anterior, en este trabajo se planteó la necesidad de diagnosticar el grado de afectación del suelo como producto de su cambio de uso y manejo dentro de una zona rural perteneciente al municipio de Jilotepec, Estado de México. Para ello se emplearon métodos de evaluación y diagnóstico con los cuales se pudo obtener información detallada sobre el desempeño actual del suelo a partir de sus propiedades y procesos.

En el primer capítulo se abordaron los conceptos y términos relacionados con los servicios ecosistémicos y la calidad del suelo, así como la relación entre ellos. Posteriormente se aborda el tema de la variabilidad espacial del suelo a mediante los postulados de la geografía de suelos en los que queda implícito la función de los factores formadores. Dentro del mismo capítulo se presenta el marco referencial que hace alusión a trabajos de investigación realizados con anterioridad a diferentes escalas y regiones de trabajo.

En el segundo capítulo se realizó una caracterización biofísica general del municipio de Jilotepec y de manera particular en la zona de estudio. Lo anterior

tuvo por objeto entender el entorno biofísico que dio lugar a la formación de los suelos así como de las condiciones de uso y prácticas de manejo que lo han llevado a su condición actual.

En el capítulo 3 se expone la metodología empleada para la realización de esta investigación tomando como referencia diversas fuentes reconocidas en estudios similares como son las empleadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1999), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2011) y en el caso de la caracterización de los suelos en campo se recurrió al método de descripción y evaluación ecológica de suelos desarrollado por Siebe *et al.* (1996). En la parte analítica se siguieron los procedimientos establecidos por ISRIC (2002) y la NOM-021-RECNAT-2000.

En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos en las diferentes etapas del estudio y su interpretación mediante métodos estadísticos descriptivos, paramétricos, con los cuales fue posible establecer la relación que guardan entre sí los diferentes componentes del sistema edáfico y sus implicaciones sobre el funcionamiento del suelo.

El capítulo 5 aborda la discusión de los resultados y la interacción de éstos para determinar la relación entre la calidad de suelo y su impacto en los servicios ecosistémicos de acuerdo a las diferentes unidades de paisaje. Finalmente en el capítulo sexto se exponen las conclusiones de esta investigación.

## **Planteamiento del problema**

Citando a Miliarium (2004): “el suelo es un sistema abierto, complejo, con una estructura definida y polifuncional; se comporta como un filtro a través del cual se producen y regulan los flujos de materia y energía y como tal, es susceptible de sufrir deterioro, disminuyendo e incluso inhibiendo algunas de sus funciones a causa de las presiones que soporta”. De manera histórica, los suelos del mundo se han visto sometidos cada vez con mayor intensidad a agresiones que afectan a su variabilidad y su calidad para poder desempeñar sus funciones.

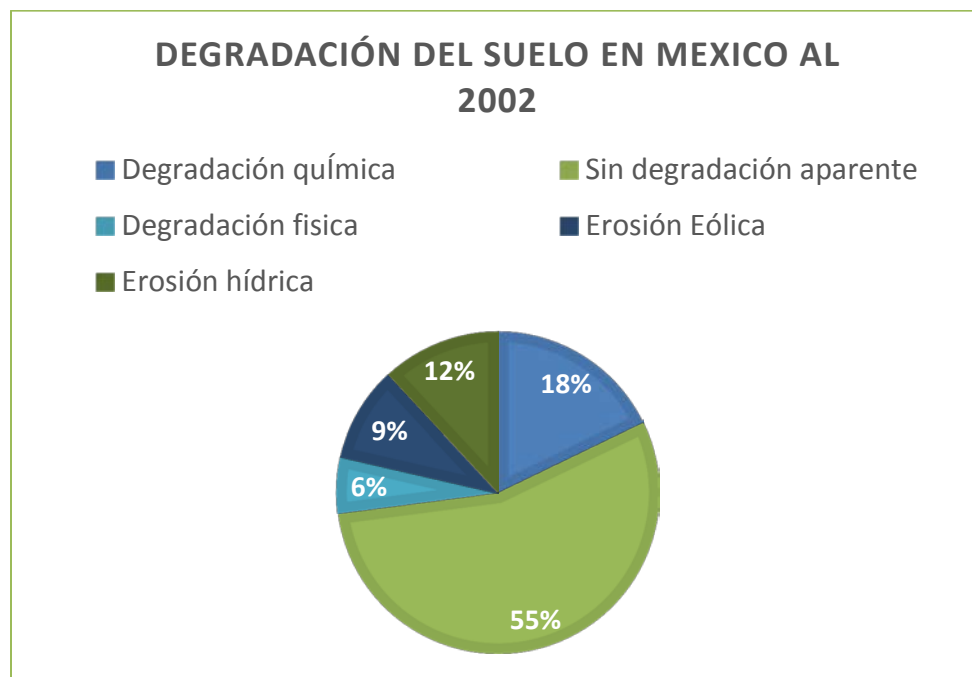
Dentro de los principales problemas vinculados con el manejo del suelo se encuentran los siguientes:

- Declinación de su calidad como ambiente para las raíces.
- Erosión y pérdida de la capa superficial por acción del viento y el agua.
- Pérdida de la cubierta vegetal, incluyendo las especies leñosas y perennes.
- Acidificación, disminución de su fertilidad y agotamiento de los nutrimentos requeridos por las plantas.
- Incremento de la salinidad, especialmente en los sistemas irrigados.

No obstante que algunos de estos procesos obedecen a causas naturales, sus impactos son agravados por prácticas de manejo inapropiadas y por presiones inducidas por el hombre. Esto tiene como efecto la reducción de su potencial productivo, así como de su capacidad para servir como un filtro natural o amortiguador frente a dichas alteraciones (*Miliarium, 2004*).

Por otra parte, el rápido crecimiento que ha experimentado la población en las últimas décadas y la consecuente demanda de bienes y servicios que esta población requiere, han incrementado la presión sobre el aprovechamiento de los recursos naturales rebasando en muchos casos su capacidad de carga (*Mas et al., 2009; Rosete et al., 2009*), fenómeno que ha sido reconocido desde hace más de dos décadas como causa importante de cambios en el ambiente global, y que está ligado con procesos socioeconómicos y geopolíticos locales, regionales y globales altamente complejos (Turner, 1989).

De acuerdo a cifras oficiales, para el año de 2002, en el territorio nacional cerca del 45 % de los suelos presentaban algún tipo de degradación física, química, eólica o hídrica (Semarnat y C.P., 2003), sin embargo, estudios más recientes sugieren esta cifra pudiera alcanzar entre el 55 y 62 % de los suelos del país (CONAFOR, 2013; INEGI, 2014). Un aspecto en lo que si concuerdan estos estudios es en mencionar que los principales tipos de degradación son por causas químicas hídricas y eólicas (Figura 1).



**Figura:** 1 Panorama de la degradación de suelos para el año 2002. (Fuente: SEMARNAT y CP, 2003)

Por lo que respecta al Estado de México, el diagnóstico ambiental realizado para la entidad, indica que existen 5 490.16 km<sup>2</sup> de suelos afectados por erosión hídrica y 1, 069.64 km<sup>2</sup> por erosión eólica (GEM, 2007), en tanto que cifras del gobierno federal en un estudio previo establecieron que el 61.29 % de los suelos del territorio mexiquense presentaban algún tipo e intensidad de degradación para el año de 2002 (SEMARNAT y CP, 2003). Considerando lo anterior, la degradación del suelo en la entidad representa un problema de primer orden por sus implicaciones sociales, políticas y económicas.

Si bien, de acuerdo a los estudios mencionados, el municipio de Jilotepec no figura entre los principales municipios sujetos a la degradación de sus suelos, la dinámica socioeconómica actual de esta región, prevé que en un futuro inmediato, la construcción de vías troncales de comunicación, el establecimiento de nuevos polos de desarrollo industrial y el crecimiento poblacional, tendrán un impacto inminente sobre el territorio y la necesidad de cambio de uso del suelo, en detrimento de los remanentes de vegetación natural, lo cual podría desencadenar los procesos de degradación en el suelo y la consecuente pérdida o disminución de servicios ambientales tan importantes como la captación de agua, los sumideros de carbono, pérdida de biodiversidad y disminución de la productividad agrícola por citar los más importantes.

### **Justificación**

De acuerdo a los estudios referidos, el combate a la degradación del suelo debiera estar en el primer plano de atención dentro de las políticas públicas dado el impacto que ocasiona en los distintos ámbitos de la actividad humana y los procesos naturales. Se identifican como causas principales de este fenómeno el cambio de uso, la sobreexplotación de los recursos naturales, la falta de aplicación de prácticas de manejo sustentables, el incremento de la frontera agrícola y pecuaria en detrimento de bosques y selvas, la expansión de los asentamientos humanos y en última instancia, las consecuencias del cambio climático.

Ante tal panorama, es importante considerar las múltiples funciones que cumple el suelo dentro de los ecosistemas naturales y productivos, así como las repercusiones de su degradación y pérdida parcial o total. De esta forma, la alteración de los procesos y funciones del suelo, vinculada con su cambio de uso debe ser evaluada y atendida de manera prioritaria por los diferentes sectores sociales y económicos, debido a que sus efectos repercuten no solo en la preservación de los sistemas naturales y productivos, sino también en el incremento de la pobreza y dependencia alimentaria de la sociedad.

Dentro de un contexto ecológico, la mayor degradación ambiental se alcanza cuando la magnitud de los daños sobrepasa la resiliencia de los ecosistemas para

regenerar las estructuras y procesos ecológicos que favorecen la permanencia del potencial natural y de los servicios ambientales asociados a los ecosistemas. (OMNIA, 2013)

A escala regional, el acelerado crecimiento demográfico experimentado en décadas recientes dentro del municipio de Jilotepec ha inducido el fraccionamiento de la propiedad y su cambio de uso de suelo, desplazando la cobertura vegetal natural por otros usos como el agrícola, pecuario, la conformación de asentamientos humanos, uso comercial e industrial, situación que pudiera estar provocando un notable deterioro en las funciones del suelo, así como repercusiones sobre la estructura y funcionamiento de los reductos de vegetación natural, disminución de la productividad agrícola y mayor déficit de agua por la desecación de manantiales. Por lo anterior, es necesario identificar en su fase inicial aquellos procesos de degradación que inciden en la pérdida de calidad del suelo para establecer medidas preventivas que evitarán costos ambientales y económicos mayores.

### **Hipótesis**

Bajo el panorama anterior la hipótesis del presente trabajo propone que el cambio de uso del recurso suelo dentro de la zona rural del municipio de Jilotepec, Estado de México, ha provocado la afectación de sus propiedades y funciones, lo cual se traduce en procesos de degradación que pueden ser evidenciados mediante la aplicación de indicadores de calidad del suelo.

Para corroborar o descartar este supuesto se emplearán diferentes fundamentos teóricos y metodologías de campo y laboratorio.



**Objetivos:**

**Objetivo general:** Evaluar el impacto del manejo y cambio de uso del suelo sobre sus propiedades y funciones mediante la aplicación de indicadores de calidad.

**Objetivos específicos**

1. Delimitar y caracterizar las diferentes unidades de paisaje ubicadas dentro de un transecto de estudio representativo de las diferentes condiciones de uso de suelo en la zona de estudio.
  2. Determinar los parámetros físicos y químicos del suelo en campo y laboratorio
  3. Procesar y analizar la información de los indicadores edáficos mediante métodos estadísticos con objeto de identificar los principales procesos de degradación en el suelo.
- 
1. Determinar los indicadores de calidad del suelo más representativos para los diferentes usos de suelo en la zona de estudio
  2. Realizar un diagnóstico general de las funciones ecosistémicas del suelo a partir de su estado actual.

# *Capítulo 1*

*Marco conceptual*

## 1.1 ¿Qué es el suelo?

La forma en que la sociedad conceptualiza al suelo ha tenido una evolución en el tiempo; inicialmente se consideraba a este recurso simplemente como un sustrato en el cual se desarrollaban los cultivos, por lo que el interés se centraba en cuestiones de fertilidad y manejo hidráulico. Esta concepción perduró a través de los siglos y no tuvo cambios importantes hasta que se detonó el desarrollo de la Ciencia del Suelo y la aplicación de nuevos métodos de caracterización del suelo en campo y laboratorio. Es así como Dokuchaev (1899), a quien se le considera el creador de esta rama científica dio una nueva definición del suelo al concebirlo como "Un cuerpo natural, formado por la acción común del material parental, el relieve el clima, los organismos, vivos y muertos y la edad de la superficie geológica" (Dokuchaev 1989, citado por Porta, 1994).

Posteriormente, con la globalización de los procesos productivos y la acelerada degradación de los recursos naturales (entre ellos el suelo), se establece la necesidad en primer término de ampliar esta definición y posteriormente entender a detalle los procesos que tienen lugar dentro del suelo (White, 2006). Definiciones más contemporáneas como las de Atlas y Bartha (2002), y Nannipieri *et al.* (2003), proponen que "el suelo es un sistema estructurado, heterogéneo y discontinuo, fundamental e irremplazable, desarrollado a partir de una mezcla de materia orgánica, minerales y nutrientes capaces de sostener el crecimiento de los organismos y los microorganismos". Adicionalmente, la World Reference Base (WRB, 2015), postula que el suelo debe ser concebido como un cuerpo natural continuo, tridimensional y de constante evolución en el tiempo. Como punto de confluencia de las definiciones anteriores, se puede establecer que los rasgos principales del suelo son los siguientes:

- Está formado por constituyentes minerales y orgánicos e incluyen una fase sólida, líquida y gaseosa.
- Los constituyentes están organizados en una estructura específica en función de determinados procesos pedológicos.

- El suelo está en constante evolución, por lo que el factor tiempo es determinante para su formación.

## **1.2 La Geografía del Suelo**

Un elemento adicional a considerar en el estudio del suelo es la comprensión de su variabilidad espacial dentro del paisaje, por ello, a partir del siglo XIX surge como rama científica la Geografía del suelo, inicialmente como una ciencia descriptiva. Dentro de esta línea de estudio, los geógrafos se enfocaron a la interpretación de la información espacial, intentado entender las reglas de ubicación y comportamiento de los objetos geográficos. Desde entonces, la geografía sumó también las funciones explicativas (Huguet del Villar, 1921 citado por Krasilnikov *et al*, 2006). Consecuentemente la nueva rama científica, conocida como Geografía de suelos intenta describir y explicar su distribución a diferentes escalas, considerando los factores formadores como el clima, la actividad biológica, la geología, relieve, así como el tiempo de formación dentro de las diferentes zonas bioclimáticas del mundo. Bajo estos supuestos, la Geografía de suelos tiene como meta establecer las reglas generales de la distribución, explicar el papel de los factores formadores en su distribución, así como la interrelación de los suelos en el espacio a diferentes escalas (Krasilnikov *et al.*, 2006).

Considerando las zonas bioclimáticas, la presencia del material parental y de los procesos edafogéticos específico la Geografía del suelo propone que los suelos se distribuyen de acuerdo a los siguientes patrones

### **Suelos zonales**

Los suelos zonales, son suelos monogenéticos desarrollados a partir de materiales silicatados, de textura intermedia (limosa o limo-arcillosa), con un buen drenaje y sin influencia de procesos como la erosión, sedimentación, salinización o degradación antropogénica; ejemplo de estos suelos son aquellos donde se establecen los bosques templados, como los Albeluvisoles y Luvisoles, para las

estepas los Chernozems, Calcisoles en desiertos y Acrisoles en selvas tropicales (WRB, 2006).

### **Suelos azonales**

Son los suelos sin mayor evidencia de edafogénesis, por eso no presentan en su perfil o bien es incipiente la acción de los factores formadores, siendo suelos muy jóvenes. La mayoría de los suelos de este grupo tienen un desarrollo leve por efecto de la erosión y la sedimentación. Dentro de este grupo pueden incluirse los Leptosoles, Cambisoles, Regosoles y Tecnosoles (WRB, 2006)

### **Suelos intrazonales**

Son suelos en los que la influencia del material parental, del hidromorfismo o de un proceso edafogénico tienen un mayor efecto. Por este motivo los suelos intrazonales no reflejan de manera pronunciada los factores bioclimáticos y se encuentran con la morfología y propiedades muy parecidas en más de una zona bioclimática. Estos suelos pueden tener ciertas diferencias dependiendo de las condiciones climáticas. Ejemplo de este grupo son los Arenosoles, Vertisoles, Andosoles y los suelos derivados de roca caliza (Leptosoles y Phaeozems); otros ejemplos son aquellos afectados por un exceso de humedad como los Histosoles, Gleysoles, Planosoles y Stagnosoles. También son mayormente intrazonales suelos salinos y alcalinos como los Solonchaks y los Solonetz (WRB, 2006; Krasilnikov *et al.*, 2006).

### **Suelos modales**

Son los suelos que reflejan de manera más evidente el complejo de los factores formadores de suelo, para este grupo de suelos se toma en cuenta el material parental, la historia del paisaje, el régimen de humedad, etc... Los suelos modales pueden incluir tanto a los suelos zonales como los intrazonales, siendo ejemplo de lo anterior los Leptosoles rendzicos, ampliamente distribuidos dentro de la península de Yucatán. (Krasilnikov *et al.*, 2006).

### ***Suelos dominantes***

Son los que ocupan el área mayor dentro de un territorio. En los mapas edafológicos de escalas medianas a grandes, que implican la generalización de los datos, se demuestran los polígonos por el suelo dominante, independientemente de que estos suelos sean zonales, azonales o intrazonales (Krasilnikov *et al.*, 2006).

