



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y  
REGIONAL**

**Evaluación del desempeño hídrico de los  
suelos del Parque Estatal Sierra Morelos,  
Municipio de Toluca, Estado de México.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
PRESENTA**

**VICTORIA ABRIL ESCOBAR RODRÍGUEZ**

DIRIGIDA POR:  
Dr. EN C. GUSTAVO ÁLVAREZ ARTEAGA



**TOLUCA, MÉXICO**

**NOVIEMBRE 2021**

## Contenido

<b>Índice de tablas .....</b>	<b>4</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>5</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>8</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>9</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>11</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>12</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>12</b>
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos .....	12
<b>Justificación .....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo I Marco teórico .....</b>	<b>15</b>
1.1 Antecedentes .....	15
1.2 El concepto actual del suelo .....	18
1.2.1 Los componentes del suelo .....	18
1.3 El agua en el suelo .....	24
1.3.1 Tipos de agua presente en el suelo .....	24
1.4 Propiedades relacionadas con las funciones hídricas del suelo .....	27
<b>Capítulo II. Material y métodos .....</b>	<b>36</b>
2.1 Descripción del área de estudio.....	36
2.1.1 Localización .....	36
2.1.2 Clima.....	37
2.1.3 Topografía.....	38
2.1.4 Hidrología.....	39
2.1.5 Geomorfología .....	40
2.1.6 Edafología.....	41

2.1.7 Vegetación .....	43
2.1.8 Fauna.....	43
2.2. Caracterización socio económica .....	45
2.2.1 Tenencia de la tierra .....	45
2.3 Metodología .....	48
<b>Capítulo III. Resultados.....</b>	<b>58</b>
3.1 Densidad Aparente .....	60
3.2 Humedad .....	61
3.3 Porosidad.....	62
3.4 Granulometría del suelo.....	63
3.5 Contenido de arcillas .....	64
3.6 Contenido de arenas.....	65
3.7 Contenido de limos .....	66
3.8 Propiedades hídricas del suelo .....	66
3.8.1 Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y saturación .....	68
3.8.2 Conductividad hidráulica .....	69
3.8.3 Agua Disponible .....	70
<b>IV. Discusión.....</b>	<b>73</b>
4.1 Análisis del desempeño del suelo en los sitios de estudio.....	73
4.2 Análisis estadístico descriptivo de las variables del suelo .....	78
4.3 Análisis de correlación de los parámetros edáficos .....	79
4.4 Parámetros del suelo y su relación con los tipos de humedad del suelo ....	80
4.5 Consideraciones sobre la importancia del estudio del suelo dentro del PESM.....	84
<b>V. Conclusiones .....</b>	<b>87</b>
<b>VI. Referencias .....</b>	<b>91</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Composición del aire del suelo.....	22
Tabla 2. Tipos de drenaje en los suelos.....	28
Tabla 3. Clasificación de la porosidad del suelo .....	29
Tabla 4. Clases texturales del suelo de acuerdo con los sistemas americano e internacional .....	30
Tabla 5. Permeabilidad del suelo de acuerdo con su textura.....	33
Tabla 6. Relación entre la permeabilidad y la clase textural .....	34
Tabla 7. Tenencia de la tierra en el Parque Estatal Sierra Morelos .....	45
Tabla 8. Ubicación y características de los puntos de muestreo.....	52
Tabla 9. Métodos utilizados para los análisis físicos de laboratorio. ....	55
Tabla 10. Propiedades físicas del suelo.....	59
Tabla 11. Propiedades hídricas del suelo .....	67
Tabla 12. Estadísticos descriptivos de las variables edáficas e hidráulicas .....	78
Tabla 13. Matriz de correlaciones para las variables estudiadas .....	79

## Índice de figuras

Figura 1. Composición gravimétrica del suelo.....	18
Figura 2. Representación de las fases dentro del suelo.....	19
Figura 3. Tipos de Agua en el Suelo .....	25
Figura 4. Agua en el suelo. ....	26
Figura 5: Clases de Agua Disponible para los Vegetales y Características de Drenaje .....	27
Figura 6. Triángulo de texturas. ....	31
Figuras 7 y 8. Condiciones de permeabilidad en el suelo .....	33
Figura 9. Localización del sitio de estudio.....	36
Figura 10. Climas del Estado de México.....	37
Figura 11. Clima del Municipio de Toluca. ....	38
Figura 12. Mapa topográfico Parque Estatal Sierra Morelos (Altitud). ....	39
Figura 13. Cuerpo de agua del sitio de estudio.....	40
Figura 14. Ladera del Cerro La Teresona. ....	41
Figura 15. Muestras de suelo extraídas del sitio de estudio.....	42
Figura 16. Cola de zorra (Cortaderia Selloana).....	43
Figura 17. Gorrión cejas blancas (Spizella passerina) .....	44
Figura 18. Mapa de Tenencia de la Tierra dentro del Parque. ....	47
Figura 19. Metodología de la investigación .....	49
Figura 20. Ubicación de los puntos de muestreo en el PESM. ....	51
Figura 21. Extracción de las muestras de suelo.....	53
Figura 22. Secado de muestras .....	54
Figura 23. Triturado de muestras. ....	54
Figura 24. Análisis de la textura del suelo .....	56
Figura 25. Comportamiento de la Densidad aparente en los sitios de estudio....	60
Figura 26. Grafica de porcentaje de Humedad en el suelo. ....	61
Figura 27. Grafica de porcentaje de porosidad. ....	62
Figura 28. Distribución del contenido granulométrico dl suelo en los sitios de estudio a una profundidad de 30 cm. ....	63
Figura 29. Distribución del contenido granulométrico dl suelo en los sitios de estudio a una profundidad de 30 – 60 cm. ....	64
Figura 30. Contenido de arcillas para los suelos de los sitios de estudio.....	65
Figura 31. Grafica de HPMP, HCC y Punto de Saturación de 0-30 cm de profundidad. ....	68
Figura 32. Grafica de PMP, CC y Punto de Saturación de 30-60 cm de profundidad. ....	69
Figura 33. Grafica de Conductividad Hidráulica en cm/h. ....	70
Figura 34. Grafica de volumen de Agua Disponible. ....	70

Figura 35. Diagrama del perfil de los sitios de estudio .....	73
Figura 36. Relación entre el contenido de arcillas <b>(a)</b> y arenas <b>(b)</b> en el suelo con los tipos de humedad en el suelo .....	80
Figura 37. Relación entre el contenido de arcillas y la Conductividad Hidráulica del Suelo .....	82
Figura 38. Relación entre el contenido de arenas y el Agua disponible en el suelo .....	82

## Resumen

De acuerdo con instancias nacionales e internacionales, las principales ciudades del país registran un déficit en cuanto a la disponibilidad y calidad de áreas verdes que provean de servicios ambientales a la población. La ciudad de Toluca, México es partícipe de esta problemática, siendo el Parque Estatal Sierra Morelos la principal Área Natural Protegida (ANP), que cumple con esta función. Resalta la preocupación de autoridades y ciudadanía por conservar e incrementar la calidad ambiental de este espacio a través de diferentes programas y acciones que, para contribuir a estas actividades desde el enfoque ambiental, resulta pertinente identificar y evaluar los procesos ecosistémicos que determinan la relación suelo – planta que son clave para lograr el éxito de las acciones emprendidas.

A través del análisis espacial y visitas de campo se delimitó un transecto altitudinal en el que se establecieron seis puntos de control; en cada uno de ellos se tomaron muestras de suelo de 0 a 30 y 30 a 60 cm de profundidad, de las cuales se evaluaron sus propiedades físicas mediante métodos de laboratorio para determinar las diferentes condiciones de humedad relacionadas con el desarrollo de la vegetación. Los resultados obtenidos identificaron condiciones de drenaje lento asociado a mayor contenido de arcillas en la parte baja del transecto, así como suelos franco-arenosos, drenaje moderado a rápido y menor disponibilidad de agua en la parte alta. Los análisis estadísticos identificaron una relación altamente significativa entre el contenido de arcillas y las condiciones de humedad del suelo, por lo que el modelo matemático propuesto podría ser aplicado en otras zonas del parque sujetas a prácticas de manejo y conservación para conocer el desempeño hídrico de los suelos.

**Palabras clave:** áreas verdes, servicios ambientales, funciones hídricas del suelo, contenido de arcillas

## **Abstract**

According to national and international authorities, the main cities of the country register a deficit in availability and quality of green areas that provide environmental services to the population. The city of Toluca, Mexico is part of this problem, being the Sierra Morelos State Park the main public space that fulfills this function. It highlights the concern of authorities and citizens to conserve and increase the environmental quality of this space through different programs and actions and to contribute to these activities from an environmental perspective, it is pertinent to identify and evaluate the eco-systemic processes that determine the relationship between soil and plants, that are key to achieving the success of the actions undertaken.

Through spatial analysis and field visits, an altitudinal transect was delimited in which six control points were established. Soil samples from 0 to 30 and 30 to 60 cm deep were taken in each one of them, from which their physical properties were evaluated by laboratory methods to determine the different humidity conditions related to the development of the vegetation. The results obtained identified slow drainage conditions associated with higher clay content in the lower part of the transect, as well as sandy loam soils, moderate to fast drainage and less water availability in the upper part. Statistical analyses identified a highly significant relationship between clay content and soil moisture conditions, so the proposed mathematical model could be applied in other areas of the park subject to management and conservation practices to know the water performance of soils.

**Keywords:** green areas, environmental services, soil water functions, clay content

## Introducción

El suelo y agua son recursos estratégicos que contribuyen a la seguridad alimentaria y la generación de servicios ecosistémicos (FAO, 2020). En este sentido la presente investigación tiene como principal objetivo la evaluación de las propiedades y funciones hídricas de los suelos pertenecientes al Área Natural Protegida (ANP) Parque Estatal Sierra Morelos (PESM) del municipio de Toluca, Estado de México.

El interés de estudiar este tema en particular radica en la importancia de saber qué características tienen los suelos en donde se están realizando las forestaciones y reforestaciones dentro del parque, ya que como se sabe este parque en sus inicios no contaba con toda la cubierta boscosa que se conoce actualmente. A través de los años fueron surgiendo diversas campañas de reforestación por parte de las autoridades gubernamentales principalmente, para lograr una cubierta forestal mucho más extensa, y contribuir de esta forma al bienestar y cuidado del medio ambiente en el municipio de Toluca. Sin embargo, hablando en un ámbito tanto nacional como estatal, la calidad y supervivencia forestal no cuenta con niveles muy altos; y particularmente enfocándose a la situación del PESH, se han realizado campañas de forestación en lugares en los que, a la vista, no se perciben las condiciones de suelo adecuadas para tener resultados favorables.

A continuación, se presenta un breve resumen de cada uno de los capítulos que integran el presente trabajo.

El capítulo I presenta el marco teórico conceptual, en el cual se abordan los antecedentes consultados para el desarrollo de esta tesis, igualmente conceptos referentes al suelo que permiten una mejor comprensión de la investigación, así como temas de componentes del suelo, agua y tipos de agua en el suelo, y propiedades hídricas del suelo.

En el capítulo II se desarrolla la sección de material y métodos, en la cual se realiza la descripción física del Parque Estatal Sierra Morelos, como el clima, hidrología, geomorfología, etc., así como algunos aspectos socioeconómicos y administrativos del sitio de estudio. De igual forma se presenta la metodología empleada para el desarrollo del trabajo.

En el capítulo III se presentan los resultados, en donde se vació la información obtenida a partir de los análisis de laboratorio en el programa de Excel, para la elaboración de tablas y gráficas para una mejor comprensión de los resultados; se presentan los resultados en orden, partiendo de las propiedades físicas, y consecutivo las propiedades hídricas de cada uno de los sitios.

En el cuarto apartado, se presenta la discusión e interpretación de resultados, el cual comprende la discusión de los hallazgos, en donde se destacaron las variables que tuvieron mayor influencia en la calidad de los suelos muestreados, así como los posibles factores que pudieron dar lugar a dichos resultados.

En el quinto apartado se presentan las conclusiones que se obtuvieron del presente estudio, a partir de la discusión de los resultados; y finalmente, las referencias de los trabajos consultados y citados a lo largo de todo el documento, en el apartado siete.

## Planteamiento del problema

La conservación, manejo sustentable y restauración de los bosques del planeta son impostergables, debido a que estos ecosistemas son generadores de servicios ambientales de los que dependen ciudades y pueblos, además de ser sustento de millones de comunidades rurales que son la base para el mantenimiento de la biodiversidad y la garantía de las capacidades de adaptación al fenómeno del cambio climático (CONAFOR, 2013).

La recuperación de áreas forestales en México es una actividad de gran importancia para restituir los servicios ecosistémicos que proveen a la sociedad y a la naturaleza; sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos por parte de los sectores público y privado, los resultados no siempre son alentadores ya que a nivel nacional solo un 40% de las áreas reforestadas cuentan con un nivel aceptable de supervivencia y calidad (Wightman et al., 2003).

Previo al inicio de una plantación forestal importa identificar los factores ambientales limitantes del sitio, de manera que la planta se desarrolle bajo un mínimo de condiciones adecuadas para garantizar altas tasas de supervivencia (Sigala Rodríguez et al., 2015). De manera particular, el estudio del suelo resulta por demás relevante, ya que del conocimiento de sus propiedades y funciones dependerá en gran medida el éxito futuro de una plantación forestal.

Diversas investigaciones se han enfocado en evaluar el papel de las propiedades físicas del suelo para determinar la disponibilidad efectiva de agua y oxígeno en las plantas en función de sus componentes órgano minerales, así como su relación con respecto a determinada posición de relieve. En el caso de estudio del Parque Estatal Sierra Morelos, los antecedentes de esta investigación denotan una baja eficiencia en las campañas de reforestación, focalizada en las zonas bajas de la microcuenca, lo que podría deberse a condiciones restrictivas en el suelo, por lo cual la intención de esta investigación se centró en evaluar la condición física de los suelos dentro de un gradiente altitudinal.

## **Hipótesis**

El crecimiento y desarrollo de las especies arbóreas está altamente influenciado por el comportamiento de las funciones hídricas del suelo, por lo que el conocimiento de los componentes físicos y sus interacciones permitirá establecer la aptitud que estos tienen sobre el establecimiento y desarrollo de las plantaciones forestales dentro del Parque Estatal Sierra Morelos.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

- Evaluar el desempeño hídrico de los suelos dentro del Parque Estatal Sierra Morelos para determinar su aptitud ambiental, previa al establecimiento y desarrollo de las plantaciones forestales.

### **Objetivos específicos**

- Conocer el marco teórico y conceptual sobre los procesos hídricos en el suelo.
- Caracterizar las propiedades físicas del suelo dentro de un gradiente altitudinal dentro del PESM.
- Determinar la relación que existe entre las propiedades físicas de los suelos y su función para almacenar y conducir sus reservas de agua.
- Proponer un modelo generalizado de la aptitud hídrica del suelo dentro de la zona de estudio.

## Justificación

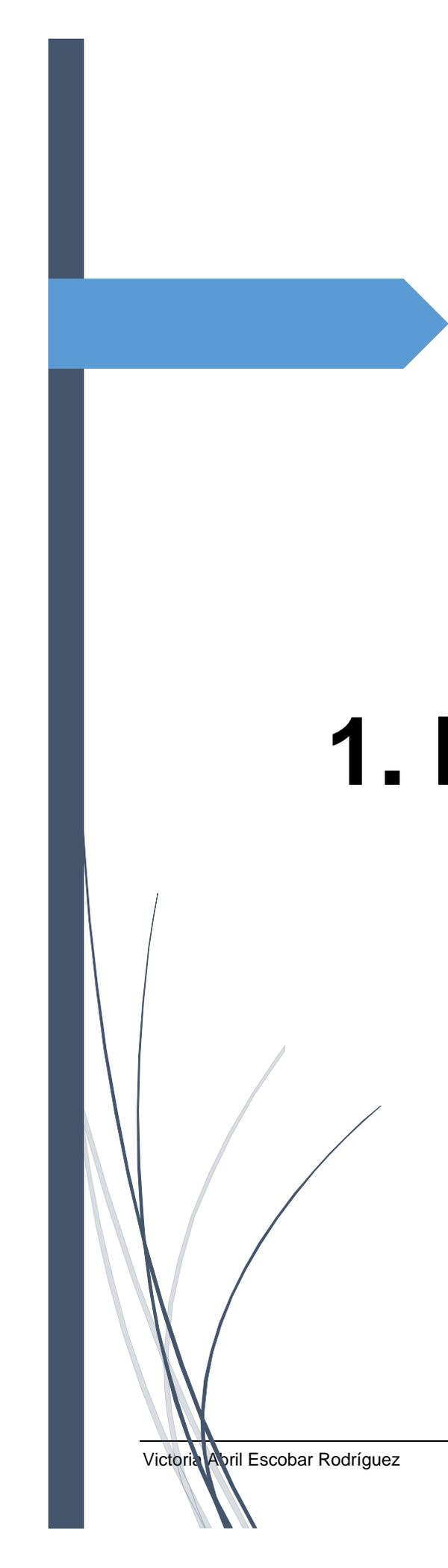
Las áreas verdes urbanas representan el principal espacio para la provisión de bienes y servicios ambientales de que disponen los centros urbanos, por lo que su cuidado, manejo y mejoramiento son prioritarios para su población. En la mayoría de las ciudades mexicanas con poblaciones superiores al millón de habitantes existe un déficit considerable en la disponibilidad de espacios verdes por habitante, y esta tendencia se incrementa al experimentar una reducción de los espacios verdes (ONU, 2016).