Bajo la perspectiva anterior, el conocimiento de la Geografía del suelo permite identificar con eficiencia una secuencia de suelos que obedecen a la mayor o menor influencia de los factores formativos, condición que es extrapolable a otras zonas donde dichos factores actúan de manera similar, de tal forma que el estudio de esta seriación permite entender el comportamiento del suelo a diferentes escalas de estudio (Krasilnikov *et al.*, 2005)

### **1.3 El estudio del suelo dentro del paisaje**

Retomando el último apartado, para proceder al estudio sistemático del suelo considerando su posición y condición dentro del paisaje, existen diferentes métodos a los cuales se puede recurrir y cuya elección estará en función de los objetivos del estudio mismo. De acuerdo a Krasilnikov, *et al.* (2006), algunos de los criterios para definir el estudio espacial del suelo consideran los siguientes conceptos:

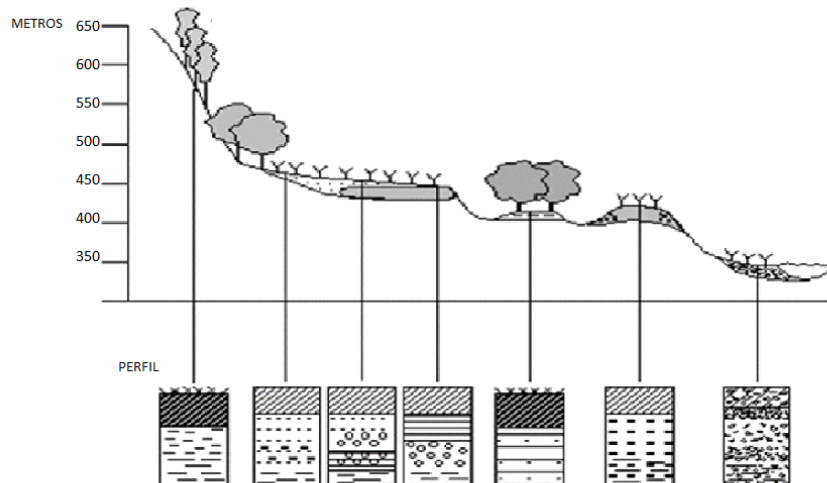
#### ***Transecto***

Es cualquier secuencia de suelos de cualquier escala. Generalmente incluye varias topoformas, material parental, climas, ecosistemas y el uso de suelo (o una combinación de estos). A veces se hace un transecto de acuerdo a la gradiente ambiental. (Figura 2).

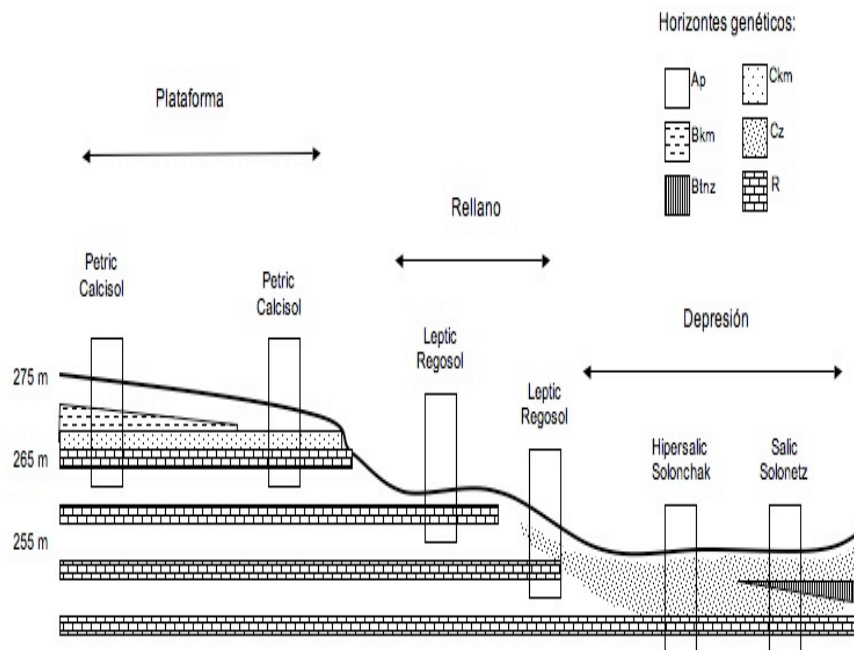
#### ***Toposecuencia***

Es cualquier secuencia de suelos en un relieve pronunciado. (Figura 3) Generalmente incluye una cantidad limitada de topoformas, por ejemplo una

ladera, desde la cumbre hasta el pie de monte, o una secuencia que cruza el espacio entre dos parteaguas, incluyendo un valle entre ellos.



**Figura: 2** Representación de transecto de tipología de suelos (Fuente: Badía *et al.*, 2000).



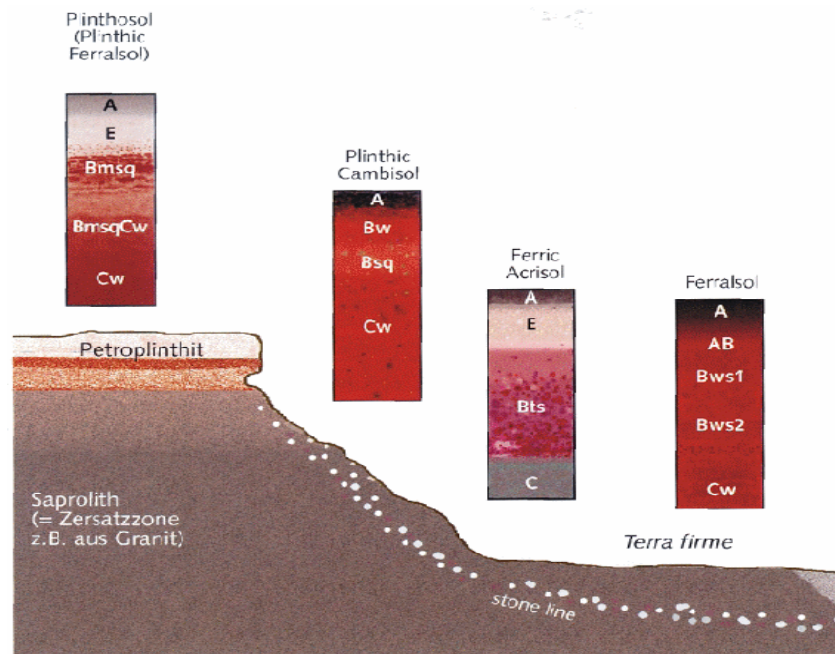
**Figura: 3** Representación de una toposecuencia edáfica (Fuente: Badía *et al.*, 2011).

### **Cronosecuencia**

Es una secuencia de los suelos que se forman a partir del mismo material parental y bajo los mismos efectos ambientales, pero tienen diferentes edades absolutas. En realidad el término no está directamente relacionado con la edafogeografía: una cronosecuencia es un arreglo conceptual de los suelos no necesariamente relacionados en el espacio (Huggett, 1998).

### **Catena**

Según Milne (1935), es una unidad de cartografía, un agrupamiento de los suelos, los cuales aunque diferentes desde el punto de vista del sistema natural de clasificación, están relacionados en su ubicación topográfica y se repiten en la misma relación uno a otro en cualquiera de las condiciones similares. Bushmell (1943), modificó el concepto considerando a la catena como un grupo de suelos con una relación geográfica cercana, pero con diferentes características de perfil debidas a diferencias en su drenaje, del relieve o tiempo de exposición en superficie (Figura: 3).



**Figura: 4** Representación de una catena de suelos (Fuente: Madri+d, 2011)



### ***Edafopaisaje y regiones edáficas***

Es el área caracterizada por una combinación de suelos que generalmente incluyen a más de un grupo taxonómico. El mosaico de suelos dentro de un edafopaisaje debe de tener la misma lista de suelos, la misma proporción del área de cada grupo, la misma forma predominante de los polígonos de cada suelo y la misma relación funcional entre los miembros del edafopaisaje (el mismo arreglo espacial en una catena).

### **Región edáfica**

Es un territorio caracterizado por la uniformidad relativa de los suelos y los factores ambientales, como la estructura geológica, orográfica, el clima y los ecosistemas (Krasilnikov *et al.*, 2006).

Para las regiones edáficas la “uniformidad” no significa que los suelos deben ser iguales no que deben formar un mosaico de la misma estructura como en el caso de edafopaisaje.

## **1.4 Los servicios ecosistémicos del suelo**

Los servicios ecosistémicos o ambientales son todos aquellos beneficios que el ser humano obtiene de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Dentro de los ecosistemas terrestres, los suelos son proveedores o están involucrados con un gran número de servicios ecosistémicos (Figura 4), mismos que a continuación se describen:

- **Soporte y suministro de nutrientes.** El suelo es el sustrato en el que se establece la vegetación y adquiere los nutrientes necesarios para su desarrollo. La pérdida acelerada de los suelos en el mundo representa un serio desafío para la producción de alimentos, por lo que requiere de atención prioritaria para revertir esta tendencia (PNUMA, 2000).

- **Producción de biomasa: Los suelos** sirven de sustrato para una amplia variedad de plantas, animales y microorganismos que contribuyen a crear un medio que resulta básico para la producción primaria de los ecosistemas terrestres. Así aportan aire, agua y nutrientes para las plantas además de una base fija de soporte.
- **Amortiguación:** de los cambios de pH como producto de fenómenos naturales o antrópicos (adición de contaminantes químicos p.e.).
- **Regulación medioambiental:** El suelo actúa como medio protector del agua gracias a su capacidad amortiguadora, transformadora y de filtración. De este modo, los contaminantes procedentes de la atmósfera y otras fuentes, son retenidos por los filtros físico-químicos, químicos y procesos de adsorción, de modo que no alcanzan las aguas subterráneas ni las cadenas tróficas. El suelo además regula los aportes de agua externos reduciendo el impacto de fuertes precipitaciones sobre otros sistemas (ríos, lagos, acuíferos).
- **Reserva genética:** Reserva de ADN en los organismos del suelo
- **Hábitat biológico:** El suelo sirve de hábitat para un gran número de especies, un puñado de suelo puede contener más de un billón de organismos de millares de especies. La presencia de microorganismos es de vital importancia ya que son los responsables de la descomposición, conversión y síntesis de sustancias orgánicas que hacen que se cierren los ciclos de la materia y de algunos elementos.
- **Es fuente de materias primas:** El suelo es también fuente de materias primas para numerosas actividades. La extracción de turba, grava, arena, arcilla, rocas, agua, etc. son una importante función económica del suelo
- **Servicios hidrológicos.** Tales como la regulación de la calidad y cantidad de agua, el amortiguamiento entre los ciclos de inundación y sequía, generación, protección y mantenimiento de suelos y sus nutrientes, la regulación del clima a escalas locales y regionales, estabilización del paisaje, con el fin de evitar deslaves y azolve de los ríos debido a su compleja estructura, los múltiples estratos de vegetación de los bosques

interceptan el agua de lluvia de manera muy eficiente, canalizándola lentamente por sus hojas, ramas y troncos hacia el suelo, de esta forma se detiene el escurrimiento pluvial y evitan la saturación del suelo (Sünderborg y Rapp, 1986).

- **Fijación de gases con efecto invernadero.** La mayor parte del carbono que ingresa a los ecosistemas, lo hace a través de la fotosíntesis, siendo más evidente su incorporación en la biomasa superficial; sin embargo, los suelos en conjunto, son los que poseen la mayor cantidad de este elemento, ya que más de la mitad del que es asimilado finalmente llega a la parte subterránea por medio del crecimiento, el movimiento y los exudados de las raíces de las plantas, además de la descomposición de hojarasca (Montagnini y Fair, 2004). Por otra parte, los depósitos de carbono orgánico en el suelo representan un equilibrio dinámico de pérdidas y ganancias que se afectan por procesos erosivos, oxidación, humificación y escorrentía, razón por la cual, el secuestro de carbono se da principalmente en aquellos sistemas que aportan altas cantidades de biomasa, mejoran la estructura del suelo, aumentan la actividad y la diversidad de fauna edáfica y propician mecanismos de reciclaje (Lal, 2004).



**Figura: 5** Servicios ecosistémicos del suelo (Fuente: FAO, 2015)

### 1.5 La calidad de suelo

De acuerdo a Doran y Parkin (1994), precursores de esta línea de investigación, la calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes y hacen referencia a que esta condición debe ser evaluada basándose en funciones como el mantenimiento de la productividad y biodiversidad, la regulación de los flujos hidrológicos, la filtración y amortiguamiento de contaminantes, la regulación de los ciclos biogeoquímicos, el soporte estructural y la resistencia a la degradación y erosión. Por su parte, Carter *et al.* (1997), postulan que este término se relaciona con la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. Para Gregorich *et al.* (1994), la calidad del suelo se considera como una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente en relación con un uso específico; sin embargo, Arshad y Coen (1992), le adjudicaron a este concepto un vínculo más ecológico, al definirlo como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, y a la vez preservar un ambiente sano.

Las definiciones más contemporáneas de calidad del suelo se basan en varias de sus funciones y no solo en un uso específico, aunque este concepto continúa evolucionando (Singer y Ewing, 2000). Para el presente trabajo se tomará en cuenta la definición del Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America que define al concepto como

*“La capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat” (SSSA, 2016).*

## **1.6 Indicadores de la calidad de suelo**

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992). Es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar esta condición y para tal caso se hace uso de los indicadores, que son determinados parámetros del suelo que representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski et al., 1998). Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (SQI, 1996).

En general los indicadores de calidad pueden ser interpretados en dos formas:

- Considerando los valores obtenidos para cierto suelo como base de comparación y verificando los cambios que ocurren al transcurrir el tiempo por efecto del manejo, lo que determina si la calidad aumenta o decrece

(Seybold, *et al.*, 1997; Masciandaro y Ceccanti, 1999; Karlen *et al.*, 2001; Saviozzi *et al.*, 2001).

- Contrastando los valores de los indicadores obtenidos con valores de referencia que se le han asignado a un suelo que funciona a una capacidad deseada. Con este enfoque se puede deducir el efecto del manejo sobre la calidad del suelo y su tendencia en el tiempo (Mac Donald *et al.*, 1995; Kettler *et al.*, 2000).

Para Bautista *et al.* (2012), un buen indicador de calidad del suelo debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Permitir el análisis de la situación actual del suelo con base en la función específica que se evalúa e identificar los puntos críticos de su sustentabilidad
- Prever los impactos de una intervención
- Minimizar los impactos de una intervención y ayudar en la toma de decisiones para su manejo.

De acuerdo a su naturaleza, los indicadores de calidad en el suelo pueden ser químicos, físicos o biológicos. A continuación se describen las características y ejemplos de cada grupo.

**Indicadores químicos:** Los indicadores químicos se refieren a variables que describen y/o afectan las relaciones suelo planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos (SQI, 1996). Algunos indicadores son la disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, carbono orgánico, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable.

**Indicadores físicos:** Las propiedades físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar

fácilmente (Singer y Ewing, 2000). Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. Son ejemplo de lo anterior la estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada.

***Indicadores biológicos:*** Los indicadores biológicos integran una gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y los subproductos de los macro invertebrados (Karlen et al., 1997), ya que éstos rompen, transportan y mezclan el suelo al construir galerías, nidos, sitios de alimentación, turrículos o compartimientos (Villani et al., 1999); también afectan determinados procesos de manera directa a la incorporación y redistribuir materiales o indirectamente al contribuir en la formación de comunidades microbiales, transporte de propágulos, antibiosis o reducción selectiva de la viabilidad (Wolters, 2000). Los indicadores más empleados son la tasa de respiración del suelo, la presencia de metabolitos de hongos, las tasas de descomposición de los residuos vegetales, y el N y el C de la biomasa microbiana. Como la biomasa microbiana es mucho más sensible al cambio que el C total, se ha propuesto la relación C microbiano: C orgánico del suelo para detectar cambios tempranos en la dinámica de la materia orgánica (Sparling, 1997).





*Capítulo 2*

*Caracterización*

*biofísica de la zona de*

*estudio*

## 2.1 Delimitación del municipio

El municipio de Jilotepec de Molina Enríquez se sitúa al Noroeste del Estado de México, entre las coordenadas 99° 26' 37", 99° 44' 02" E y 19° 52' 02", 20° 12' 43" N (Figura 6); promedia altitud de 2,440 m y cuenta con una superficie de 588.53 km<sup>2</sup>.



**Figura: 6** Delimitación del municipio de Jilotepec dentro del estado de México. (Imagen de dominio público)

### ***Clima***

Dentro del territorio municipal predominan dos variantes climáticas: los templados subhúmedos, **C (W1)** y **C (W2)**, con poca variación térmica; la temperatura máxima se presenta antes del solsticio de verano y alcanza los 23 °C, aunque datos recientes indican un incremento gradual de la temperatura, en los meses de junio, julio y agosto, rondando los 30 °C. Al territorio municipal lo cruzan dos isotermas que delimitan zonas con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 14 y 16 °C, al norte y este, y entre 12 y 14 °C al oeste y sur. Otros períodos climáticos de relevancia son la sequía intraestival o canícula, que se presenta en el mes de agosto, así como las heladas después del equinoccio de otoño y cuyos efectos se resienten en gran parte del municipio; su frecuencia es mayor durante los meses de diciembre, enero y febrero, no obstante, al sur del territorio las heladas pueden presentarse desde principios de septiembre hasta marzo. (Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2015). La precipitación promedio anual para el

municipio es de 750 mm y se distribuye principalmente de junio a noviembre (SMN, 2010)

### ***Geomorfología***

El relieve del municipio forma parte del sistema montañoso de la Sierra Nevada, en el Eje Neovolcánico, quedando incluido en dos subprovincias fisiográficas: la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo cuya tofoforma dominante son los lomeríos de colinas redondeadas y una zona con relieve abrupto en la porción sur. La segunda subprovincia, ubicada en la parte sur del municipio es la de los Lagos y Volcanes del Anáhuac, con un sistema de tofoforma dominante de sierra.

El municipio se caracteriza por el predominio de rocas volcánicas recientes (hasta de diez millones de años de antigüedad) que cubren 85% de la superficie, y terciarias (de más de veinte millones de años) en el 15% restante. Las formaciones recientes son calcialcalinas y las terciarias van de ácidas a intermedias; ambas presentan depósitos piroclásticos fragmentos rocosos arrojados durante las erupciones volcánicas explosivas (Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2015).

### ***Hidrología***

De acuerdo al simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) (INEGI, 2016); El municipio de Jilotepec, forma parte de la región Hidrológica del Alto Panuco dentro de la cuenca del Río Moctezuma de la que se derivan las corrientes del Arroyo Zarco, Tecozautla, Alfajayucan, Tula, Rosas, Tlautla y El Salto, integrando en su conjunto un sistema de siete subcuencas (Figura 6). Cabe señalar que Jilotepec es uno de los municipios con mayor número de cuerpos de agua dentro del Estado de México (1340), que ocupan 1216.50 ha. Para la caracterización del transecto de muestreo se tomó como referencia la subcuenca del río Tlautla con clave RH26DI con una área de 507.62 km<sup>2</sup> de acuerdo a INEGI (2010). Por otra parte, existen volúmenes apreciables de aguas subterráneas que se recargan con filtraciones provenientes de los arroyos y ríos, así como con aguas pluviales. La calidad del agua es en general aceptable, sin embargo se han

contaminado algunos cauces con desechos de aguas servidas no tratadas, en especial en la Cabecera Municipal (Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2015).

## Mapa Hidrológico

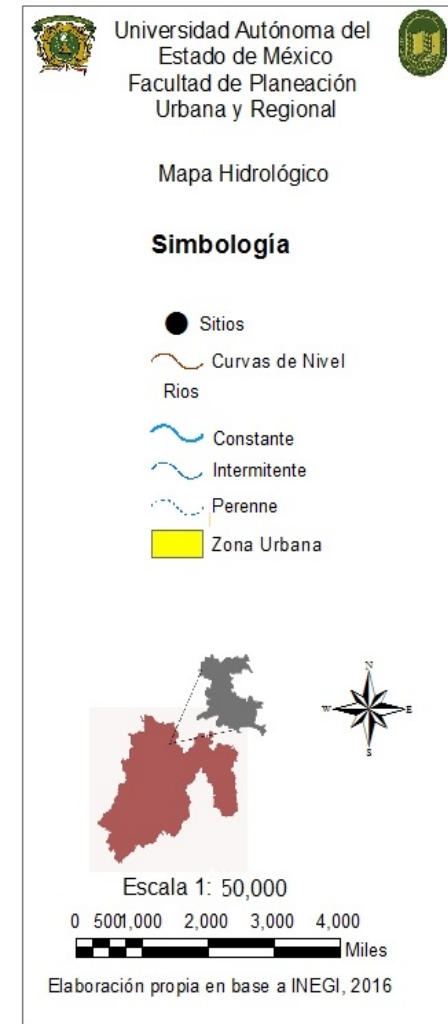
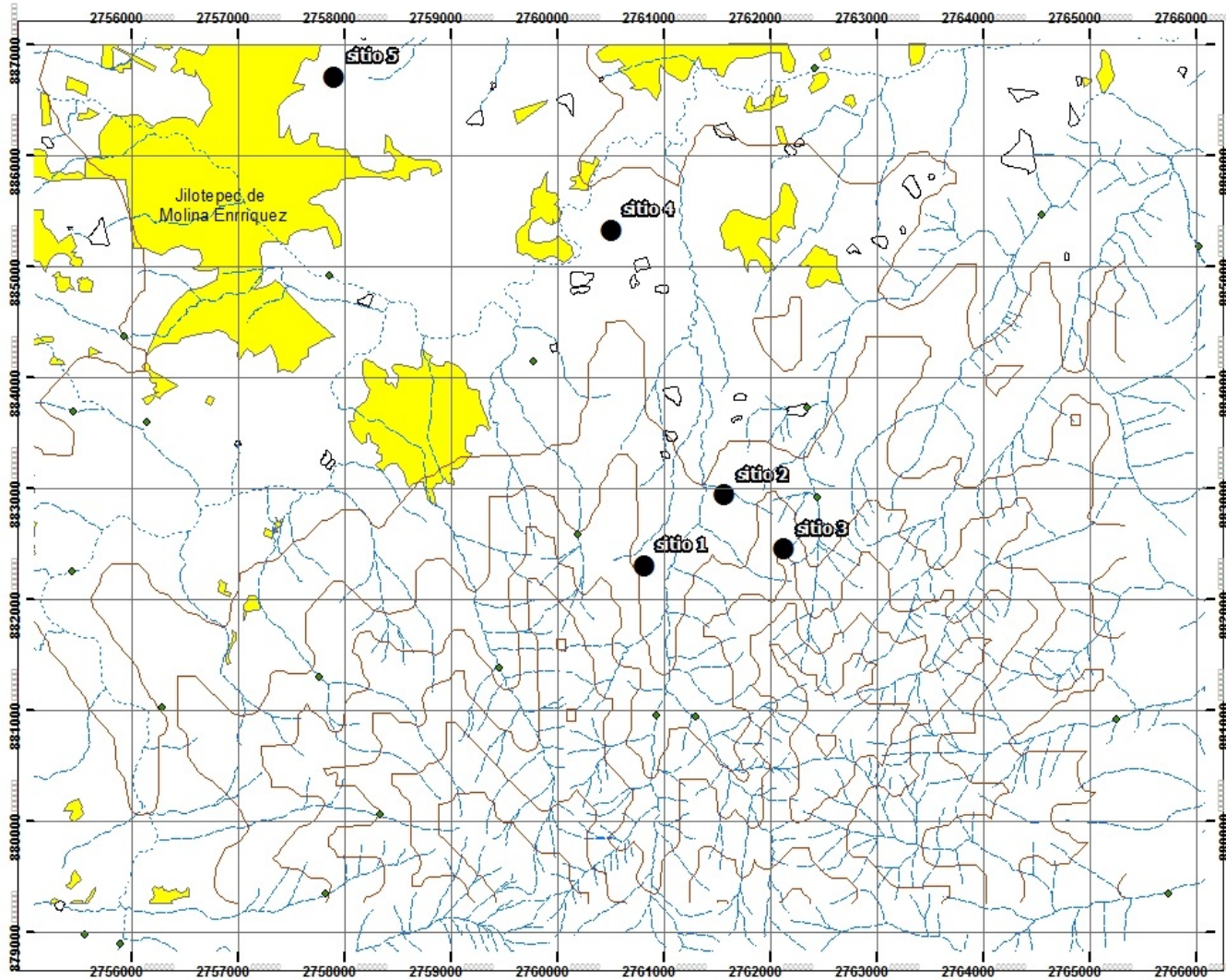


Figura: 7 Mapa hidrológico de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016)



## ***Geología***

El municipio de Jilotepec, se encuentra formado por dos unidades litológicas que pertenecen a las rocas ígneas y sedimentarias (INEGI, 2010). Las rocas ígneas están constituidas principalmente por basaltos, andesitas y brechas volcánicas. Los basaltos se encuentran distribuidos principalmente en la parte norte, este y oeste del municipio. Las andesitas se ubican al sur y en menor proporción se localizan las brechas volcánicas las cuales se encuentran en los cerros Las Peñas, el Gavilán, El Xidenxhi y la parte oeste de San Lorenzo Octeyuco. Este tipo de unidad litológica tiene alta permeabilidad y capacidad de infiltración. Las rocas sedimentarias compuestas por areniscas se localizan al noreste y sureste de la cabecera municipal, en la zona comprendida por las presas Santa Elena, Danxho y al poniente de la presa Xhimojay.

El producto de la degradación de las rocas ha dado como origen a los suelos aluviales en la parte baja, que se caracterizan por presentar materiales sueltos como gravas, arenas y limos, transportados principalmente por las corrientes superficiales. Este suelo se presenta en el sur de la cabecera siguiendo el curso del arroyo Coscomate, que desemboca en la presa Santa Elena. Las estructuras tectónicas están representadas principalmente por un fuerte fracturamiento, localizado al sur de la cabecera municipal entre los cerros El Grande, El Nopal, El Garabato, Las Peñas y El Gavilán. (INEGI, 2010; Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2015).

## **Edafología**

Desde el punto de vista edafológico (Figura 7) el área de estudio está conformado por Luvisoles, Vertisoles y en menor proporción por Phaeozems (INEGI, 2010). A continuación se explican de manera general las características de cada grupo y posteriormente se detallarán las condiciones para los subgrupos presentes en la zona de estudio.

Genéricamente, el grupo de los Phaeozems se caracteriza por presentar una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutriente, se desarrollan en terrenos planos y montañosos, se utilizan con éxito en la agricultura de riego y temporal, su susceptibilidad a la erosión depende del terreno donde se encuentran y de la cobertura vegetal que presentan (*Madrid, 2011*).

Dentro del grupo de los Luvisoles quedan incluidos aquellos suelos en los cuales la característica dominante es una marcada diferenciación textural dentro del perfil del suelo, con el horizonte superficial agotado de arcilla y con una acumulación de ésta en un horizonte subsuperficial “árgico”.

En los Vertisoles, el material original lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas expandibles, productos de alteración de rocas que las generen. Se encuentran en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas. El clima suele ser tropical, semiárido a subhúmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad. La vegetación climática suele ser de sabana, o de praderas naturales o con vegetación leñosa. El perfil es de tipo ABC. La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas, genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales. Los Vertisoles se vuelven muy duros en la estación seca y muy plásticos en la húmeda. El labrado es muy difícil excepto en los cortos periodos de transición entre ambas estaciones. Con un buen manejo, son suelos muy productivos.



# Mapa Edafológico

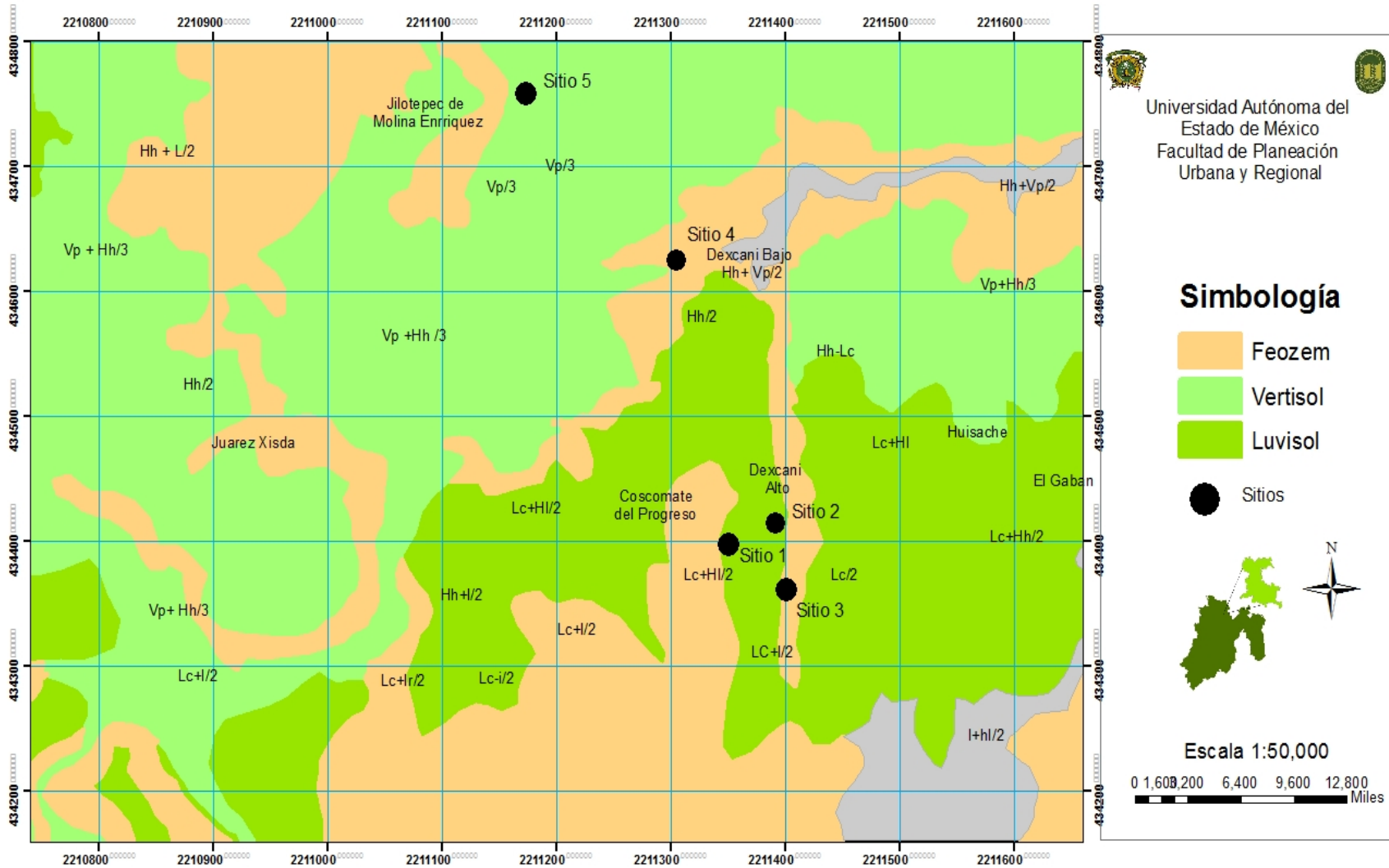


Figura: 8 Mapa edafológico de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016)

## **Descripción de las asociaciones edáficas registradas dentro de la zona de estudio**

Dentro de cada asociación se presenta en la carta edafológica en primer lugar el grupo de suelos dominante por cobertura, seguido del grupo secundario. A continuación se describen brevemente las características principales de los diferentes grupos de suelo registrados de acuerdo a WRB (2006).

*Luvisol crómico.* Suelo con horizonte árgico que en su mayor proporción posee un hue munsell de 7.5 YR y un croma húmedo de más de 4.0 o un hue más rojo que 7.5 YR, indicativo de la formación avanzada de minerales secundarios como arcillas y óxidos de hierro.

*Phaeozem lúvico.* Suelo que presenta un horizonte superficial con contenidos medios-altos de materia orgánica, así como un horizonte subsuperficial árgico con una capacidad de intercambio catiónico igual o mayor a 24c mol kg<sup>-1</sup> de arcilla en todo su espesor y una saturación con bases ( NH<sub>4</sub>OAc 1M) de 50% o más en todo el espesor del horizonte hasta una profundidad de 100cm.

*Phaeozem háplico.* Expresión típica de rasgos comunes a este grupo como un horizonte superficial con contenidos medios-altos de materia

*Vertisol pélico.* Suelos con contenido de arcillas expandibles superior al 35 % dentro de los primeros 100 cm de profundidad, con valor Munsell, húmedo de 3.5 o menos y un croma de 1.5 o menos en los primeros 30 cm de profundidad

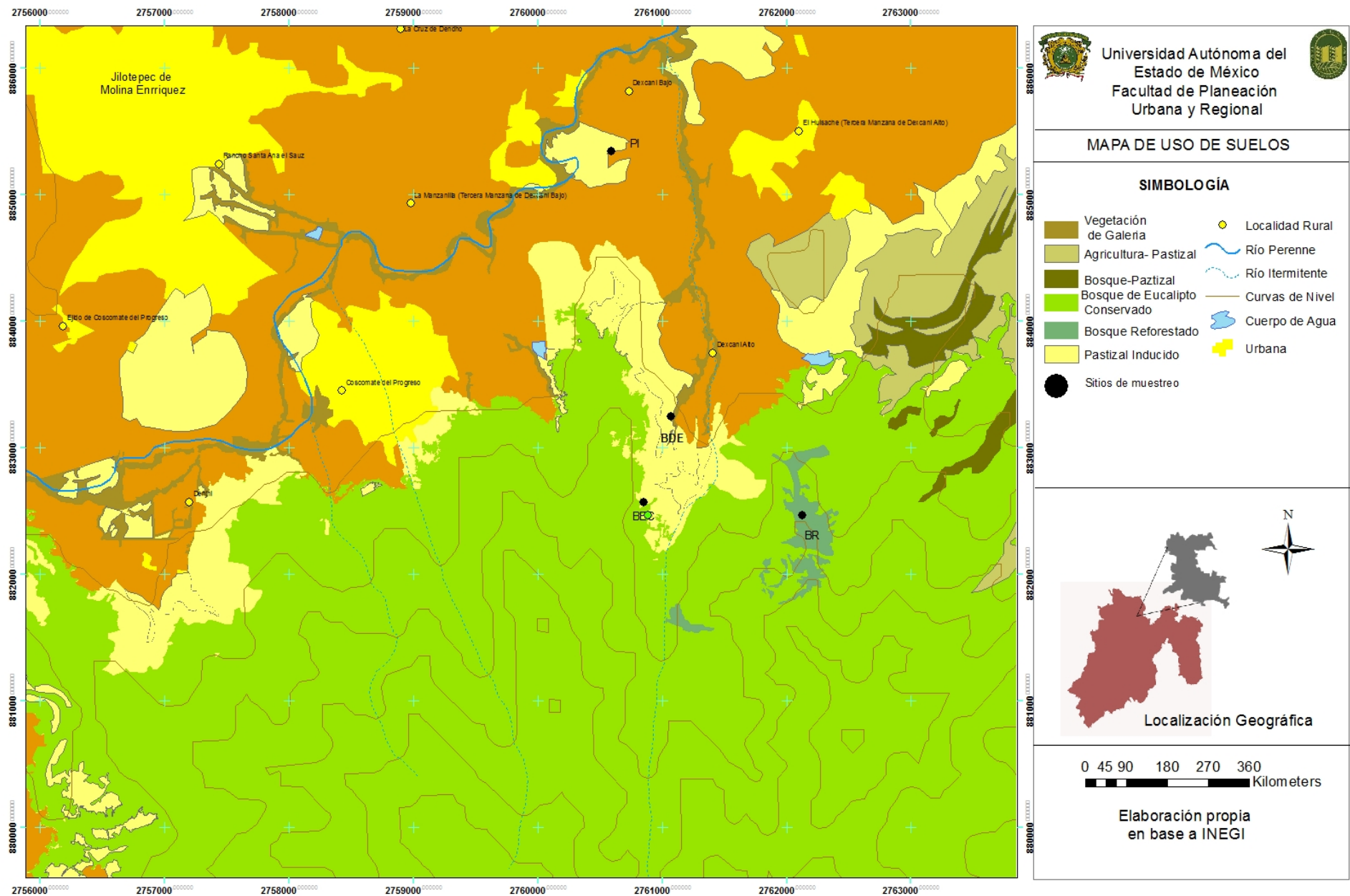
## ***Uso de suelo y vegetación***

En la zona de estudio se encuentran tres tipos de uso de suelo: forestal, agrícola, pecuario y habitacional (INEGI, 2010). El uso agrícola y pecuario se distribuye de manera aleatoria en la mayor parte del municipio, principalmente en el norte y centro

El uso forestal se presenta entre los 2550 y 2700 m.s.n.m., en la parte sureste de la cabecera municipal, son comunidades de encinares, localizadas en los cerros, Grande y el Gavilán principalmente, donde se encuentra las Peñas de Dexcani Alto, paraje que es aprovechado como zona de recreación debido a la belleza escénica de sus afloramientos rocosos.