De acuerdo con (Torres Ariza et al., 2016), el Parque Estatal Sierra Morelos es considerado como el único lugar de equilibrio ecológico y de salud ambiental para la población del Valle de Toluca, sin embargo, no se han encontrado estudios físicos realizados con anterioridad que demuestren que este lugar cuenta con aptitud forestal suficiente para llevar a cabo forestaciones exitosas. Conocer el tipo de suelo de cierto lugar es indispensable para emprender cualquier programa de producción ya sea de carácter agrícola o forestal.

Esta investigación pretende contribuir con un análisis de los suelos en diferentes puntos del parque dando la oportunidad de conocer sus características físicas dentro de un transecto altitudinal, esto para tener un contexto más certero de la aptitud de los suelos para el desarrollo forestal.

El análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar los problemas que estén presentes en estos, pero también son importantes para conocer sus aptitudes.

Con los análisis de suelos se pretende determinar principalmente factores de tipo físico como el drenaje, textura, humedad, entre otros, que pudieran perjudicar y limitar el desarrollo de las plantaciones forestales dentro de la zona de estudio.



# 1. Marco teórico

## Capítulo I Marco teórico

En este capítulo se pretende abordar al marco teórico, esto con la finalidad de apoyar a la presente investigación, estudiando trabajos similares, cuyos aportes se consideren de importancia para la realización del presente trabajo; por otro lado, también se aborda una revisión documental donde se recopilan definiciones de diferentes autores para una mejor comprensión del trabajo.

### 1.1 Antecedentes

Existen diversos antecedentes enfocados en la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de sitios destinados a la restauración de cubiertas forestales, ejemplo de ello son los estudios realizados por ([Sánchez Corona et al., 2008](#)), quienes evaluaron las variaciones en las propiedades fisicoquímicas como respuesta al establecimiento de distintas actividades agropecuarias en Luvisoles de la Sierra Norte de Puebla, identificando la problemática de degradación del suelo que existe y que se acentúa en las zonas montañosas del país, en especial del caso de dicha zona de estudio.

La condición de degradación es ocasionada por el manejo agrícola en el que las prácticas de manejo han generado desestabilización y pérdida de la capa fértil del suelo. Para realizar este estudio se seleccionaron parcelas destinadas a diferentes actividades agrícolas, recolectando muestras de 0-10 cm, de 10-20 cm y de 20-30cm. Se efectuaron análisis físicos y químicos en campo y laboratorio, lo que permitió saber que los suelos con la mejor calidad son los de bosque primario y secundario por presentar texturas francas, mayor porcentaje de M.O. y porosidad y por lo tanto valores de densidad bajos.

Por su parte ([Sigala et al., 2015](#)), en su estudio denominado “Análisis de supervivencia para una reforestación con *Pinus pseudostrobus Lindl* en el sur de Nuevo León”, determinaron el efecto del sistema de producción y el pre-acondicionamiento en la supervivencia de plántulas de esta especie, estudiando las variables morfológicas de mayor influencia para la supervivencia de las

plántulas a fin de fijar patrones de selección de estas con una mejor respuesta en campo. La metodología usada en este trabajo se basó en el establecimiento de una reforestación de *Pinus*, cultivado bajo tres sistemas de producción en vivero. Los resultados mostraron grandes diferencias entre los sistemas de producción y en los niveles de pre-acondicionamiento, dependiendo del sistema de producción, así como de las condiciones del suelo.

De igual forma, (Gómez et al., 2014), evaluó las tasas de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del Río Shullcas. Su metodología consistió en seleccionar 31 puntos de muestreo al azar con ayuda de las herramientas de software ArcGIS, en los que se midió la infiltración empleando infiltrómetros de doble anillo. Se registraron los tipos de cobertura vegetal y se tomaron muestras de suelo para analizar sus contenidos de arcilla, arena, limo y humedad; asimismo se realizaron análisis de densidad aparente (DA) y porosidad en laboratorio. Los resultados obtenidos no identificaron diferencias estadísticas significativas entre la tasa de infiltración de tierras forestales y agrícolas, pero sí de éstas dos categorías con respecto a las tierras de pastoreo.

En otro estudio realizado por (Novillo Espinoza et al., 2018), se determinaron las propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas de Ecuador identificados como suelos de bosque nativo y monocultivos de maíz (30 años), cacao (50 años), pasto (4 años) y palma aceitera (26 años). La toma de muestras se realizó bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en diferentes profundidades en intervalos de 10 cm hasta los 60 cm de profundidad. Se evaluaron diferentes propiedades físicas y químicas.

Los resultados indicaron que los cultivos de maíz, palma aceitera y pasto provocaron incrementos estadísticos significativos en la DA, también hubo alta concentración de arcillas en las primeras profundidades de los suelos cultivados, que provocó susceptibilidad a los procesos de erosión hídrica, concluyendo que el suelo bajo cultivo de palma aceitera mostró mayores diferencias estadísticas debido a la textura, afectando negativamente la densidad aparente del suelo,

conductividad hidráulica, arcilla dispersa en agua, que en suma contribuyen a disminuir la estabilidad de agregados.

Por su parte ([Huaroc et al., 2014](#)), en su estudio denominado “Potencialidad de tierras y calidad de sitio con fines agroforestales en la microcuenca del río Vilca – Huancavelica”, realizaron una clasificación de tierras de acuerdo con su potencialidad y determinaron la calidad de sitio con fines agroforestales a partir del estudio y valoración de las propiedades del suelo. Para determinar la calidad de sitio se tomaron en cuenta factores climáticos, fisiográficos y edáficos. Los resultados expresan que, comparando el uso actual de las tierras versus su potencialidad, el 20 % del área cubierta corresponde a tierras sobre utilizadas; 0,27% a tierras subutilizadas; y, 79,5 % a tierras bien utilizadas.

Finalmente, como antecedentes directos con la presente investigación, se consultó el trabajo desarrollado por ([Flores Navarro, 2016](#)), cuyo objetivo consistió en realizar un diagnóstico de las características de los suelos bajo uso forestal y pecuario y establecer la relación con su capacidad de infiltración. La metodología consistió en seleccionar 3 sitios con uso pecuario y 3 con uso forestal, colectando 27 muestras para cada uso de suelo, a profundidades de 0-5 cm y de 5-25 cm, se realizaron análisis de densidad aparente, humedad, textura, compactación, conductividad hidráulica, pH y materia orgánica. Con los resultados obtenidos se observó que en los suelos pecuarios se tuvo menor tasa de infiltración con respecto a los suelos forestales, destacando la importancia de controlar el tiempo de pastoreo para evitar la compactación del suelo.

Bajo la perspectiva ofrecida por los estudios consultados, es clara la importancia que tienen los componentes y propiedades físicas del suelo sobre su capacidad para infiltrar y acumular agua, siendo esta función importante de considerar al momento de emprender acciones de introducción o reintroducción de cobertura vegetal.

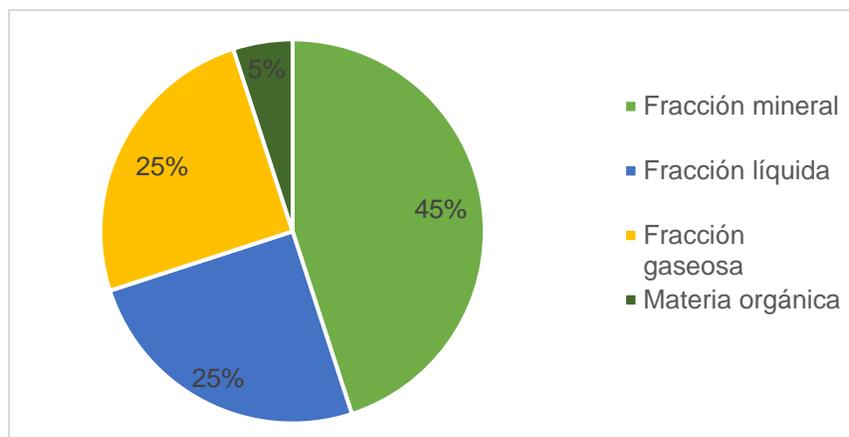
## 1.2 El concepto actual del suelo

Se han propuesto múltiples definiciones del suelo a lo largo de la historia expresando la importancia que ha tenido el suelo para la humanidad como fuente de alimentos, y proveedor de diferentes bienes y servicios, sin embargo, para este estudio se retomó la definición propuesta por (FAO, 2020) que establece su condición de “Un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua”. Adicionalmente, esta definición considera que el suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado de la interacción de dichos factores formadores, el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2020).

### 1.2.1 Los componentes del suelo

En su sentido más amplio, al suelo se le ha considerado como una mezcla de material mineral, materia orgánica, agua y aire. La composición gravimétrica del suelo resulta un elemento importante al considerar sus funciones y procesos. De acuerdo con (Porta et al., 1994), los valores promedio se muestran en la Figura 1.

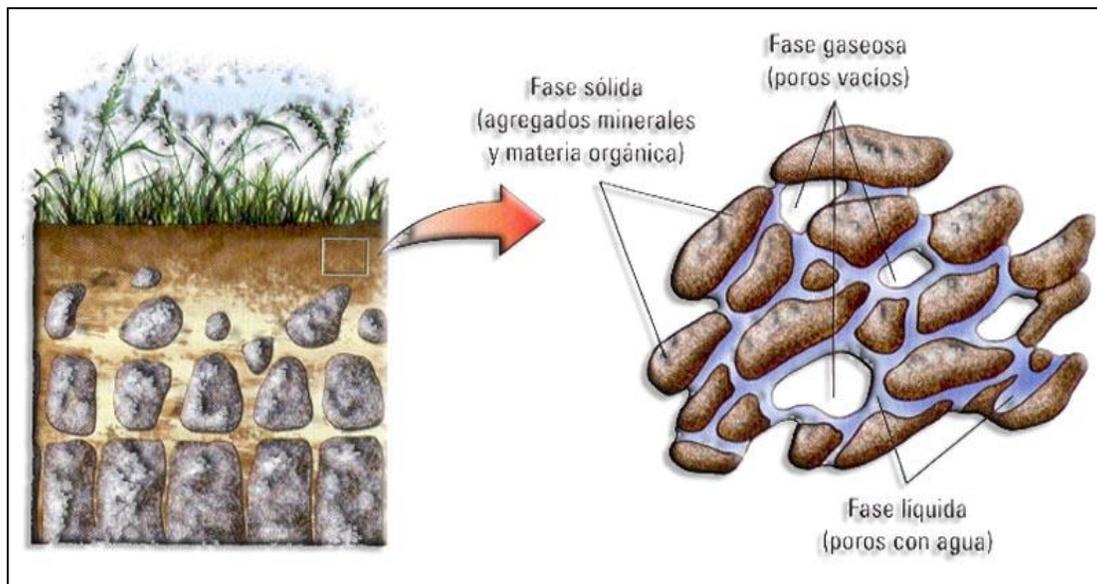
*Figura 1. Composición gravimétrica del suelo.*



*Fuente: (Porta et al., 1994).*

El volumen de agua y aire componen una relación directamente proporcional uno con el otro en tanto que la entrada del agua al suelo excluye al aire y en sentido contrario, al ser removida el agua por el drenaje, la evaporación o por las plantas en desarrollo, el espacio poroso es ocupado nuevamente por la fracción gaseosa (Figura 2). Las capas inferiores del suelo se caracterizan por poseer menores contenidos de materia orgánica y bajo la presión que ejercen las capas superiores, el espacio poroso tiende a reducirse y, en consecuencia, el flujo de agua y aire tiende a reducirse (Ortiz Villanueva et al., 1984). Si bien la mayoría de los suelos se ajustan relativamente bien a estos supuestos, las condiciones específicas en la composición de los materiales minerales, orgánicos y las prácticas de manejo pueden alterar las condiciones originales de un suelo propiciando un deterioro de su desempeño hídrico (Porta et al., 1994).

Figura 2. Representación de las fases dentro del suelo.



Fuente: (Biología del suelo, 2020).

A continuación, se presenta una explicación más amplia de las diferentes fases del suelo:

#### *Fase sólida del suelo*

Los principales constituyentes de la fase sólida son las especies minerales o inorgánicas y materia orgánica.

La fracción inorgánica corresponde a una mezcla de varios componentes primarios (cuarzo, feldespatos, etc.), y secundarios (arcillas silicatadas), variando su tamaño desde la arcilla hasta fragmentos de rocas. Determinan en relación con otros componentes, las propiedades físicas y físico química de los suelos. Además, constituyen una fuente de nutrientes ([Linares Forero, 2012](#)). El contenido de minerales y arcillas en un suelo determinará la superficie específica y la CIC del suelo, lo que a la vez tiene incidencia en la fertilidad y nos indicará tanto la génesis como el uso que podría dársele a dicho suelo ([Pereira Morales et al., 2011](#)).

#### *Materia orgánica del suelo*

La materia orgánica del suelo (MOS), es un conjunto complejo de sustancias constituidas por restos vegetales y de otros organismos que están sometidos a un constante proceso de transformación y síntesis. Normalmente se presenta en cantidades muy inferiores a la fracción mineral, no obstante, su papel es tan importante o más para la evolución y propiedades de los suelos. Los contenidos de MOS son muy variables y dependen de las condiciones climáticas (precipitación, temperatura, evapotranspiración), así como de los aportes de restos orgánicos provenientes de la biomasa terrestre. Valores usuales para la materia orgánica del horizonte superficial pueden fluctuar entre 0.5 y 10 % y tienden a disminuir progresivamente con la profundidad, sin embargo, esta condición puede variar considerablemente en función de los procesos formadores del suelo, así como de las prácticas de manejo ([Dorronsoro, 2020](#)).

La MOS tiene un impacto significativo sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. ([Ortiz Villanueva et al., 1984](#)), ([Porta et al., 1994](#)) y ([Graetz et al., 1997](#)) mencionan que el humus (materia orgánica altamente transformada), incide sobre las propiedades físicas del suelo al formar agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raicillas.

En cuanto a su efecto sobre las propiedades biológicas, la MOS favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal sirve de alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado. Como es citado en ([Julca Otiniano et al., 2006](#)).

#### *Fase líquida*

Esta fase es una solución acuosa que contiene sales disueltas en pequeñas cantidades en forma de iones, variable en cantidad y tiene la capacidad de disolver diferentes solutos, en una relación dinámica entre el agua y el suelo, produciendo reacciones químicas. Es la responsable del transporte de nutrientes desde varias partes del suelo hacia las raíces, y de proveer de agua a la planta. Los nutrientes transportados hacia la planta están en forma iónica que es como lo absorbe la planta por medio de las raíces. ([Linares Forero, 2012](#)).

A continuación, se partió de las ideas planteadas por ([Dorrnsoro, 2020](#)) para analizar los componentes presentes en la fase gaseosa del suelo:

### *Fase gaseosa*

Es la menos estudiada, debido a que cambia fácilmente y es muy difícil de muestrear y estudiar, sin embargo, es un componente muy importante para la respiración de los organismos y responsable de las reacciones de oxidación. Se sitúa en los poros del suelo, en ellos, las fases líquida y gaseosa están en mutua competencia, variando sus contenidos a lo largo del año en función del régimen hídrico local. Un suelo en capacidad hídrica máxima dispondrá de una fase gaseosa muy limitada, mientras que, en condiciones prolongadas de escasa precipitación, el espacio poroso tenderá a ser ocupado por aire, dando como consecuencia baja disponibilidad de agua para las plantas y microorganismos del suelo.

En condiciones ideales la fase atmosférica permite alojar volúmenes de oxígeno suficiente para la respiración de las raíces de las plantas y microorganismos que habitan el suelo; se admite que un porcentaje de aire del 10% es insuficiente. En la siguiente tabla (Tabla 1), presenta la composición promedio de la fase gaseosa.

*Tabla 1. Composición del aire del suelo*

	<b>Aire atmosférico (%)</b>	<b>Aire suelo (%)</b>
<b>Oxígeno</b>	21	10-20
<b>Nitrógeno</b>	78	78,5-80
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,03	0,2-3
<b>Vapor de agua</b>	variable	en saturación

*Fuente: (Dorronsoro, 2020).*

La composición del aire del suelo puede tener importantes variaciones locales debido a que las raíces de las plantas y la actividad microbiana modifican la composición del aire de los poros. En el suelo hay menos O<sub>2</sub> que en el aire y más CO<sub>2</sub>. El contenido en CO<sub>2</sub> del aire del suelo es a menudo varios cientos de veces más altos que los de la atmósfera. Esto se explica por todos los procesos que tienen

lugar en el suelo y que implican el consumo de  $O_2$  y el desprendimiento de  $CO_2$ , es decir aquellas reacciones en las que estén implicados todos los organismos del suelo: respiración de las plantas, actividad de microorganismos, procesos de mineralización y procesos de oxidación.