Por debajo de los 2550 y hasta los 2400 m.s.n.m. los usos agrícola y pecuario inician su distribución con la parte limítrofe de bosques de encino con mayor grado de perturbación, por lo que originalmente debieron tener este uso de suelo. La agricultura que se practica es de autoconsumo con tracción animal en suelos de mayor pendiente y maquinaria para suelo menos inclinados. El cultivo principal es el maíz (*Zea mays*), seguido de la avena (*Avena sativa*), agave pulquero asociado con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Las parcelas agrícolas se intercalan dentro del paisaje con manchones de pastizal inducido y vegetación herbáceo-arbustiva, que son destinados para el pastoreo y confinamiento de ganado vacuno, y ovino de traspatio. Dentro de este segmento de uso de suelo también quedan delimitadas pequeñas granjas porcinas y establos lecheros familiares (Plan municipal de Desarrollo 2012-2015).

Los asentamientos humanos están representados por la cabecera municipal, situada en la parte central, así como por comunidades como las de Acazuchitlán, La Comunidad, Aldama, Canalejas, Agua Escondida, Las Huertas, Xhixhata, San Pablo Huántepec



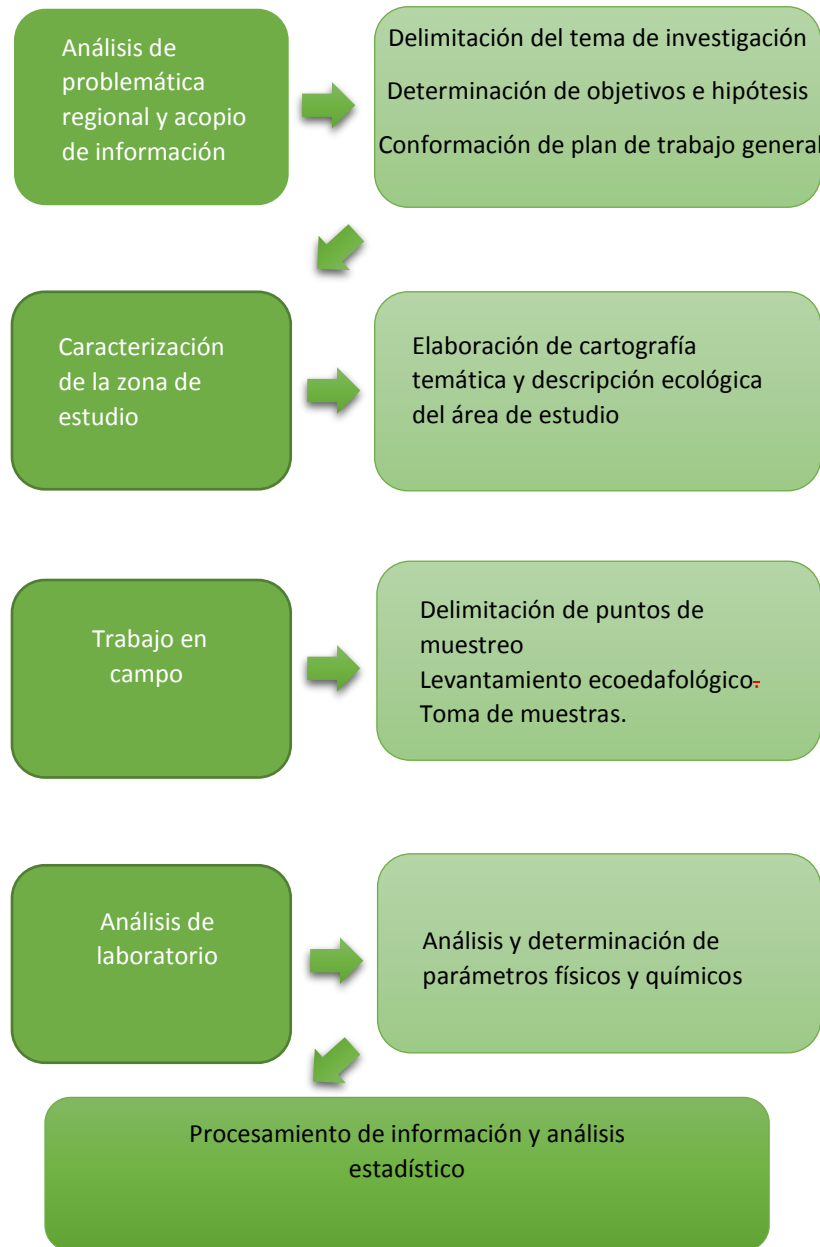
**Figura: 9** Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona de estudio. (Elaboración propia en base a INEGI, 2016)

# *Capítulo 3*

## *Materiales y métodos*

### 3.1 Metodología general del estudio

La metodología seguida para este estudio se derivó de distintas fuentes como Siebe *et al.*, (2006), FAO (2015) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1999). A continuación se esquematiza el proceso general, que posteriormente se describe a detalle.

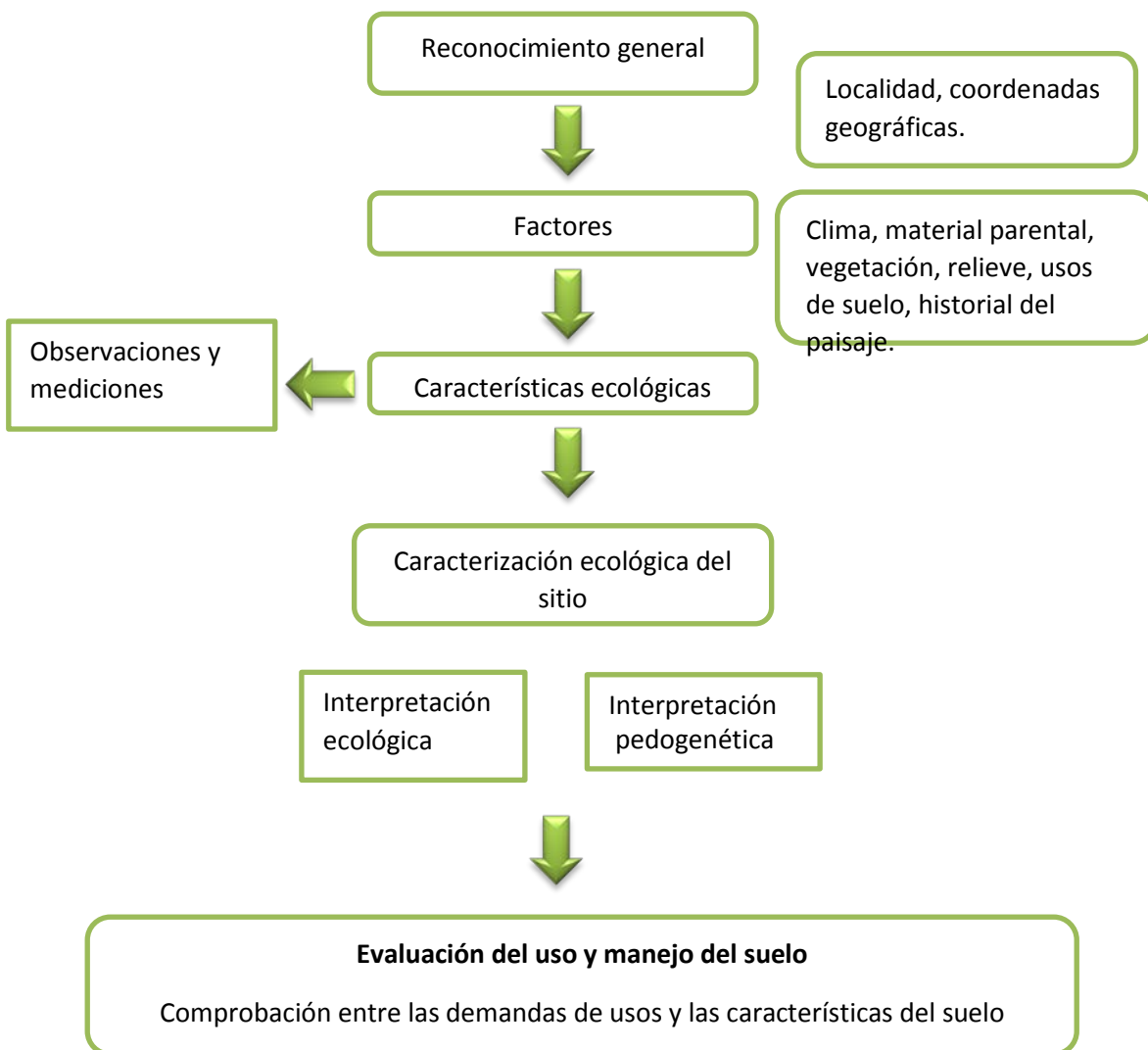


**Figura: 10** Esquema general del proceso de la investigación

### **Análisis de la problemática regional y acopio de información.**

En esta primera etapa se procedió a definición del tema de investigación vinculado con la problemática regional sobre las implicaciones de los cambios históricos en el uso de suelo. Se realizó el acopio de información temática a partir de fuentes gubernamentales y publicaciones científicas para definir la propuesta general de la investigación.

### **3.2 Metodología general de campo**

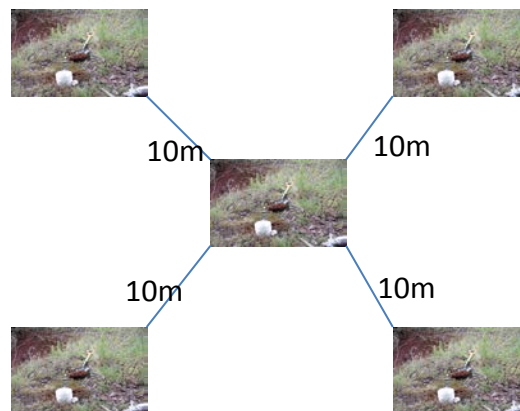


**Figura: 11** Esquema general de muestreo, tomado de Álvarez *et al.* (2013)

**Caracterización de la zona de estudio.** A partir de la información municipal recabada se procedió a realizar un análisis detallado del medio biofísico para delimitar una zona de estudio en la que fuera posible encontrar el mayor número posible de unidades paisajísticas representativas dentro del ámbito municipal, a partir de las cuales se establecerían los sitios específicos para el estudio de campo y la toma de muestras de suelo.

**Trabajo de campo.** Una vez delimitados los sitios de muestreo, se procedió a realizar el recorrido de campo en el que de acuerdo a la metodología propuesta por Siebe *et al.* (2006), (Figura 10) para ello se efectuó un levantamiento de las características ambientales imperantes en cada sitio y posteriormente se realizó la toma de muestras del suelo superficial (30 cm de profundidad), de acuerdo al esquema derivado del utilizado por el Inventario Nacional Forestal, modificado por que a continuación se describe:

Para cada sitio de muestreo se seleccionó un área aproximada de 400 m<sup>2</sup>, ubicando un punto central de cual se despliegan cuatro puntos más en forma diagonal a una distancia de 10 metros de separación entre cada uno con respecto al punto central (Figura: 11). En cada punto se recogió un kilogramo de suelo para análisis físicos y químicos, y por separado se tomaron tres submuestras para la determinación de humedad, densidad aparente, densidad relativa y porosidad mediante cilindros de pvc de 5cm de diámetro.



**Figura: 12** Esquema de muestreo en campo tomado de (USDA, 1999)



### 3.3 Análisis físicos y químicos

Las muestras de suelo se llevaron a laboratorio para su posterior preparación que consistió en su secado a temperatura ambiente, triturado y tamizado en malla de 2 mm de amplitud. Posteriormente las muestras fueron envasadas y registradas con número de folio individual para su manejo.

Dentro de los análisis físicos y químicos efectuados, se seleccionaron un total de 16 propiedades como posibles indicadores de la calidad del suelo, que se detallan en los cuadros 1 y 2

**Cuadro 1** Indicadores físicos de calidad del suelo seleccionados

| <b>Indicador Físico</b>       | <b>Método</b>                                      |
|-------------------------------|--|
| <b>Color</b>                  | Munsell  |
| <b>Densidad Aparente (DA)</b> | (Blake y hartge 1986)                              |
| <b>Densidad Real (DR)</b>     | Método del picnómetro (Aguilera y Domínguez, 1980) |
| <b>Porosidad</b>              | ( USDA,1999)                                       |
| <b>Humedad</b>                | Método gravimétrico (Ortiz,1980)                   |
| <b>Textura</b>                | (Boyucos, 1962)                                    |

**Cuadro 2** Indicadores químicos de calidad del suelo seleccionados

| <b>Indicadores químicos</b>                     |   |
|---|---|
| <b>Conductividad Eléctrica (CE)</b>             | Conductímetro   |
| <b>pH en H<sub>2</sub>O</b>                     | Método del Potenciómetro                                      |
| <b>Materia Orgánica (MO)</b>                    | (Walkley Y Black, 1947)                                       |
| <b>Nitrógeno total (Nt)</b>                     | Micro Kjendahl  |
| <b>Fósforo disponible (P)</b>                   | (Bray y Kurtz, 1945)  |
| <b>Potasio disponible (K)</b>                   | Método de acetato de amonio determinado por absorción atómica |
| <b>Calcio (Ca)</b>                              | Método del versenato de (Cheng y Bray,1945)                   |
| <b>Magnesio (Mg)</b>                            |   |
| <b>Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)</b> | (Schollenberger y Simón , 1945)                               |
| <b>Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)</b>         |   |

### **3.4 Análisis estadístico**

Una vez que se obtuvieron los resultados de los análisis físicos y químicos, se procedió a conformar la base de datos de todas las variables estudiadas para proceder a su análisis mediante métodos estadísticos, para ello se emplearon los paquetes estadísticos SPSS y XLSTAT.

En una primera etapa se procedió a realizar un análisis descriptivo para determinar los valor máximos, mínimos, media y desviación estándar de cada variable y con ello se evidenciaron posibles sesgos, datos anómalos u otras inconsistencias.

Posteriormente se aplicó la prueba estadística de Análisis de Varianza de una vía, así como la prueba Tukey por pares para determinar la diferencia mínima significativa ( $P < 0,05$ ) de cada variable, entre las unidades paisajísticas y usos de suelo.

# *Capítulo 4*

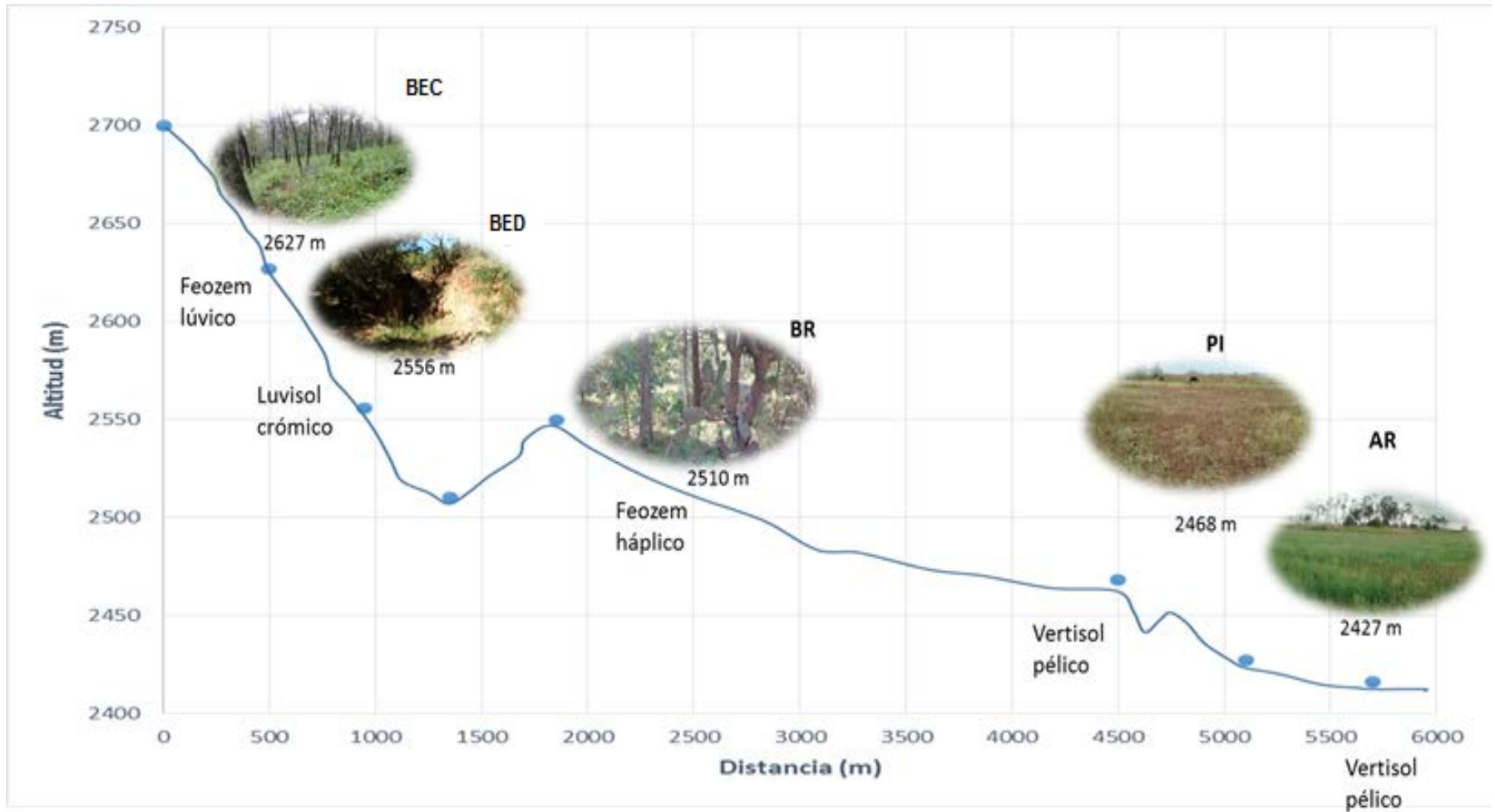
## *Resultados*

#### 4.1 Ubicación y delimitación del transecto de estudio.

De acuerdo al análisis exploratorio y su verificación en campo, se estableció que la zona de estudio quedara conformada por un transecto en el que quedaban incluidas las diferentes unidades de paisaje, usos de suelo y unidades más representativas de suelos a nivel regional (Cuadro 3 y Figura ). Estas cinco unidades paisajísticas fueron las siguientes:

**Cuadro 3** Unidades de paisaje representativas de la zona de estudio

| Unidad                      | Clave | Altitud (m) |
|-----------------------------|-------|-------------|
| Bosque de Encino Conservado | BEC   | 2627        |
| Bosque de Encino Degradado  | BED   | 2556        |
| Bosque Reforestado          | BR    | 2510        |
| Pastizal Inducido           | PI    | 2468        |
| Agricultura de Riego        | AR    | 2427        |



**Figura: 13** Distribución de las unidades de paisaje dentro del transecto altitudinal

BEC: Bosque de Encino Conservado; BED: Bosque de Encino Secundario; BR: Bosque Reforestado; PI: Pastizal Inducido; AR: Agricultura de riego

## Caracterización de las unidades de paisaje (UP)

### Sitio1: UP Bosque de Encino Conservado (BEC)

2627 msnm

19°55'18" N, 99°29'32" O

Grupo de suelos: *Phaeozem lúvico*

Representativa del ecosistema de bosques de encino (*Quercus spp.*), asociado con Pino (*Pinus sp.*), Ocote rojo (*Pinus patula*) encino (*Quercus crassifolia*), cedro (*cedrus*) y sabino (*Taxodium mucronatum*)

La comunidad vegetal se encuentra dentro de un área de conservación comunal en la que se llevan a cabo prácticas de conservación de suelos y vegetación, participa dentro del programa de pago por servicios ambientales hidrológicos y brinda servicios ecoturísticos. Dentro de este rango se observa un gradiente de



perturbación a medida que desciende la cota altitudinal, no existe aprovechamiento maderable, los terrenos están bajo el régimen de propiedad comunal y actualmente cuentan con el pago por servicios ambientales hidrológicos.

*Descripción del relieve.* Presenta una exposición noroeste, con una pendiente moderada (4 – 9 %), la morfología general es de sistema de sierras, con una geoforma local de ladera media cóncava.

*Rasgos físicos de importancia.* No existen evidencias de erosión hídrica, la pedregosidad superficial es del 2 al 5 % compuesta por fragmentos rocosos mediano, el suelo presenta una reacción ligeramente ácida en campo y el drenaje superficial es de bueno a moderado.

**Sitio 2: UP Bosque de Encino Degradado (BED)**

2556 msnm

Coordenadas.: 19°55'38" LN; 99°29'33"

LO

*Grupo de suelo: Luvisol crómico*

*Uso de suelo y Vegetación:* bosque de encino (*Quercus* spp.) dominante en asociación con Pino (*Pinus*), Ocote rojo (*Pinus patula*) encino (*Quercus crassifolia*), Sabino (*Taxodium mucronatum*) y diversas especies ruderales de herbáceas y arbustivas. Reforestación con *Cupressus* sp. Esta comunidad vegetal se encuentra fuertemente impactada por actividades de pastoreo y remoción parcial de la cubierta forestal,



*Descripción del relieve.* Presenta una exposición noreste, con una pendiente moderada (4 – 9 %), la morfología general es de sistema de sierras, con una geoforma local de ladera media compuesta.

*Rasgos físicos de importancia.* Se observan severas afectaciones de erosión hídrica, laminar, en surcos y cárcavas, la pérdida de la cobertura vegetal es superior al 50 % y en una extensión del 70 % del horizonte superficial del suelo se encuentra decapitado parcial o totalmente, dejando expuesta una capa arcillosa con un drenaje moderado a lento lo que intensifica los procesos erosivos. Se observan intentos de contención de la erosión mediante trampas de sedimentos, cercos vivos, reforestación, los procesos degradativos son muy intensos.

### **Sitio 3: UP Bosque Reforestado (BR)**

2510 msnm

Coordenadas 19°55'22" LN; 99°29'14" LO

*Grupo de suelo: Phaeozem háplico.*

*Uso de Suelo y Vegetación:* Bosque reforestado con Eucalipto (*Eucalyptus spp.*) Pino (*pinus*) y Cedro (*Cupressus sp.*).

Originalmente la cobertura vegetal de encinos, de los cuales quedan pocos, Se observa la presencia de especies



ruderales de pastos, herbáceas y arbustivas distribuidas en manchones donde las condiciones del suelo son menos extremas.

*Descripción del relieve.* Presenta una exposición noroeste, con una pendiente moderada (4-9 %). La morfología general corresponde a un cerro y la geoforma local es de ladera baja. La pedregosidad superficial supera el 75 % de la cobertura y se compone de fragmentos medianos de roca y gravas.

*Rasgos físicos de importancia.* Anteriormente el sitio quedo expuesto a degradación intensa por deforestación y pérdida de suelo lo que se evidencia por el piso gravoso, si, bien la cobertura arbórea actual es densa, el uso de especies exóticas como el Eucalipto contribuye poco a la formación de suelo, el cual por efecto del pastoreo de ganado se encuentra fuertemente compactado, con lo que el drenaje superficial es lento.



**Sitio 4. UP. Pastizal Inducido (PI)**

2427 msnm

Coordenadas: 19°56'57" LN, 99°30'05"  
LO

Grupo de suelo: *Vertisol pélico*

*Uso de Suelo y Vegetación.* Pastizal inducido con presencia de gramíneas forrajeras y herbáceas, anteriormente sujeto a agricultura. Actualmente se destina al pastoreo de ganado bovino, equino y ovino, lo cual ha compactado fuertemente la capa superficial del suelo.



*Descripción del relieve.* La Morfología general corresponde a un valle y la geoforma local es de fondo de valle, con una pendiente escasa menor al 2 %, La pedregosidad superficial es del 10 % y se compone de fragmentos de roca ígnea extrusiva (basalto).

*Rasgos físicos de importancia.* No existen evidencias de erosión pero si de fuerte compactación provocada por el pastoreo del ganado, lo cual se intensifica por la textura arcillosa del horizonte superficial. El drenaje superficial es lento, lo que provoca que en la época lluviosa el suelo quede inundado durante varios días. La reacción del suelo en campo es ácida.

**Sitio 5: UP. Agricultura de Riego (AR) 2436 msnm**

Coordenadas: 19° 57'26.34" LN;

99°30'55.09" LO

*Grupo de suelo: Vertisol pélico*

*Uso de Suelo y Vegetación.* Suelos sujetos a manejo agrícola de anuales como maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum*) y avena (*Avena sativa*). Los terrenos pertenecen

A la granja porcícola de la Facultad de medicina veterinaria y zootécnia de la UNAM

y reciben un paquete integral de manejo compuesto por fertilizantes químicos y enmienda orgánicas, así como por abonos verdes. Existe rotación de cultivos y no hay pastoreo de ganado. Se emplea maquinaria agrícola durante todo el ciclo vegetativo hasta la cosecha.

*Descripción del relieve.* La Morfología general corresponde a un valle y la geoforma local es de fondo de valle, con una pendiente escasa, menor al 2 %, La pedregosidad superficial es del 5 % y se compone de fragmentos finos de roca ígnea extrusiva (basalto).

*Rasgos físicos de importancia.* No existen evidencias de erosión, al igual que en el sitio 4, la textura del suelo superficial es arcillosa, pero por efecto del manejo no se encuentra compactada, la adición de materia orgánica permite que la densidad del suelo no sea tan elevada como en el caso anterior con lo que se favorece el flujo de aire y humedad en el suelo. El pH en campo es neutro.

Este sitio de estudio es significativo ya que se emplean técnicas de cultivo amigables al medio ambiente lo cual podría ser viable para aplicar a nivel regional, siendo este tipo de cultivo una opción viable para la preservación de los servicios ecosistémicos que brinda el suelo



## 4.2 Indicadores físicos de Calidad del suelo

Las siguientes condiciones físicas del suelo se observaron, denotando las diferencias significativas entre los diferentes puntos de muestreo así como la media de los datos obtenidos para cada sitio de muestreo (Cuadro 4)

**Cuadro 4.** Resultados de análisis físicos

**Cuadro 4** Resultados de análisis físicos

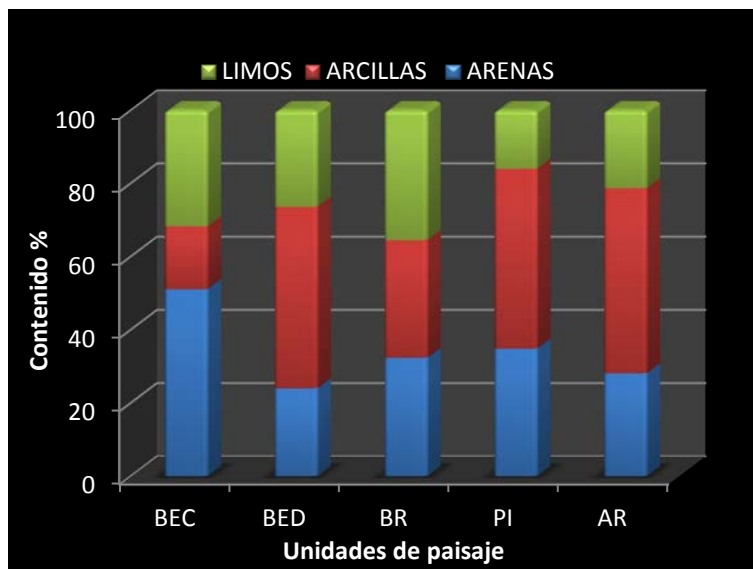
| Unidad de paisaje | DA<br>g/cm <sup>3</sup> | DR<br>g/cm <sup>3</sup> | Porosidad<br>% | Arenas<br>% | Arcillas<br>% | Limos<br>% | Clase textural        |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------|---------------|------------|-----------------------|
| <b>BEC</b>        | .63a                    | 1.49a                   | 55.45 a        | 51.04 b     | 17.20 a       | 31.76 c    | Franco Limoso         |
| <b>BED</b>        | .92 b                   | 1.74ab                  | 51.48 a        | 24.0 a      | 49.60 c       | 26.40 bc   | Franco Arcilloso      |
| <b>BR</b>         | .94 b                   | 1.90 bc                 | 37.14 ab       | 32.0 a      | 32.20 b       | 35.50 c    | Franco arcillo Limoso |
| <b>PI</b>         | 1.43 c                  | 2.14 c                  | 34.65 b        | 34.0 a      | 49.20 c       | 16.0 a     | Arcilloso             |
| <b>AR</b>         | .96 b                   | 1.95 bc                 | 50.22 a        | 28.0 a      | 50.62 c       | 21.30ab    | Arcilloso             |

La evaluación de segmentos con diferente letra representa la diferencia significativa entre unidades de paisaje de  $P < 0.05$ . BEC: Bosque de Encino Conservado; BED: Bosque de Encino Degradado; BR: Bosque Reforestado; PI: Pastizal Inducido; AR: Agricultura de Riego. DA: Densidad Aparente; DR: Densidad Real. Las letras a, b, c denotan una diferencia significativas entre ellas asignando niveles, mientras que la inclusión de dos letras por ejemplo ab denotan una similitud entre los dos niveles encontrándose la variable en el punto medio.

A continuación se describe el comportamiento de las variables físicas del suelo entre las unidades de paisaje.

### **Clase Textural**

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa. (FAO, 2015).



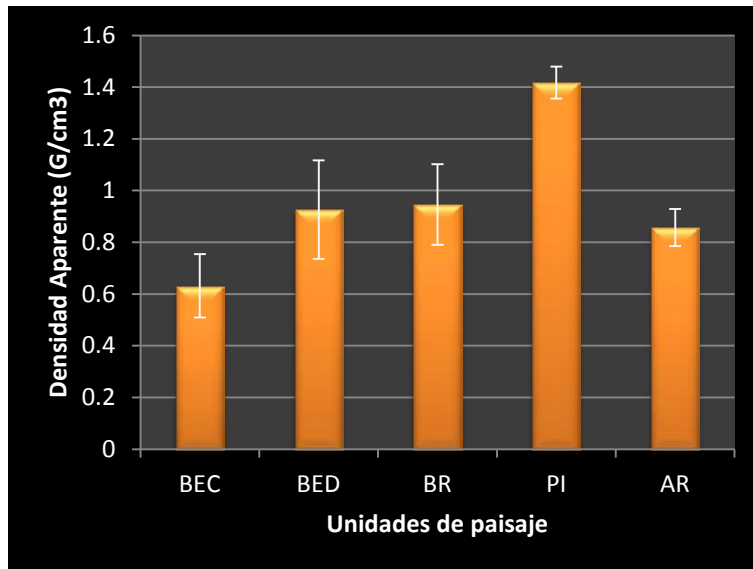
**Figura: 14** Composición granulométrica de los primeros 30 cm del suelo para las diferentes Unidades de Paisaje

El porcentaje de arcillas muestra diferencias significativas entre los sitios de muestreo donde se puede apreciar que el mayor contenido se encuentra en BED, (50 %), y la menor proporción en el sitio BEC (17.20%) (Figura 14). Bajo esta consideración esta fracción del suelo sería dominante para los sitios BED, PI y AR. El porcentaje de limos en la textura del suelo muestra al igual que en las arcillas una diferencia significativa que varía de acuerdo al sitio de muestreo en este caso los limos se hacen presente en mayor porcentaje en el sitio BEC (31.76%). El sitio PI presenta la menor cantidad de limos con un 16%. Dentro de la zona de estudios las arenas se encuentran en menor proporción en relación a las arcillas y limos

con la excepción en el sitio BEC donde se encuentra en mayor cantidad con un 51.04%. Los siguientes sitios muestran porcentajes diferentes, en el sitio BED se registró el menor contenido con solo el 24%. Esta diferencia es debida en gran medida por el tipo de suelo de cada sitio, así como el material parental y la formación morfoedáfica de los sitios de estudio.

### ***Densidad aparente y porosidad***

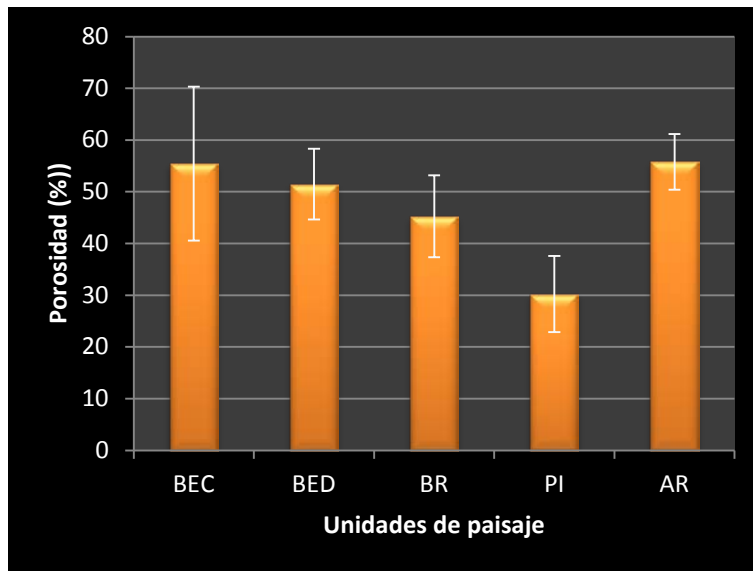
La densidad aparente (DA) se define como la masa de suelo por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ), describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso (*Keller & Håkansson, 2010*). La DA de los sitios de muestro no refleja diferencias significativas entre los sitios BED, BR y AR, pero si difiere entre el sitio BEC ( $0.63 \text{ g/cm}^3$ ) y el sitio PI ( $1.43 \text{ g/cm}^3$ ), lo cual es consistente con el gradiente de perturbación de suelos en la zona (Figura 15). El caso extremo de PI, se relaciona con un espacio poroso reducido, alto contenido de arcillas y las prácticas de manejo pecuario que inducen su compactación. Para los sitios BEP, BR y AR la mayor variabilidad de este parámetro pudiera estar relacionada con una mayor heterogeneidad de las condiciones del suelo relacionadas con su manejo, así como por la ausencia de prácticas ganaderas, y la implementación de técnicas para la conservación del suelo, por ejemplo la rotación de cultivos y la reforestación de bosques.



**Figura: 15** Valores de Densidad Aparente para los sitios de estudio.

En el caso de la porosidad, es importante puntualizar que nuevamente el sitio PI tiene una porosidad significativamente menor (34 %) con respecto a los demás

sitios excepto BR. Por otra parte PI tiene la menor porosidad condición relacionada con su DA elevada (Figura 16).