El aire del suelo está en continuo intercambio con el aire atmosférico y gracias a esta constante renovación la atmósfera del suelo no se vuelve irrespirable. Este movimiento puede realizarse por movimiento en masa o por difusión.

#### *Difusión de gases en el suelo*

La superficie del suelo actúa como una membrana permeable que permite el paso de los gases. Se intercambian selectivamente los gases del suelo con los de la atmósfera para tratar de equilibrar su composición. Así, cuando en el suelo aumenta el  $CO_2$ , se produce una difusión del  $CO_2$  a la atmósfera y si en el suelo disminuye el  $O_2$  se produce una difusión del  $O_2$  de la atmósfera al suelo. Es el factor principal en los intercambios de gases entre el suelo y el aire exterior y, por tanto, el causante principal de la renovación de la atmósfera del suelo. La difusión depende de cada tipo de gas y de la porosidad del suelo.

#### *Respiración del suelo*

La respiración del suelo se define como la producción total de  $CO_2$  por unidad de área y de tiempo. A mayor producción, más alta será la actividad biológica del suelo, pero hay que controlar la temperatura y la humedad.

La actividad biológica del suelo se encuentra condicionada por la disponibilidad de alimento, agua y oxígeno y a su vez la respiración de las raíces y de los microorganismos aerobios modifica la composición de este aire. Esta actividad provoca una disminución del  $O_2$  y un aumento del  $CO_2$  y tanto, la relación de concentración de estos será un buen parámetro de evaluación de la calidad de un suelo (Porta et al., 1994).

### 1.3 El agua en el suelo

La presencia de agua suficiente en el suelo es vital para el crecimiento de las plantas. La lluvia y los escurrimientos superficiales constituyen los aportes de agua al suelo, pero poco beneficiaría a las plantas si el suelo no es capaz de infiltrarla y almacenarla en cantidad y tiempo suficiente para el desarrollo vegetal. La capacidad del suelo para almacenar agua depende de su profundidad, textura, estructura y otras propiedades fundamentales (Thompson et al., 2002).

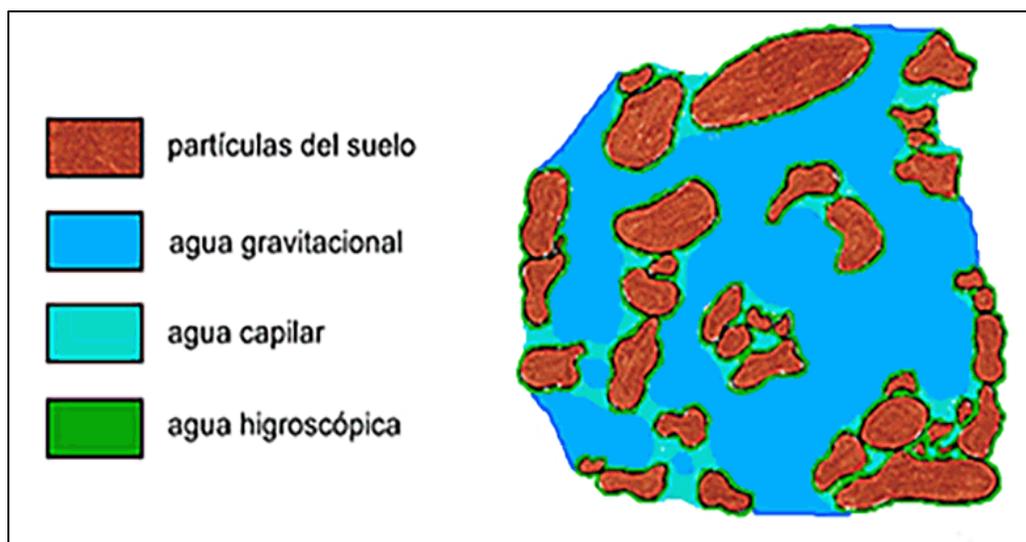
El agua es uno de los componentes más variables del suelo. Los diferentes suelos tienen distintas capacidades para la retención del agua. Cuando en un suelo hay abundante agua y no se drena, las raíces de las plantas pueden morir debido a la carencia de oxígeno, por el contrario, si la disponibilidad de agua es escasa, el crecimiento de las plantas se detiene y finalmente, sobreviene el marchitamiento (Ortiz Villanueva et al., 1984).

#### 1.3.1 Tipos de agua presente en el suelo

Aunque el agua en el suelo constituye un medio continuo, desde el punto de vista didáctico muchos autores admiten una serie de términos para el estudio del agua del suelo (Figura 3), los cuales se mencionan a continuación:

- Agua gravitacional. Esta forma de agua es llamada también agua de saturación, y se encuentra ocupando en todos los espacios porosos del suelo, así mismo se presenta después de efectuar un riego pesado o por la presencia de una lluvia intensa. Este tipo de agua se caracteriza por permanecer durante un tiempo relativamente corto, su movimiento es en sentido descendente por la acción de la gravedad, la falta de aireación ocasionada por exceso de agua afecta el desarrollo de los cultivos y por lo tanto a la producción (Cabrera Gonzalez, 1999).

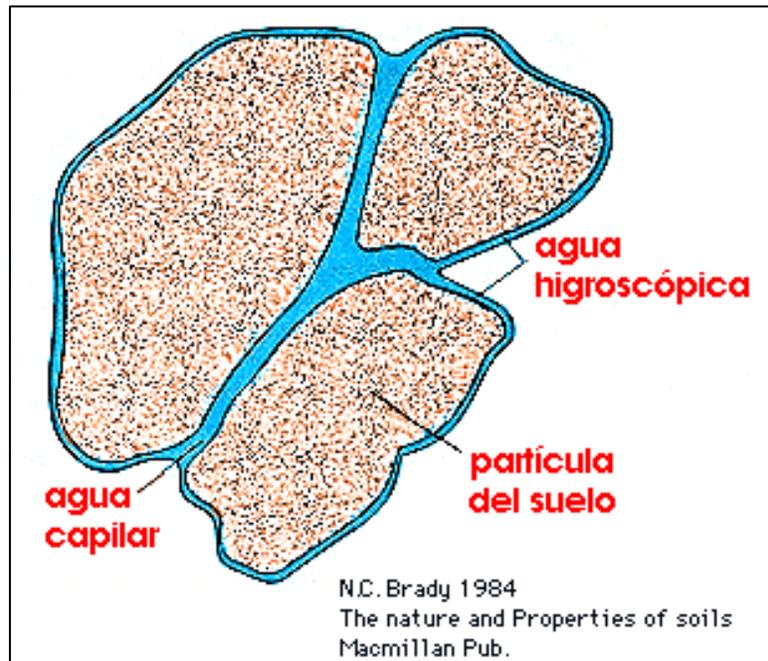
Figura 3. Tipos de Agua en el Suelo



Fuente: (Dorronsoro, 2020).

- Agua capilar. Este tipo de agua es la más importante desde el punto de vista agrícola y se considera como la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de la gravedad, esta se presenta después de que se ha drenado el exceso de agua en el suelo por efecto de la gravedad, alcanzando su Capacidad de Campo. El movimiento del agua en esta etapa es en forma ascendente debido a una diferencia de gradientes de presión a través de los espacios capilares del suelo, esta forma de agua abastece a las plantas para satisfacer sus necesidades hídricas durante todo su ciclo de cultivo. (Cabrera Gonzalez, 1999).
- Agua higroscópica. Absorbida directamente de la humedad atmosférica, forma una fina película de alrededor de 15 a 20 moléculas que recubre a las partículas del suelo por fuerzas de adsorción (Figura 4). No está sometida a movimiento, no es asimilable por las plantas (Dorronsoro, 2020).

Figura 4. Agua en el suelo.