**Figura: 16** Porosidad en los primeros 30 cm de profundidad para los suelos de las diferentes Unidades de paisaje

### 4.3 Indicadores químicos de la calidad del suelo

**Cuadro 5.** Resultado de los indicadores químicos de la calidad del suelo

| <b>Unidad de Paisaje</b> | pH     | MO<br>% | C.E.<br>dS/m | Nt<br>% | P<br>ppm | K <sup>+</sup><br>ppm | Ca <sup>2+</sup><br>ppm | Mg <sup>2+</sup><br>ppm | CIC<br>meq/100 g | C/N     |
|--------------------------|--------|---------|--------------|---------|----------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---------|
| <b>BEC</b>               | 6.13 b | 6.24 d  | .37 a        | .37 a   | 52.80 a  | 440 c                 | 720 a                   | 488 b                   | 34.91b           | 10.82 a |
| <b>BED</b>               | 5.27 a | 3.83 bc | .22 a        | .21 a   | 49.0 a   | 232 b                 | 504 a                   | 496 b                   | 23.84 ab         | 9.84 a  |
| <b>BR</b>                | 5.39 a | 4.61 cd | .24 a        | .15 a   | 49.0 a   | 210 b                 | 340 a                   | 300a                    | 17.17 a          | 8.115 a |
| <b>PI</b>                | 5.34 a | 1.80 a  | .23 a        | .14 a   | 112.40 b | 32 a                  | 1432 b                  | 760 c                   | 17.27a           | 7.81 a  |
| <b>AR</b>                | 6.95c  | 2.29 ab | .41 a        | .19 a   | 125 b    | 180 ab                | 1872 b                  | 792 c                   | 15.08a           | 8.84 a  |

La evaluación de segmentos con diferente letra representa la diferencia significativa entre unidades de paisaje de P< 0.05

BEC: Bosque de Encino Conservado; BED: Bosque de Encino Degradado; BR: Bosque Reforestado; PI: Pastizal Inducido; AR: Agricultura de Riego. DA: Densidad Aparente; DR: Densidad Real. Las letras a, b, c denotan una diferencia significativas entre ellas asignando niveles, mientras que la inclusión de dos letras por ejemplo ab denotan una similitud entre los dos niveles encontrándose la variable en el punto medio.



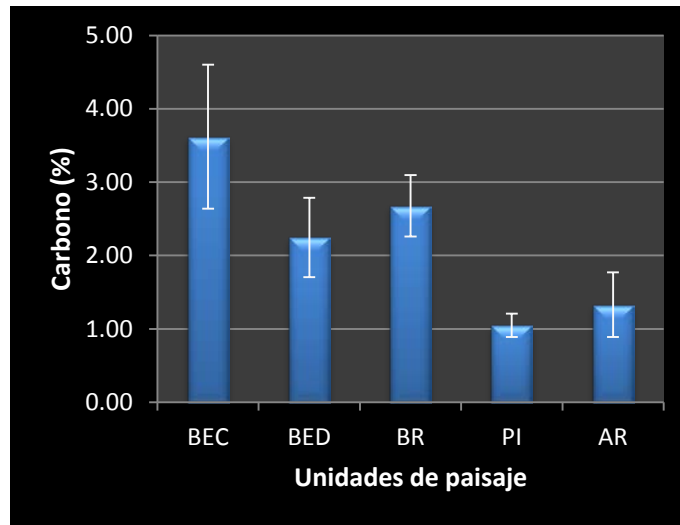
### **pH y conductividad eléctrica**

Los suelos en la zona de estudio presentan una tendencia acida que va en un rango de ácido a muy ácido denotando una variación significativa entre los puntos de muestreo donde los sitios BEC, BED y BR tienen un pH más ácido explicado por la vegetación del sitio así como la presencia de niveles altos de materia orgánica en el suelo mientras que en el sitio AR el pH tiende a acercarse al estado neutro esto lo cual puede explicarse por la dicción de fertilizantes y agroquímicos en el suelo de cultivo.

En cuanto a los valores de conductividad eléctrica los datos obtenidos inferiores a (0.4 dS/m) no denotan problemas asociados con la presencia de sales.

### **Contenido de carbono**

La materia orgánica (MO) que contiene el suelo procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos. Considerando un factor de conversión de MO a carbono de 0.58, el carbono presente en los sitios de muestreo denota una diferencia significativa respecto con el uso y manejo que se le da al suelo, esto también es explicado por las condiciones de vegetación presentes en los sitios de muestreo siendo el sitio BEC donde se encuentra el mayor porcentaje de acumulación de MO y el sitio PI el que presenta menor porcentaje de MO, donde la cobertura vegetal es escasa y se limita a herbáceas de escaso tamaño y a gramíneas; aparte de ser éste, un suelo con características de compactación y baja actividad biológica. El contenido de C de acuerdo a Siebe *et al.* (2006) es medio-alto para BEC y medio para BED, BR y AR y bajo para PI (Figura 17).



**Figura: 17** Contenido de carbono en los suelos superficiales de las diferentes unidades de paisaje.

### ***Nitrógeno total (Nt)***

La cantidad presente de Nt no representa una diferencia significativa en los cinco sitios de muestreo y se encuentran dentro de un rango de .14% a .37%, teniendo el contenido más bajo el sitio PI y la mayor concentración para BEC; para éste último la disponibilidad de Nt es medio alta, mediana para los sitios BED y BR y baja para PI y AR de acuerdo a Siebe *et al.* (2006) la presencia de Nt en el suelo Favorece el crecimiento vegetativo, produce succulencia, Da el color verde a las hojas, gobierna en las plantas el uso de potasio, fósforo y otros. Un exceso de este elemento retarda la maduración, debilita la planta y puede bajar la calidad del cultivo.

### ***Fosforo (P)***

El fósforo es un macro-elemento esencial para el crecimiento de las plantas, este se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica, dentro de la zona de estudio se encontró que los niveles de fosforo para los diferentes sitios, presentaban diferencia significativas solo en los sitios PI y AR con 112.4 ppm y 125 ppm respectivamente; en contraste con los sitios BEC, BED y BR donde los niveles son de 52.80 ppm, 49.0 ppm y 49.0 ppm respectivamente.

De acuerdo a esto las concentraciones van de altas para el sitio BEC, BED y BR y muy altas para los PI y AR (NOM 021- RECNAT-2000).

### ***Potasio ( $K^+$ )***

La base para la clasificación, de las formas del  $K^+$  en el suelo, es su disponibilidad para la absorción por parte de la planta. Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones ambientales, la disponibilidad de potasio puede variar. La cantidad de potasio presenta cambios abruptos para sitios de la zona de estudio, los niveles de este se encuentran entre las 32ppm a las 440ppm donde los niveles más bajos corresponden a el sitio PI y el nivel más alto corresponde a el sitio BEC.

### ***Calcio ( $Ca^{2+}$ )***

El contenido de calcio de un suelo depende de los materiales de origen. En el caso del calcio no presenta diferencias significativa para los primeros tres sitios de estudio, en el caso del sitio PI y el sitio AR muestra un aumento considerable en los niveles de calcio con 1432 ppm y 1872 ppm respectivamente.

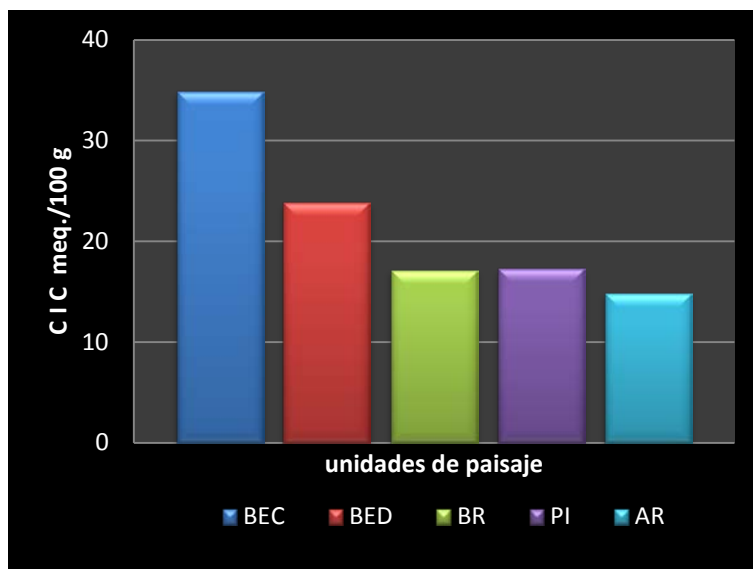
### ***Magnesio ( $Mg^{2+}$ )***

Los niveles de magnesio se encuentran con variaciones significativas para cada sitio de muestreo, fluctuando entre 300 ppm para PI y 792 para AR, cabe hacer notar en contraste entre ambos sitios, si se considera que ambos pertenecen a la misma unidad edáfica.

### ***Capacidad de Intercambio Catiónico***

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), es la cantidad de cationes que pueden ser retenidos por los suelos, este parámetro guarda estrecha relación con la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo. El sitio BEC registra la CIC más alta con 34.9 meq/100 g., en tanto que los demás sitios fluctúan entre 15 y 24 meq/100 g (Figura 18). El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre

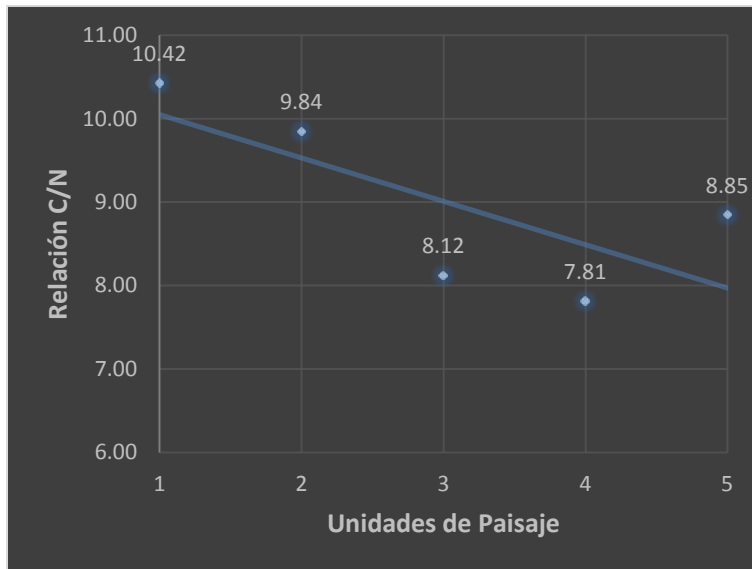
otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes siendo arenoso o pobre en materia orgánica (FAO, 2015).



**Figura: 18** Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo (30 cm) de las Unidades de Paisaje.

### ***Relación carbono nitrógeno (C/N).***

Esta relación indica la naturaleza de los restos orgánicos y su capacidad para ser mineralizados. La relación C/N se utiliza para estimar la susceptibilidad de la materia orgánica para ser mineralizada o humificada en el suelo de tal forma que valores elevados de este indicador (<15) indicarían que los procesos de humificación son más intensos que los de mineralización; bajo el supuesto anterior a los sitios de muestreo se encontraron valores que oscilan entre 7.8 a 10.8 C/N. los cuales no denotan diferencias significativas, por lo tanto la propensión de la materia orgánica va hacia condiciones de mineralización (Figura 19).



**Figura: 19** Relación C/N en las diferentes Unidades de Paisaje

# *Capítulo 5*

## *Discusión*

## 5.1 Análisis de correlación entre indicadores de calidad

Mediante la implementación del método estadístico de análisis de correlación lineal simple se pudo establecer el vínculo que guardan determinadas variables y por medio del cual es posible entender el comportamiento del suelo.

Cuadro 6 Matriz de correlaciones lineales mediante el método de Pearson.

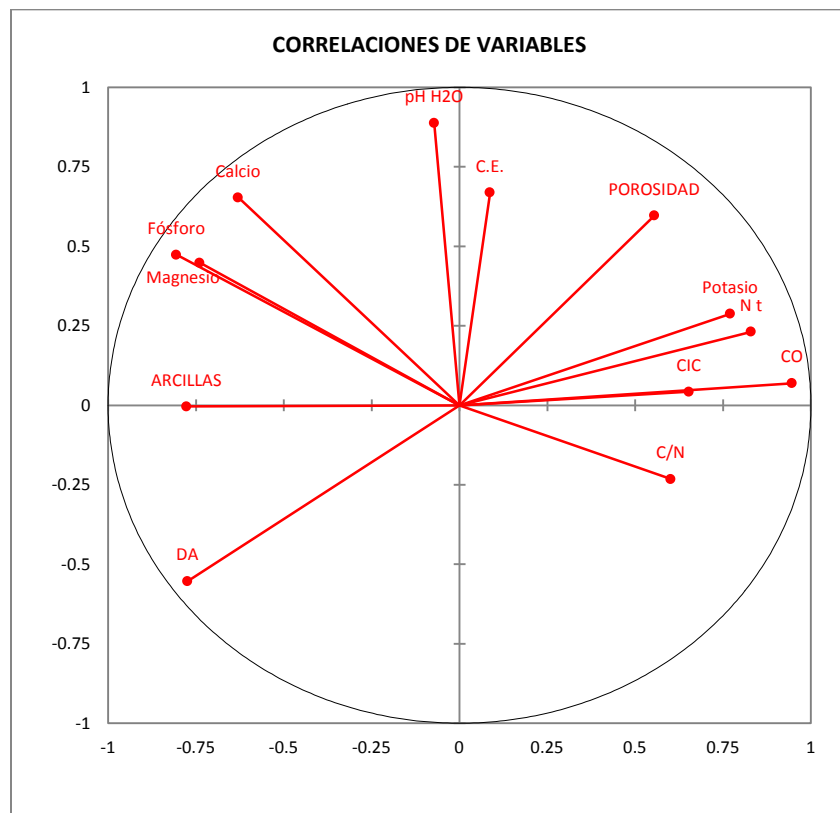
| Variables             | DA            | Porosidad (%) | Arcillas (%)  | pH (H <sub>2</sub> O) | C.E. (dS/m) | COS (%)       | N t (%)       | C/N           | Fósforo (ppm) | Potasio (ppm) | Calcio (ppm) | Magnesio (ppm) |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| DA                    |               |               |               |                       |             |               |               |               |               |               |              |                |
| Porosidad (%)         | <b>-0.863</b> |               |               |                       |             |               |               |               |               |               |              |                |
| Arcillas (%)          | <b>0.480</b>  | -0.194        |               |                       |             |               |               |               |               |               |              |                |
| pH (H <sub>2</sub> O) | <b>-0.437</b> | 0.395         | -0.048        |                       |             |               |               |               |               |               |              |                |
| C.E. (dS/m)           | <b>-0.409</b> | 0.334         | 0.014         | <b>0.498</b>          |             |               |               |               |               |               |              |                |
| COS (%)               | <b>-0.746</b> | <b>0.606</b>  | <b>-0.735</b> | -0.070                | 0.132       |               |               |               |               |               |              |                |
| N t (%)               | <b>-0.734</b> | <b>0.589</b>  | <b>-0.718</b> | 0.111                 | 0.128       | <b>0.877</b>  |               |               |               |               |              |                |
| C/N                   | -0.361        | 0.296         | -0.304        | -0.297                | 0.076       | <b>0.595</b>  | 0.158         |               |               |               |              |                |
| Fósforo (ppm)         | 0.388         | -0.176        | <b>0.561</b>  | <b>0.441</b>          | 0.220       | <b>-0.674</b> | <b>-0.540</b> | <b>-0.563</b> |               |               |              |                |
| Potasio (ppm)         | <b>-0.737</b> | <b>0.425</b>  | <b>-0.646</b> | 0.238                 | 0.247       | <b>0.651</b>  | <b>0.629</b>  | 0.346         | <b>-0.498</b> |               |              |                |
| Calcio (ppm)          | 0.190         | 0.030         | <b>0.425</b>  | <b>0.568</b>          | 0.269       | <b>-0.502</b> | -0.302        | <b>-0.548</b> | <b>0.838</b>  | -0.332        |              |                |
| Magnesio (ppm)        | 0.357         | -0.160        | <b>0.500</b>  | <b>0.405</b>          | 0.147       | <b>-0.662</b> | <b>-0.591</b> | <b>-0.420</b> | <b>0.808</b>  | -0.362        | <b>0.809</b> |                |
| CIC (meq/100 g)       | <b>-0.428</b> | 0.293         | <b>-0.630</b> | -0.034                | -0.038      | <b>0.570</b>  | <b>0.447</b>  | <b>0.430</b>  | <b>-0.479</b> | <b>0.582</b>  | -0.212       | -0.271         |

Los valores resaltados son diferentes de 0 con un nivel de significación  $\alpha=0.05$ , los representados en color rojo muestran una correlación alta o intensa mientras que las representadas en color verde denotan una correlación débil.

**Cuadro 7.** Condensado de la matriz de correlación

|                            | Correlaciones positivas | Correlaciones negativas |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>DA</b>                  | 1                       | 7                       |
| <b>Porosidad (%)</b>       | 3                       | 1                       |
| <b>Arcillas (%)</b>        | 4                       | 3                       |
| <b>pH (H<sub>2</sub>O)</b> | 4                       | 1                       |
| <b>C.E. (dS/m)</b>         | 1                       | 1                       |
| <b>COS (%)</b>             | 4                       | 5                       |
| <b>N t (%)</b>             | 3                       | 4                       |
| <b>C/N</b>                 | 2                       | 3                       |
| <b>Fósforo (ppm)</b>       | 4                       | 5                       |
| <b>Potasio (ppm)</b>       | 4                       | 2                       |
| <b>Calcio (ppm)</b>        | 3                       | 2                       |
| <b>Magnesio (ppm)</b>      | 4                       | 3                       |
| <b>CIC (meq/100 g)</b>     | 4                       | 3                       |

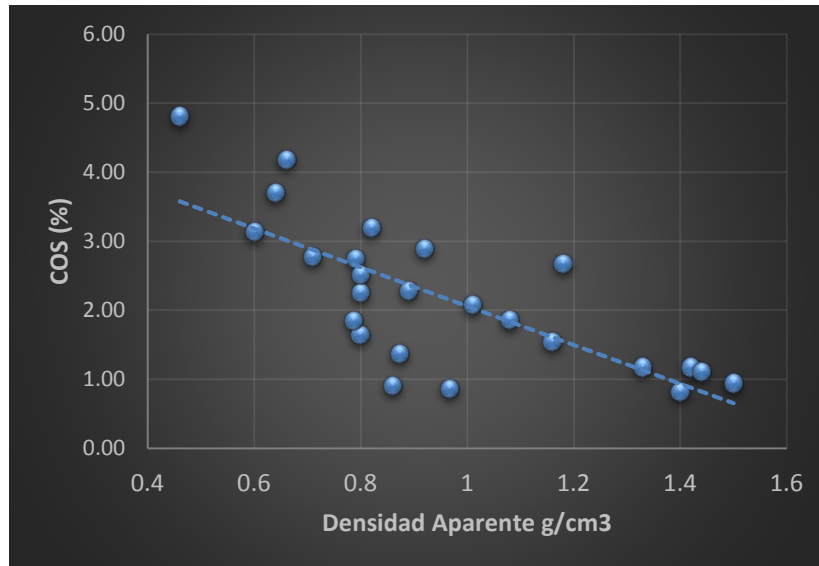
Las correlaciones negativas indican una correlación en forma inversa entre las variables de estudio ejemplo a mayor DA el COS disminuye, las relaciones en positivo de notan un crecimiento en conjunto



**Figura: 20** Grafica de correlación de variables (elaboración propia en XLSTAT)

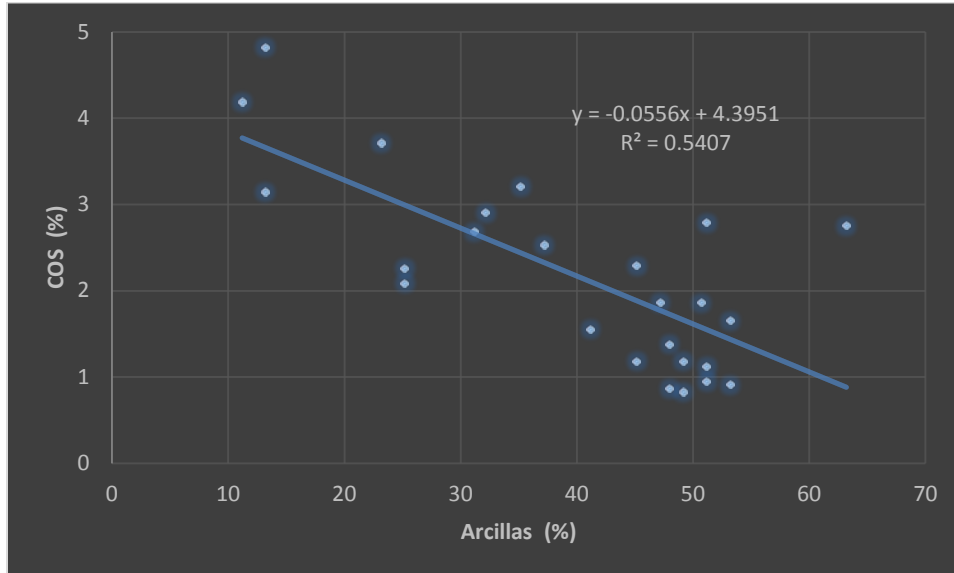


## 5.2 Correlaciones significativas entre indicadores de calidad del suelo



**Figura: 21** Gráfica de correlación COS / Densidad Aparente.

De acuerdo al análisis de correlación lineal simple, se desprende que la variable con mayor número de correlaciones es la DA, dado que se correlacionó negativamente con la porosidad (-0.863), COS (-0.746), Potasio (-0.737) y Nt (-0.734). Lo anterior indicaría que como variable integradora, con el incremento de la DA, las variables mencionadas disminuyen. Este tipo de correlaciones han sido encontradas en trabajos previos y pudieran ser un indicador adecuado de la degradación en el suelo (*Chaer, 2009*). La tendencia se manifiesta tanto en suelos forestales como agrícolas y pastizales. Ha sido ampliamente documentado el papel de la DA como indicador de perturbación en el suelo y en este estudio queda manifiesto que en aquellos suelos poco perturbados como lo es el sitio BEC la baja DA también está relacionada con elevados contenidos de COS, alta porosidad, Nt y en general con una buena disponibilidad de nutrientes. Caso opuesto es el sitio PI, con la mayor DA, relacionada de manera negativa con las variables anteriores.



**Figura: 22** Análisis de correlación COS /Arcillas

En los suelos con cierta evolución, la formación de compuestos organominerales permite la estabilización de la materia orgánica en el suelo por lo que es deseable que el suelo contenga un mínimo de arcillas para tal propósito. En el estudio se obtuvo una relación significativa y negativa entre arcillas y COS (Figura 21). Lo anterior que en apariencia resultaría contradictorio, podría explicar la relación de procesos erosivos que han eliminado la cubierta superior del suelo, particularmente en el caso del sitio BED, o bien la presencia de arcillas expandibles en los sitios PI y AR., suelos que han perdido parte de sus reservas de carbono por las prácticas de manejo.

### 5.3 Análisis de las Unidades de Paisaje

Para poder hacer la discusión de la zona de estudio se agruparon los sitios de acuerdo a las características que comparten como uso y manejo, tipo de suelo y tipo de vegetación como resultado de esto se obtuvieron tres grupos, el primero de estos grupos está conformado por los sitio de muestreo BEC Y BED, el segundo grupo está conformado únicamente por el sitio BR ya que no se encontró similitudes con ninguno de los otros sitios de estudio, y por último el grupo 3 que está conformado por los sitios PI y AR, los cuales comparten características similares como el tipo de suelo.

#### ***Grupo 1: Bosque primario conservado & bosque secundario degradado***

Este grupo presenta características similares de vegetación, tipo de uso de suelo y manejo, con diferencia en su estado de conservación.



**Figura: 23** Panorámica de la unidad de paisaje (BEC)

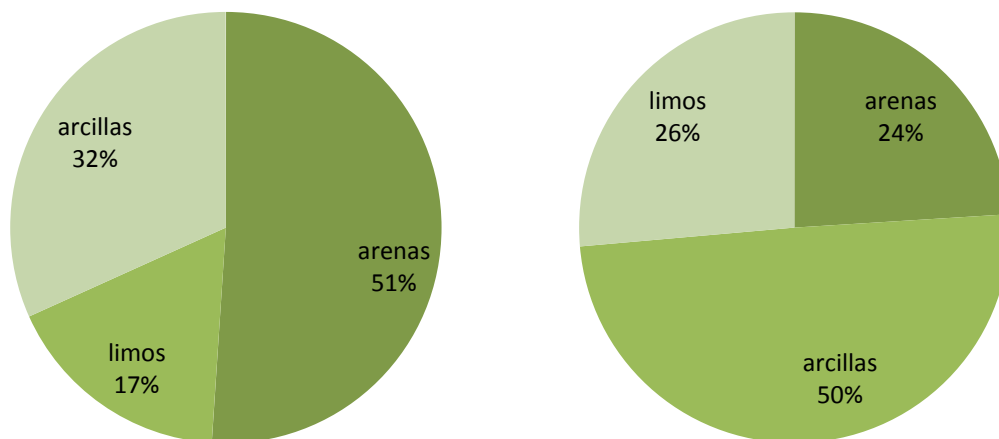


**Figura: 24** Panorámica de la unidad de paisaje (BED)

Los resultados que arrojaron los análisis físicos y los análisis químicos muestran que este grupo registra los contenidos más altos de materia orgánica, alta porosidad, y texturas francas en superficie, lo que le confiere condiciones adecuadas para el desarrollo de la vegetación natural. En contraste, se evidencian diferencias significativas debido al estado actual de ambos sitios. Por lo que respecta al sitio BEC, su grado de conservación queda de manifiesto por su alta disponibilidad de nutrientes como Nt, elevada CIC y una relación C/N mayor que el resto de los sitios, lo que le confiere una mayor estabilidad a largo plazo de la disponibilidad de nutrientes para microorganismos y plantas.

Por contraparte, el sitio BED observa diferencias significativas que se traducen en una menor disponibilidad de nutrientes, DA más alta, menor porosidad con lo cual los procesos de captación e infiltración de agua se dificultan, propiciando la intensificación de la erosión hídrica laminar, en surcos y cárcavas. En la medida de que los procesos erosivos se intensifican, el suelo pierde aptitudes para mantener servicios como la captación de agua, captura de carbono y preservación de la biota del suelo, necesaria para el desarrollo del reciclaje de nutrientes.

El sitio uno (BEC) tiene una textura franco arcillo arenosa, mientras que en el sitio 2 (BS) es arcillosa. Dada la similitud en los procesos pedogenéticos de ambos sitios es probable que la textura se deba a la remoción de vegetación que ha sufrido el sitio 2 (Figura 24).



**Figura: 25** Composición textural del suelo superficial de las Unidades de Paisaje BEC y BED

La cantidad de MO presente en el sitio BEC presenta una diferencia significativamente mayor con respecto al sitio BED, lo cual en primera instancia pudiera determinar una diferencia significativa ( $P \leq 0.05$ ), elevándose, los niveles de MO en el sitio 1 gracias a esto los frágiles suelos forestales sólo pueden sustentar una vida abundante porque las hojas y las ramas que caen proporcionan nutrientes, por la protección que les proporciona el follaje forestal contra el sol ardiente y las lluvias torrenciales, y dado que las estructuras de las raíces evitan la erosión. Sin embargo en el sitio 2 por su estado de degradación se observa que, el suelo se agota rápidamente. Los pastos nativos ofrecen pocos nutrientes y escasa protección al suelo, la pérdida de vegetación en la zona de estudio acelera la pérdida de nutrientes y la erosión. (FAO, 2012).

La mayor parte del nitrógeno almacenado en el suelo se encuentra en forma orgánica, por lo tanto, la disponibilidad de materia orgánica influye directamente en la disponibilidad de nitrógeno. Ejemplo de esto es el contenido de Nt en los suelos de los sitios BEC y BED con 31% y 21% respectivamente

La materia orgánica suele acidificar el medio, favoreciendo así indirectamente la absorción de nutrientes por las plantas (*Gallardo et al., 2009*), lo cual explica que los niveles de pH tiendan a ser ligeramente ácidos para estos dos sitios.

En cuanto a la generación de servicios ecosistémicos hidrológicos se pueden establecer diferencias importantes en el comportamiento de los suelos forestales para las tres UP con esta cobertura: en el caso la UP BEC, la densa hojarasca y suelos con un alto porcentaje de porosidad y materia orgánica reúne condiciones muy propicias para la captación y percolación del agua de lluvia, por lo que esta zona dentro de la cuenca es estratégica para la captación de agua, permitiendo su lenta infiltración hacia el subsuelo y la recarga de los mantos acuíferos (*Bruijnzeel, 1990*). LA UP BED es un sitio de contrastes debido al alto grado de deterioro que presenta, principalmente por la remoción de la cubierta vegetal y la erosión hídrica; si bien, los indicadores para esta UP registra una alta heterogeneidad, esto es debido a que durante el proceso de toma de muestras se captó la heterogeneidad espacial considerando diferentes condiciones de cobertura vegetal, la tendencia generalizada es hacia la degradación constante del sistema por lo que su condición para prestar servicios ecosistémicos como la captación de agua, sumidero de carbono y fungir como sustrato para los procesos biológicos, está fuertemente restringida por su deterioro; en tal sentido, se ha demostrado que el papel de los bosques en la captación de agua es impresionante, así por ejemplo, un estudio realizado en bosques del sureste de Asia mostró que en condiciones de escasa perturbación, los suelos captan un 35% del agua de lluvia, mientras que esta cifra baja a 20% y 12% en bosques sujetos a extracción moderada y plantaciones de palmas, respectivamente (*Myers, 1997*).

### ***Grupo 2: Bosque reforestado (BR)***

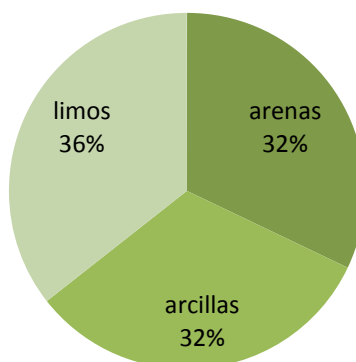
La UP presenta características particulares que no se encuentran en ningún otro sitio de estudio, esto es debido principalmente al manejo histórico que ha tenido, así como a las condiciones actuales del suelo (Figura 25) (Ver anexos).



**Figura: 26** Unidad Paisajística Bosque Reforestado (BR)

La textura de los suelos es franco arcillosa, y presenta una porosidad del 37.14% con un pH de 5.9 lo cual podría atribuirse a la presencia de eucaliptos como vegetación dominante (*Delgado et al, 2006*). La CIC presenta valores de 17.17 (meq)/100 g, que se relaciona directamente con la MO de 4.61%, y una relación C/N de 8, lo que dispone una actividad biológica media, con tasas moderadas de mineralización. La DA se encuentra en un rango medio .94%, lo que indica mayor compactación que en el caso de la UB BEC La mayor parte del nitrógeno almacenado en el suelo se encuentra en forma orgánica, por lo tanto, la disponibilidad de materia orgánica influye directamente en la disponibilidad de nitrógeno (*Inforganic, 2016*).

### Composición Textural sitio BR



**Figura: 27** Composición textural del sitio BR

En general esta UP representa con relación a los servicios ecosistémicos una producción limitada de los mismos (*Daily, 1997*) ya que las características y los resultados de los análisis físicos químicos indican que este posee una baja capacidad de infiltración, baja fertilidad y poca variación vegetal lo que ocasiona que los servicios ambientales tengan presencia a una baja escala de disponibilidad, estos sitios de muestreo tiene una tendencia a la degradación del suelo, donde se puede presentar erosión, hídrica como erosión eólica

### ***Grupo 3: Pastizal inducido & Agricultura de riego***

Este grupo se caracteriza por compartir el mismo tipo de suelo y presentar un manejo diferenciado, lo que arroja diferencias significativas entre cada uno de ellos.





**Figura: 28** Unidad paisajística a pastizal inducido (PI)

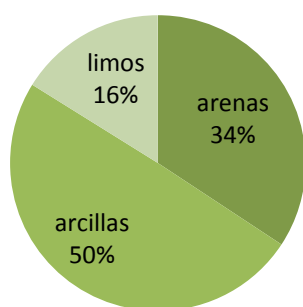


**Figura: 29** Unidad paisajística agricultura de riego (AR)

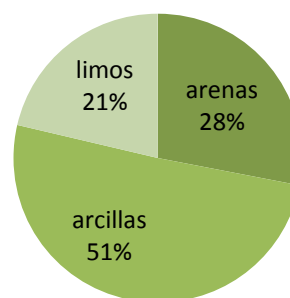
El tipo de suelos que caracteriza estos sitios es el Vertisol, con una textura arcillosa (> 40 % de arcillas); con un una DA de  $1.43 \text{ g/cm}^3$  para PI y de  $0.96 \text{ g/cm}^3$  para AR. El contenido de MO para AR casi es el doble que para PI. Los datos anteriores indican que si bien ambas UP están conformadas por el mismo grupo de suelos, es muy probable que el manejo diferencial que han tenido en el tiempo, ha incidido sobre algunas de sus propiedades físicas y químicas. De esta forma se considera que en el caso de PI, el sobrepastoreo y la condición de alto contenido de arcillas (Figuras 30 y 31), inciden para compactar el suelo, lo cual se

traduce en un drenaje superficial lento, deficiencias para el desarrollo radicular de la vegetación por la falta de oxígeno y saturación de humedad en determinados momentos del año, disminuyendo la productividad de estos sistemas (Taboada & Álvarez, 2008). En la UP AR, las prácticas de manejo a que está sujeta, implican su laboreo, rotación de cultivos, aporte de enmiendas orgánicas y fertilizantes químicos.

**Composición Textural  
sitio PI**



**Composición Textural  
sitio AR**



**Figura: 30** Composición textural del sitio PI y Composición textural del sitio AR

En cuanto a los contenidos de fósforo, calcio y magnesio, no presentan diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ), excepto en los niveles de potasio donde se existe una variación importante entre ambas UP, lo cual pudiera deberse al aporte constante de fertilizantes en AR.

El pH muestra una correlación alta con la CIC de significancia del .802 (Cuadro 6). La carga de algunos de los componentes del suelo que contribuyen a la CIC se ve afectada por el pH del suelo.

Estos componentes tienen grupos funcionales de OH en sus superficies. El grupo OH puede liberar o absorber protones. En un alto pH, los protones se liberan de este grupo, la carga del grupo funcional se hace negativa y como resultado aumenta la CIC del suelo.

Tales condiciones han propiciado que se mantengan niveles medios de MO, Nt, las condiciones mecánicas del suelo favorecen un drenaje moderado y condiciones adecuadas para la infiltración de agua y mayor permanencia del agua disponible para los cultivos

#### 5.4 Generación de servicios ecosistémicos por sitio

La base de recursos naturales y los servicios ecosistémicos son los cimientos de todos los sistemas agrícolas y alimentarios. Por ello se pretende garantizar la prestación de servicios ecosistémicos esenciales, es necesario respaldar y mantener las funciones de los ecosistemas y proteger la biodiversidad (FAO, 2016)

La agricultura, la ganadería, Y la actividad forestal se benefician de los servicios ecosistémicos y, a su vez, los proporcionan. Los efectos que estos sectores producen en los servicios ecosistémicos pueden ser positivos o negativos, por ejemplo:

**Cuadro 7** Efectos de los servicios ecosistémicos por uso y manejo (FAO. 2015)

| <b>Efectos positivos</b>  | <b>Efectos negativos</b>  |
|---|---|
| ❖ La agricultura proporciona hábitats a las especies silvestres y crea paisajes con valor estético  | ❖ Los plaguicidas, así como la homogeneización del paisaje, pueden reducir la polinización natural  |
| ❖ Los bosques ayudan a mantener ecosistemas acuáticos saludables y proporcionan fuentes fiables de agua limpia  | ❖ La deforestación y la ordenación deficiente pueden hacer aumentar las inundaciones y los corrimientos de tierras durante los ciclones             |
| ❖ Los excrementos animales pueden ser una fuente importante de nutrientes y de dispersión de semillas y pueden mantener la fertilidad de los suelos en los pastizales | ❖ El exceso de excrementos animales y su gestión deficiente pueden conllevar la contaminación del agua y poner en peligro la biodiversidad acuática |

Los servicios ecosistémicos varían de acuerdo al tipo de uso y manejo de cada UP, así como por las condiciones físicas en las que se encuentra el suelo, el siguiente cuadro muestra el diagnóstico de la generación de servicios ecosistémicos por UP, infiriendo la generación de los mismos a partir de los resultados de los análisis físico-químicos como la observación en campo.