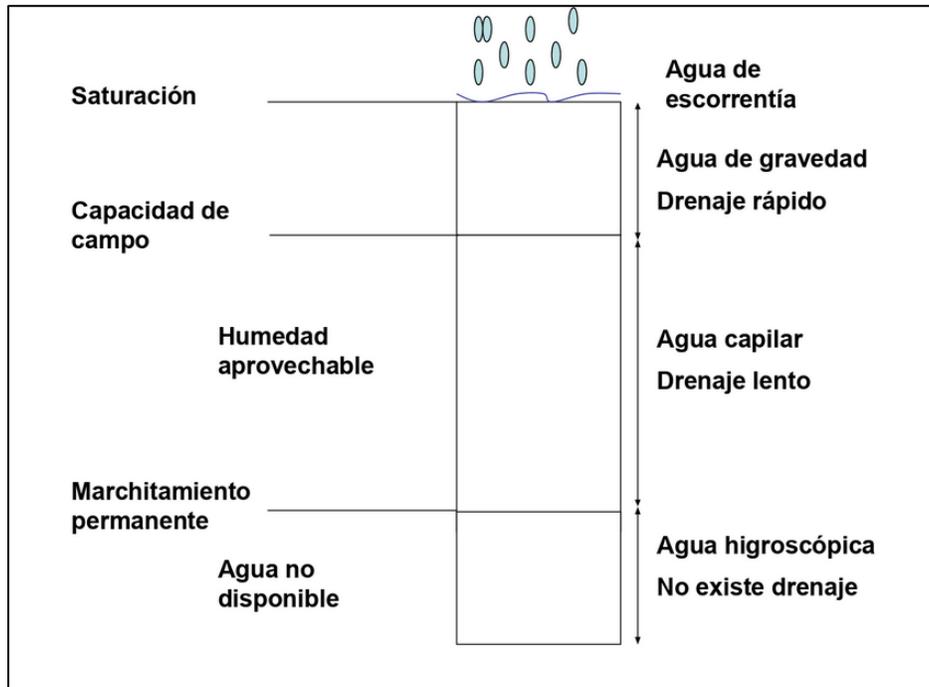
Fuente: (Dorronsoro, 2020).

Para efecto de evaluar los contenidos críticos del agua en el suelo se han definido diferentes conceptos en función del agua de la que pueden disponer o no las plantas (Figura 5), y son los siguientes:

- Capacidad de Campo: Contenido de humedad con el que queda el suelo luego de que sus macroporos han drenado completamente de agua gravitacional; se llega a esta condición de humedad luego de dejar drenar el suelo saturado entre 2 y 3 días. (Monico, 2020).
- Punto de marchitez permanente: A partir del cual la fuerza de succión de las plantas no puede vencer la fuerza con que es retenida el agua en el suelo, y por lo tanto se marchitan (Veenhuizen, 2021).

- Capacidad de retención de agua disponible o Agua aprovechable: Se refiere al contenido de agua que está disponible para uso de las plantas y que se define como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Quevedo Tejada, 2010).

Figura 5: Clases de Agua Disponible para los Vegetales y Características de Drenaje



Fuente: (Thorne y Peterson, 1965)

#### 1.4 Propiedades relacionadas con las funciones hídricas del suelo

La cantidad máxima de agua disponible que puede retener un suelo (o sea la capacidad de agua disponible) varía con la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la profundidad de enraizamiento y la estructura (Shaxson et al., 2005).

### *Drenaje*

El drenaje interno del suelo (Tabla 2), está referido a la evacuación de forma natural del exceso de agua en el interior del suelo. Se distinguen dos tipos de drenaje; siendo estos el drenaje superficial, que interesa a la capa de suelo propiamente dicha y el drenaje profundo, que interesa al sustrato, a veces muy profundamente, e influye directamente en la localización y capacidad de los acuíferos de agua subterránea (Pereira Morales et al., 2011). La clasificación del drenaje del suelo se puede inferir a partir de las siguientes propiedades:

*Tabla 2. Tipos de drenaje en los suelos.*

<b>Tipo de drenaje</b>	<b>Condiciones de drenaje</b>
<b>Libre</b>	No existe acumulación de agua en los primeros 80 cm, excepto durante los 4 primeros días tras una fuerte lluvia
<b>Moderado</b>	Encharcamiento por encima de los 60 cm durante un período inferior a un mes
<b>Imperfecto</b>	Encharcamiento a una profundidad menor de 60 cm de forma continua durante más de un mes
<b>Pobre</b>	Encharcamiento durante largos períodos. Incluso en la época seca
<b>Muy pobre</b>	Encharcamiento casi continuo

*Fuente: (Pereira Morales et al., 2011).*

### *Porosidad del Suelo*

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos (Tabla 3). En general el volumen del suelo está constituido en un 50% por materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de

espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y microporos donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas. (FAO, 2020).

(Hogson, 1985), definió cinco clases de porosidad en los suelos, considerando los poros menores de 60  $\mu\text{m}$  y el % del volumen del suelo ocupado.

*Tabla 3. Clasificación de la porosidad del suelo*

Clase	% ocupado por poros
Muy débilmente poroso	<5,0
Débilmente poroso	5,0 - 9,9
Moderadamente poroso	10,0 - 14,9
Muy poroso	15,0 - 20,0
Extremadamente poroso	>20,0

*Fuente: (Hogson, 1985).*

### *Densidad aparente*

La densidad aparente del suelo (DA), se refiere al peso que tiene este sobre un volumen determinado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Esta propiedad de relativamente fácil obtención en campo o laboratorio tiene múltiples aplicaciones como por ejemplo la determinación del espacio poroso, la estimación de la reserva de nutrientes y el grado de compactación de un suelo. En general, cuanto mayor sea la densidad, menor el espacio poroso para el movimiento del agua y aire, así como el crecimiento y penetración de raíces y en consecuencia el desarrollo vegetal (USDA, 1999).

Cuando la DA aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces. La DA es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo (MO). A medida que aumenta la MO y el espacio poroso, disminuye la DA y viceversa. En suelos de textura fina la DA varía entre 1 y 1,2 g.cm<sup>-3</sup>, mientras que en suelos arenosos es mayor y puede variar entre 1.2 y 1.6 g.cm<sup>-3</sup> (Salamanca Jiménez et al., 2005).

### *Textura del suelo*

La textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. Es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades (FAO, 2020). La clasificación textural se basa en la granulometría de las partículas del suelo, caracterizándolas genéricamente en tres grandes fracciones: arcillas, limos y arenas (Ortiz Villanueva et al., 1984). La combinación de estas tres categorías da como resultado clases texturales intermedias con la denominación de suelos francos, franco arenosos, franco limosos o franco arcillosos, de acuerdo con la proporción de los componentes básicos (Tabla 4).

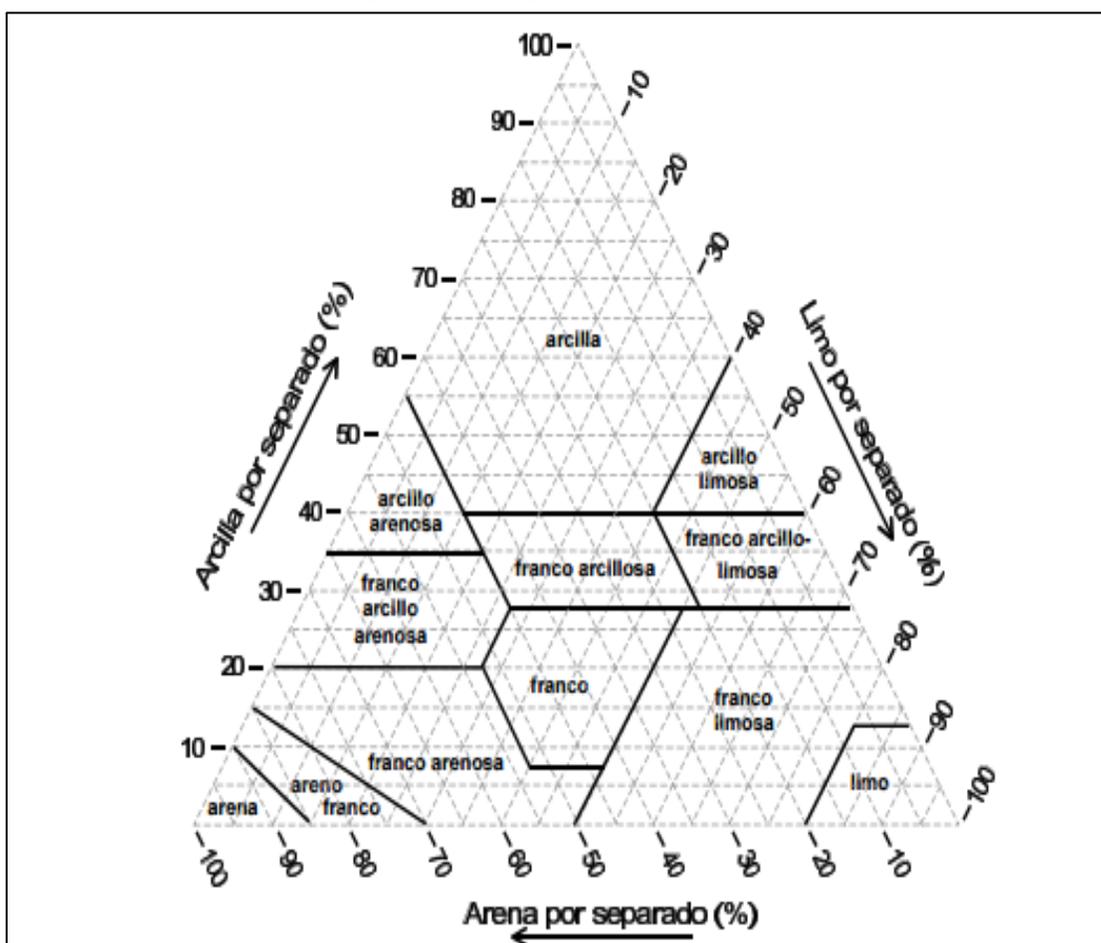
*Tabla 4. Clases texturales del suelo de acuerdo con los sistemas americano e internacional*

Fracciones	Límites de los diámetros en mm	
	Clasificación americana	Clasificación internacional
Arena muy gruesa	2.0 - 1.0	
Arena gruesa	1.0 - 0.5	2.0 - 0.20
Arena media	0.5 - 0.25	
Arena fina	0.25 - 0.10	0.20 - 0.02
Arena muy fina	0.10 - 0.05	
Limo	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
Arcilla	Menos de 0.002	Menos de 0.002

Fuente: (Ortiz Villanueva et al., 1984)

Cada nombre textural corresponde a una clase y especifica que el porcentaje en peso de cada fracción se localiza entre ciertos límites definidos. Una vez especificados los porcentajes de arena, limo y arcilla, los nombres texturales correspondientes pueden determinarse a partir del triángulo textural presentado en la Figura 6. El triángulo se halla dividido en 12 áreas que contienen todas las proporciones posibles de arena, limo y arcilla. (Thompson et al., 2002).

Figura 6. Triángulo de texturas.



Fuente: (Suelos, Ecología y Agricultura, 2016).

### *Estructura del Suelo*

Las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y a unidades de mayor tamaño, también denominados “peds”. La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión (FAO, 2020). Existen diferentes formas de agregación y estructura del suelo como pueden ser la de bloques, angulares y subangulares, prismática, de migajón, etc.

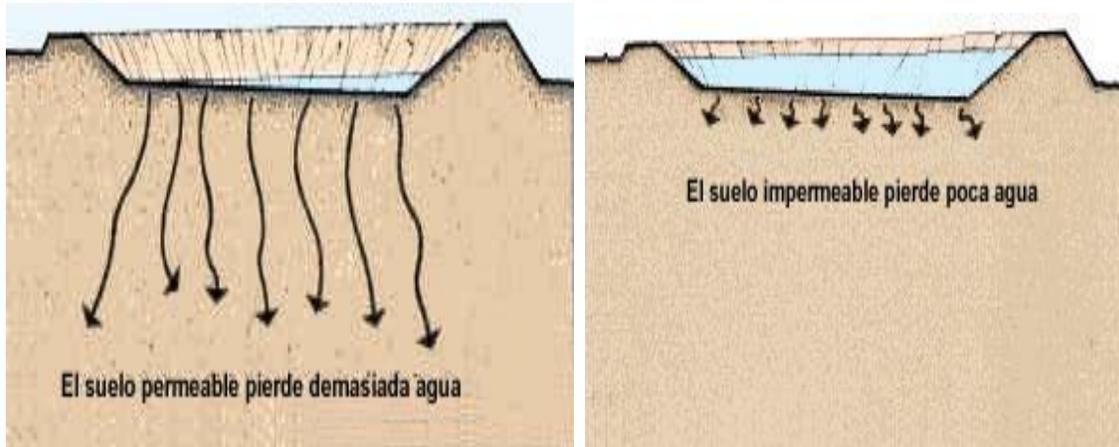
### *Conductividad hidráulica*

Es un parámetro que indica la facilidad con la que los poros del suelo permiten el movimiento del agua y es dependiente de la porosidad, permeabilidad y grado de saturación presente, teniendo relación directamente proporcional con la porosidad (Novillo Espinoza et al., 2018).

### *Permeabilidad*

Permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración (FAO, 2020). La permeabilidad (Figuras 7 y 8), se mide en términos de la velocidad del paso de agua a través de una unidad de sección transversal de suelo saturado de humedad en una unidad de tiempo (Pereira Morales et al., 2011).

Figuras 7 y 8. Condiciones de permeabilidad en el suelo



Fuente: (FAO, 2020).

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo (Tablas 5 y 6), y también influyen en su permeabilidad (FAO, 2020). Por regla general, como se muestra a continuación, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad:

Tabla 4. Permeabilidad del suelo de acuerdo con su textura

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

Fuente: (FAO, 2020).

Ejemplo:

Tabla 5. Relación entre la permeabilidad y la clase textural

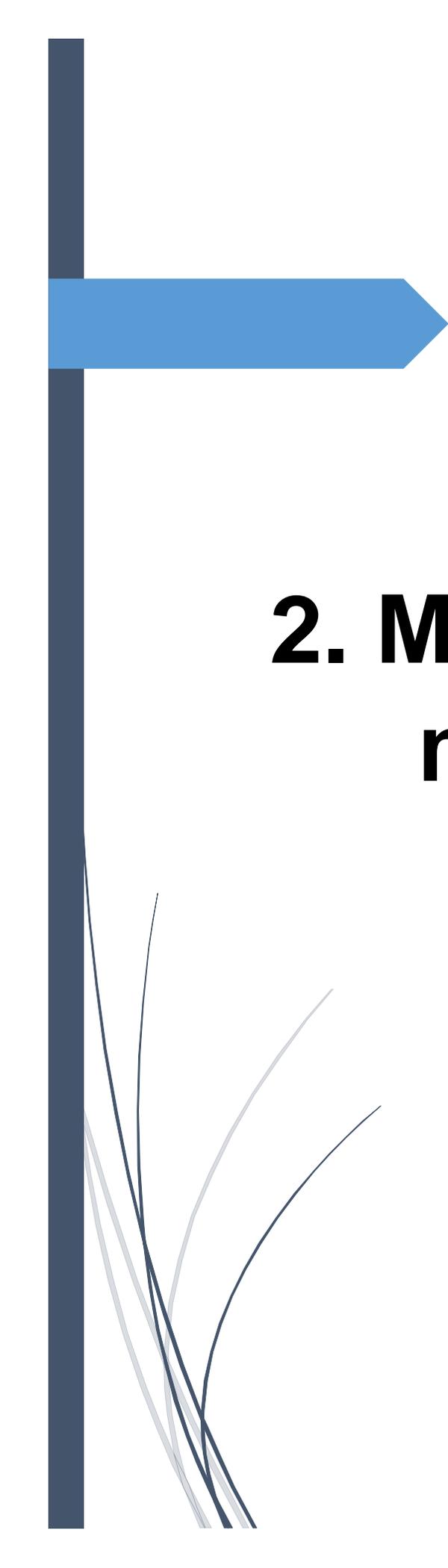
Clase textural	Permeabilidad (cm/h)
<b>Arenosa</b>	5.0
<b>Franco arenosa</b>	2.5
<b>Franca</b>	1.3
<b>Franco arcillosa</b>	0.8
<b>Arcilloso limosa</b>	0.25
<b>Arcillosa</b>	0.05

Fuente: (FAO, 2020).

### Flujo de agua

Existen dos tipos de movimientos en el agua dentro del suelo:

- **Flujo saturado.** Se produce en los poros completamente saturados, especialmente en épocas de lluvia cuando el perfil de suelo queda completamente lleno de agua (Monico, 2020). Puede generarse en el suelo después de una lluvia, riego o en suelos con mal drenaje y con una condición de saturación permanente. Bajo estas condiciones, el movimiento del líquido puede generarse en una dirección vertical y/o horizontal
- **Flujo no saturado.** producido en los poros más grandes cuando están llenos de agua y en los más pequeños que la retienen y transmiten y se rige por La Ley De Jourin. La fuerza motriz del flujo insaturado es el potencial matricial, no la gravedad. (Monico, 2020).



## **2. Material y métodos**

## Capítulo II. Material y métodos

En este apartado se presenta una descripción de los aspectos físicos del área de estudio, la cual ayudará a una mejor asimilación del entorno de la zona, igualmente se especifica la metodología empleada, así como la serie de actividades que se llevaron a cabo para el desarrollo de la presente investigación de modo más específico.