**Cuadro 8** Generación de servicios ecosistémicos del suelo por Unidad de Paisaje

| Servicio/Sitio                                       | BEC   | BED   | BR   | PI  | AR   |
|--|---|---|--|---|--|
| <b>Purificación del agua</b>                         | ✓   | ✓   | ✓  | ✗   | ✗  |
| <b>factores</b>                                      | Porcentaje alto de porosidad del suelo, textura | Porcentaje alto de porosidad del suelo, textura | Suelo poroso con textura adecuada para la infiltración                       | Suelos altamente compactados                              | Suelos tecnificados para el laboreo y producción de cultivos |
| <b>Retención de carbono</b>                          | ✓   | ✗   | ✓  | ✗   | ✗  |
| <b>Factores</b>                                      | Porcentaje alto Materia orgánica y Vegetación   | Suelos erosionados                              | Presencia de vegetación secundaria y suelos en recuperación                  | Suelos altamente compactados                              | Suelos tecnificados para el laboreo y producción de cultivos |
| <b>Regulación del clima</b>                          | ✓   | ✓   | ✓  | ✗   | ✗  |
| <b>Factores</b>                                      | Presencia de vegetación                         | Presencia de vegetación                         | Presencia de vegetación  | Vegetación escasa   | Zona de cultivo  |
| <b>Hábitat biológico</b>                             | ✓   | ✓   | ✓  | ✗   | ✗  |
| <b>Factores</b>                                      | Presencia alta de vegetación                    | Presencia de vegetación                         | Presencia alta de vegetación   | Suelos desnudos altamente compactados                     | Zona de cultivo con control de plagas                        |
| <b>Base para las infraestructuras</b>                | ✗   | ✗   | ✗  | ✓   | ✗  |
| <b>Factores</b>                                      | Zona de conservación ecológica                  | Zona de conservación ecológica                  | Zona de conservación ecológica   | Suelo apto para edificaciones                             | Zona de cultivo  |
| <b>Suministro de alimentos y fibras</b>              | ✓   | ✓   | ✓  | ✓   | ✓  |
| <b>Factores</b>                                      | Presencia alta de vegetación                    | Presencia alta de vegetación                    | Presencia alta de vegetación   | Presencia de pastos para uso pecuario                     | Cultivos de maíz y trigo                                     |
| <b>Suministro de materiales para la construcción</b> | ✗   | ✗   | ✓  | ✗   | ✗  |
| <b>Factores</b>                                      | Zona de conservación ecológica                  | Zona de conservación ecológica                  | Extracción de madera   | Zona pecuaria   | Zona de cultivo  |
| <b>Estabilización del paisaje</b>                    | ✓   | ✗   | ✓  | ✓   | ✓  |
| <b>Factores</b>                                      | Presencia de vegetación primaria                | Suelos erosionados con presencias de cárcavas   | Vegetación introducida bajo programas de conservación de suelos y vegetación | Suelos compactados par uso pecuario, o edificación urbana | Suelos tecnificados para el laboreo y producción de cultivos |

# *Capítulo 6*

## *Conclusiones*

## Conclusiones

Para este estudio, la asociación de las características físicas y bióticas dentro de las unidades de paisaje consideró la creación de espacios relativamente homogéneos en los que fue posible emplear una serie de indicadores de calidad del suelo para determinar diferencias en las propiedades y funciones de cada unidad.

Dentro de los indicadores del suelo, aquellos que resultaron más importantes para diagnosticar su condición actual fueron aquellos relacionados con su estructura y composición física (Densidad Aparente, contenido de arcillas y porosidad), así como de su calidad química (materia orgánica, nitrógeno total, Capacidad de Intercambio Catiónico, nutrientes).

El diagnóstico de la calidad de suelos indicó que las principales causas de deterioro son las siguientes:

- La pérdida de estabilidad de la capa superficial del suelo y su remoción en terrenos con mayor pendiente debido a la intensificación de los procesos de erosión hídrica.
- Reducción del espacio poroso necesario para la transmisión de agua y aire al interior del suelo, lo que implica una disminución en la capacidad de infiltración y acumulación de agua en las capas inferiores del suelo, deficiencias en el desarrollo radicular de las plantas y menor disponibilidad de oxígeno.
- Disminución de la fertilidad provocada por un menor aporte de materia orgánica en aquellos sitios sujetos a perturbación por causas naturales y antrópicas (erosión hídrica, sobre pastoreo).

Adicionalmente se pudo constatar que dentro de la Unidad de Paisaje sujeta a prácticas agrícolas de conservación y manejo de suelos que incluyen la rotación de cultivos, aplicación de abonos orgánicos y químicos, algunas propiedades del suelo pueden como el contenido de materia orgánica, densidad aparente, espacio poroso y disponibilidad de nutrientes, pueden mejorarse propiciando un menor desempeño en las funciones del suelo.

A partir de los indicadores físicos y químicos se pudieron advertir diferencias significativas en el estado actual de los suelos de la zona de estudio, así como de la capacidad de cada Unidad de Paisaje para ser proveedora de servicios ecosistémicos.

Los indicadores de la calidad del suelo constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, y su estudio sistemático permite contribuir a la toma de decisiones sobre el manejo a largo plazo de los ecosistemas naturales y productivos



# Bibliografía

- Arshad, M. A., & Coen, G. M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7 (1-2): 25-31.
- Atlas, R. & Bartha, R. 2001. Ecología microbiana y microbiología ambiental. 4ta. ed. Addison Wesley. Madrid, España. 677 p.
- Badia, D., Marti, C., & Poch, R. M. 2011. A Soil Toposequence Characterization in the Irrigable Lands–Protected Area Contact Zone of El Basal, NE-Spain. *Arid Land Research and Management*, 25 (1): 1-18.
- Badía, D., Martí, C., Cuchí, J. A., & Casanova, J. 2000. [Soils from Sierra Salinas to Vero river (Somontano de Barbastro, Altoaragón ,Spain). *Edafología. España*.
- Bautista Cruz, A.; Castillo, R. F.; Gutiérrez, C.; Etchevers B. J. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas.
- Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. International Hydrological Program (UNESCO). Países Bajos. 230 p.
- Bushnell, T. M. 1943. Some aspects of the soil catena concept. *Soil Science Society of America Journal*, 7(C): 466-476.
- Campos, A., Oleschko, K., Etchevers, J., & Hidalgo, C. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 248(3): 174-182.
- Cantú, M., Becker A., Bedano J. & Schiavo, H. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2): 173-178. Recuperado el 25 de marzo de 2016, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672007000200008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000200008&lng=es&tlng=es).

- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En: Soil quality for crop production and ecosystem health (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Clunes, J., Navarro, J., & Pinochet, D. 2014. Variación temporal del contenido de materia orgánica en dos suelos volcánicos bajo diferentes manejos agrícolas. *Agro sur*. 42(3): 1-14.
- CONAFOR y UACH. 2013. Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Jalisco, México.
- CONAFOR y UACH. *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final*. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Jalisco, México. 2013.
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I., & Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones geográficas*, (66), 81-104.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, 13(2).
- Daily, G. C., S. Alexander, P. R. Ehrlich, L. Goulder, J. Lubchenco, P. A. Matson, H. A. Mooney, S. Postel, S. H. Schneider, D. Tilman y G. M. Woodwell. 1997. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Ecology*. 2:5.
- Delgado, S., Alliaume, F., García P. F., & Hernández, J. 2006. Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus sp.* sobre el recurso suelo en Uruguay. *Agrociencia*, 10(2): 95-107.
- Doran, D.C. 1999. Guía para la evaluación de calidad y salud del suelo. *USDA. EUA*.

- Doran, J.W. y Parquin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.
- Espinoza, L., Slaton, N. A., & Mozaffari, M. 2012. *Como interpretar los resultados de los análisis de suelos*. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, US Department of Agriculture, and county governments cooperating.
- FAO. 2006. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. Roma.
- Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L., & Delgado, M. 2009. Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Ecosistemas*, 18(2).
- García, Y., W. Ramírez & S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2): 125-138. Recuperado en 25 de marzo de 2016, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es).
- Gobierno del Estado de México. 2007. El diagnóstico ambiental realizado para la entidad. Estado de México.
- Gobierno municipal del Jilotepec. 2013. Plan de Desarrollo Municipal 2013 - 2015. Jilotepec, Estado de México.
- Gregorich, E. G., C.M. Monreal; M.R. Carter; D.A. Angers & B. Ellert. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4): 367-385.
- Hernández-Hernández, R. M., E. Ramírez; I. Castro & S. Cano. 2008. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia*. 42(3): 253-266.

- Huggett, R.J. 1998. Soil chronosequence, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32: 155-172.
- Ibáñez, J.& F. Manríquez. 2011. Los Andosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos. mayo 12, 2016, de Madri+d Sitio web: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>
- Ibarra-Montoya, J. L., R. Román; K. Gutiérrez; J. Gaxiola; V. Arias & M. Bautista. 2011. Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Ambiente & Agua*. 6(2): 111.
- INEGI. 2010. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Abril 10, 2016, de INEGI Sitio web: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/)
- INEGI, 2014. Erosión de suelos en México, escala 1:250 000. Boletín de prensa No. 295/14. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2014 a. *Erosión de suelos en México, escala 1: 250 000. Boletín de prensa Núm. 295/14 2014*. Aguascalientes, México. 2014.
- ISRIC. 2006. Procedures For Soil Analysis [en línea]: International Soil Reference Information Center P.O Box 353 The Netherland. 2002 [fecha de consulta: 1 septiembre 2016]. Disponible en: [http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/ISRIC\\_TechPap09\\_2002.pdf](http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/ISRIC_TechPap09_2002.pdf)
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how?. *Geoderma*, 114(3): 145-156.
- Keller, T.; I. Håkansson. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154: 398-406
- Kettler, T. A., D. J. Lyon; J. W. Doran; W. L. Powers & W. W. Stroup. 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil. Sci. Am. J.* 64:339-346.

- Krasilnikov, P., A. Jimenez; T. Reyna & N.E. García-Calderón. 2011. Geografía de suelos de México. UNAM, Facultad de Ciencias. México.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304 (5677): 1623-1626.
- Lambin, E. F., N. Baulies; G. Bockstael; T. Fisher; R. Krug; E. F. Lemmans; R. R. Moran; Y. Rindfuss; D. Sato; B. L. Skole. Turner II and C. Vogel (1999), *Land use and land cover change implementation strategy*, IGBP report, 48, IHDP, report 10, Estocolmo.
- MacDonald, K. B., W. R. Fraser; F. Wang & G. W. Lelyk. 1995. A geographical framework for assessing soil quality. In: Acton, D. F., and L. J. Gregorich (eds.) *The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada*. CLBRR, RB, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont. p:19-30
- Madrimasd. 2011. Un nuevo concepto de suelos. enero 22, 2016, de Madrimasd Sitio web: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo>
- Manly, B.F.J., 1998. *Multivariate Statistical Methods. A Primer*, second ed. Chapman & Hall, London.
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*. 10(1): 3-20.
- Masciandaro G, Ceccanti B (1999) Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. *Soil Till. Res*. 1417: 1-9.
- Masciandaro, G., and B. Ceccanti. 1999. Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. *Soil & Tillage Research* 51:129-137.
- Medley, K., B. Okey; G. Barrett; M. Lucas & W. Renwick. 1995. Landscape change with agricultural intensification in a rural watershed, southwestern Ohio. *Landscape Ecología*, 10 (3): 161-176.
- MÉXICO, U. P. M. (2003). Biodiversidad: uso, amenazas y conservación. *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. 93.

- Miliarium. (2004). Suelos Contaminados. Junio 10, 2016, de Miliarium Sitio web: <http://www.miliarium.com/Proyectos/SuelosContaminados/ArchivosMemoria/Contaminacionsuelos.asp>
- Milne, G. (1935). Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. *Soil Research*, 4(3): 183-198.
- Montagnini, F., Nair, P.K.R., 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Mortola, N. & Lupi, A.M. 2011. Indicadores de calidad de suelo para el manejo sustentable de los agroecosistemas productivos en Argentina. VI Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. México.
- Myers, N. 1997. The world's forests and their ecosystem services. In: G. Daily, ed. *Natures Services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press. Washington, D.C. p: 215-235.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre de 2002.
- OMNIA. (2013). Afectan 72 mil hectáreas el uso de suelo ilegal en Chihuahua. agosto 5, 2016, de OMNIA Sitio web: [www.omnia.com.mx/.../afectan-72-mil-hectareas-el-uso-de-suelo-ilegal-en-chihuahua/](http://www.omnia.com.mx/.../afectan-72-mil-hectareas-el-uso-de-suelo-ilegal-en-chihuahua/)
- Pérez, M. R., C.G. Fernández y & Sayer, J. A. 2007. Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas*. 16(3).
- PNUMA Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2000, Annual Review, Nairobi, Kenia.
- Porta- Casanellas, J., M. López-Acevedo, C. Roquero. 1993. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa.Madrid.807p.
- Portal de Suelos de la FAO. 2016. Propiedades Biológicas. 29/03/16, de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Sitio web: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-biologicas/es/>

- Prontuario de Información Geográfica Municipal de Los Estados Unidos Mexicanos Jilotepec México clave geoestadística, 2009.
- Restrepo, L. F., L Posada, S., & R Noguera, R. 2012. Application of the principal-component analysis in the evaluation of three grass varieties. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(2): 258-266.
- Rosete, F.A., J. L Pérez; G. Bocco. 2009. Contribución al análisis del cambio de uso de suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Investigación Ambiental*. 1:70-82.
- Rótolo, G. C., & Francis, C. (2008). Los servicios ecosistémicos en el “corazón” agrícola de Argentina. *Ediciones INTA*, (44).
- Sanchez-Marañón, M., Soriano, M., Delgado, G. & Delgado, R. 2002. Soil quality in Mediterranean mountain environments: effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal* 66 (3): 948-958.
- Saviozzi, A., A. Levi-Minzi, R. Cardelli y R. Riffaldi. 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil*. 233: 251-259.
- Schad, P., & Spaargaren, O. 2006. *World Reference Base for Soil Resources 2006: A Framework for International Classification, Correlation and Communication*. E. Michéli (Ed.). Food and agriculture organization of the United nations (FAO).
- SEMARNAT y CP. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- Semarnat y CP. *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000*. México. 2003.
- SEMARNAT. (2010). Los suelos en México. Mayo 20, 2016, de SEMARNAT.gob Sitio web: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen/03\\_suelos/cap3.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/03_suelos/cap3.html)

- Seybold, C.A., M.J. Mausbach; D.L. Karlen & H.H. Rogers. 1997. Quantification of Soil Quality. En *Soil Process and the Carbon Cycle* (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A. 2004. CRC Press, Boca Raton, Florida pp. 387-403.
- Siebe, C., & Jahn, R. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*.
- Singer, M.J. y Ewing, S. 2000. Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.). CRC Press, Boca Raton, Florida. 271-298 pp.
- SMN. 2010. Reporte de lluvias registradas. febrero 9,2016, de Sistema Meteorológico Nacional Sitio web: <http://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/informe-meteorologico-especial-de-lluvias>
- Sparling, G.P. 1997. Soil Microbial Biomass, Activity and Nutrient Cycling, as Indicators of Soil Health. En *Biological Indicators of Soil Health* (eds. Pankhursts, C.E., Doube, B.M. y Gupta, V.S.R.), pp. 97-105, Cab International, Oxon, UK.
- SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- SSSA. 2016. Calidad de suelos. abril 2, 2016, de Soil Science Society of America Sitio web: <https://www.soils.org/discover-soils/story/agroforestry-helps-farmers-branch-out>
- Subdirección de Información Ganadera y De Análisis y Política del Sector Dirección de Producción y Sanidad Animal. 2008. Ganadería y deforestación. junio 27, 2016, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/3/a-a0262s.pdf>.
- Sündborg, Å y A. Rapp. 1986. Erosion and sedimentation by water: problems and prospects. *Ambio* 15(4): 215-225.
- Taboada, M.A.; C.R. Álvarez. 2008. Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.



- Tamayo, B., & A. Ibrahim. (2009). *Aplicación del Análisis e Componentes Principales (Pca) en la interpretación de los resultados obtenidos en la extracción secuencial (Método Bcr) de metales pesados en los sedimentos del Río Luyanó (Cuba)* (Doctoral dissertation).
- Toledo, D. M., J. A. Galantini; E. Ferreccio; S. Arzuaga; L. Gimenez & S. Vázquez. 2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del suelo*, 31(2): 201-212.
- Turner, M. G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual review of ecology and systematics*, 171-197.
- Villani, M., L. Allee, A. Díaz, and P. Robbins. 1999. Adaptive strategies of edaphic arthropods. *Annual Reviews Entomology* 44: 233-256.
- White, P.M., Wolf, D.C., Thoma, G.J. et al. *Water Air Soil Pollut* (2006) 169: 207. doi:10.1007/s11270-006-2194-0
- Wolters, V. (2000). Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and fertility of Soils*, 31(1), 1-19.
- Zhang, K., Zheng, H., Chen, F. L., Ouyang, Z. Y., Wang, Y., Wu, Y. F., & Xiang, X. W. (2015). Changes in soil quality after converting Pinus to Eucalyptus plantations in southern China. *Solid Earth*, 6(1), 115.