### 2.1 Descripción del área de estudio

#### 2.1.1 Localización

*Figura 9. Localización del sitio de estudio.*



Fuente: (Google Earth Pro, 2021)

La zona de estudio (Figura 9), se localiza entre los municipios de Toluca y Zinacantepec, Estado de México, ocupando una superficie de 1,255.09 ha, y comprendiendo las localidades de Pueblo Nuevo, Tecaxic, Calixtlahuaca, San Marcos Yachihuacaltepec, Santiago Tlaxomulco, Santa Cruz Atzapozaltongo, Tres Caminos, Rancho La Mora, Lomas Altas, Zopilocalco, San Luis Obispo, San Miguel

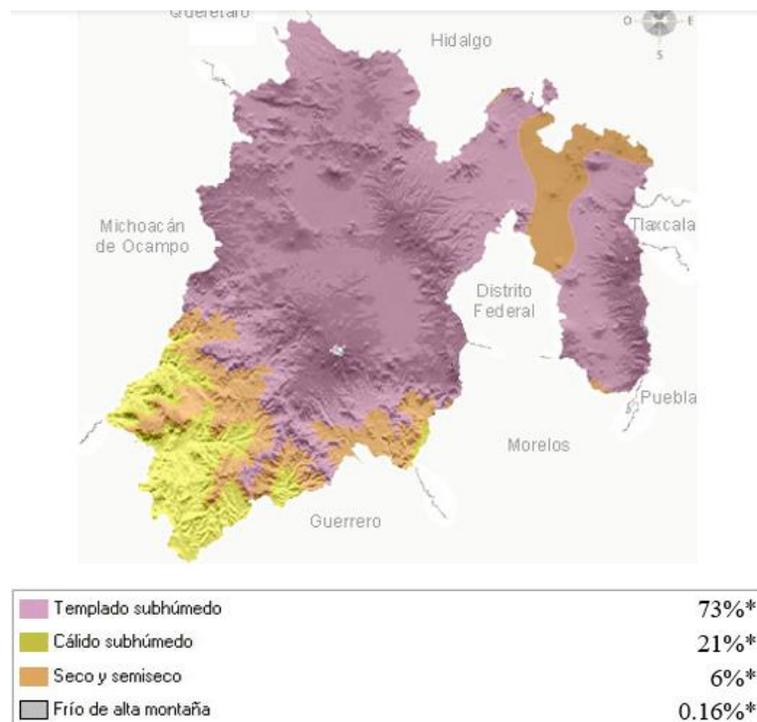
Apinahuixco, La Teresona, San Mateo Oxtotitlán, Rancho Patitos, San Luis Mextepec, pertenecientes al municipio de Toluca, y Rancho San Nicolas al municipio de Zinacantepec. (Sánchez Galindo , 2005).

### 2.1.2 Clima

El área donde se encuentra el parque predomina el clima templado subhúmedo C (w2) (Figuras 10 y 11). La temperatura media anual es de 14.7°C, las temperaturas más bajas se presentan en los meses de enero y febrero son alrededor de 3.0°C. La temperatura máxima promedio se presentan en abril y mayo es alrededor de 25°C.

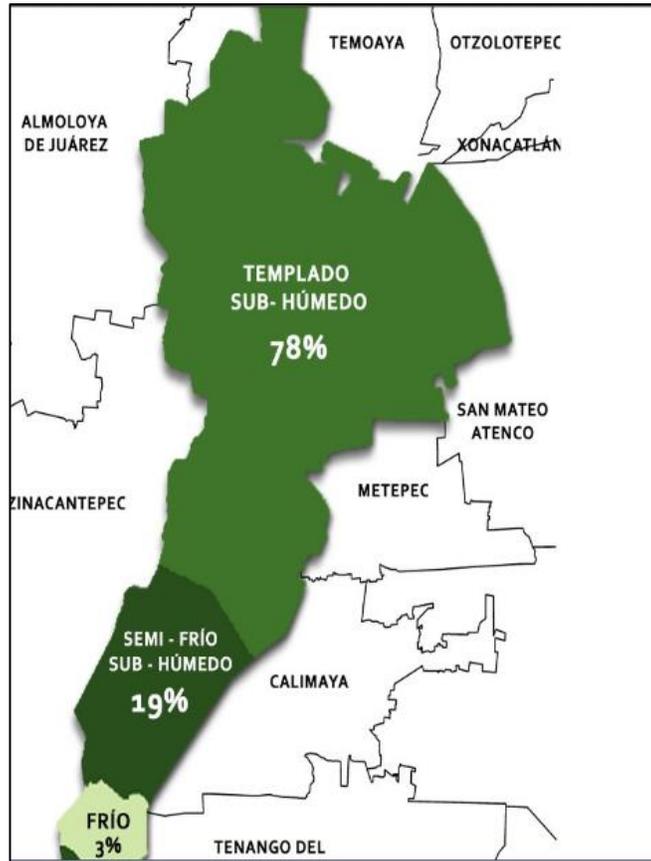
Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 900 mm anuales (INEGI, 2020).

Figura 10. Climas del Estado de México.



Fuente: (INEGI, 2020)

Figura 11. Clima del Municipio de Toluca.



Fuente: (GEM, 2018).

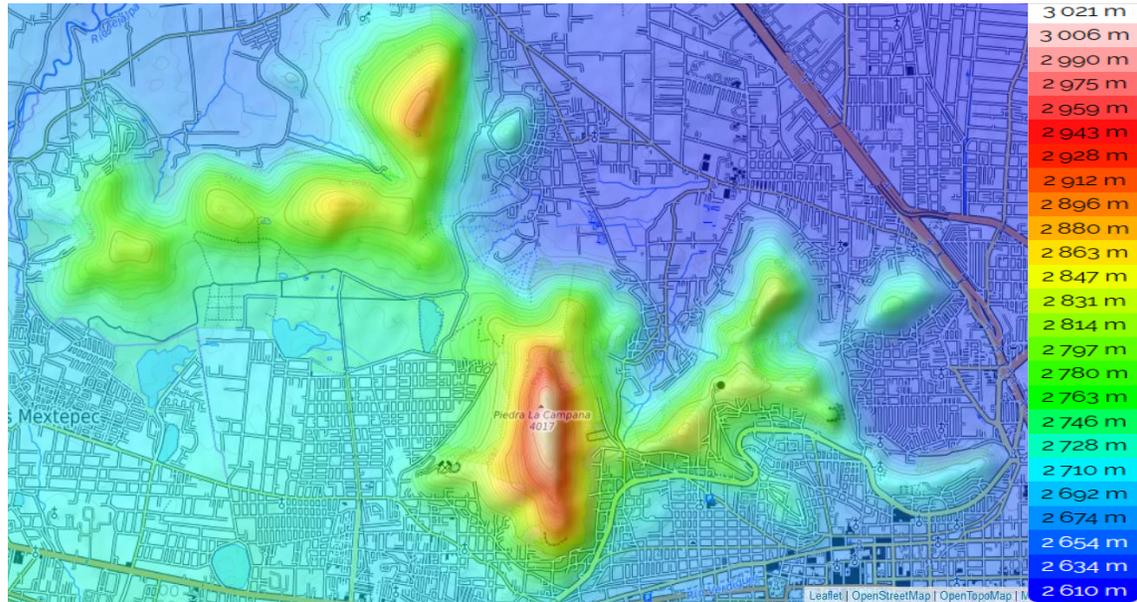
### 2.1.3 Topografía

El Parque Estatal Sierra Morelos constituye una zona conformada por lomeríos (Figura 12), sin embargo, algunas de sus elevaciones como el caso del cerro La Teresona, alcanza los 490 m d altura (3040 msnm). Otros cerros importantes por su altura son el Santiago con 330 m y Tenizmo con 380 m, los cuales muestran pendientes de 45° y más, formando algunos escarpes verticales de 90° en todas sus laderas.

Por otro lado, los cerros Tecaxic, Las Canoas, El Tejocotal, De En medio, Tenizmo, San Marcos, Agua Bendita, Toloche, Panzon y Huitzila muestran elevaciones más

bajas, sus pendientes se pueden considerar moderadas, de 15° a 30°, y conforme se desciende hacia la llanura se tornan suaves de 6° a 15° (Sierra Dominguez, 2005).

Figura 12. Mapa topográfico Parque Estatal Sierra Morelos (Altitud).



Fuente: (Topographic-map.com, 2021)

#### 2.1.4 Hidrología

El área de estudio pertenece a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), la cual pertenece en su totalidad a la región hidrológica Lerma-Chápala-Santiago (SEMARNAT, 2021); dicho territorio se encuentra en la zona elevada, donde tiene sus fuentes el cercano río Lerma, y se encuentra surcado por las corrientes que descienden desde los glaciares del Nevado de Toluca hacia el valle, siendo el principal el río Verdiguél, que atraviesa la ciudad de Toluca y desemboca en el río Lerma. Todos los escurrimientos del Nevado llegan a dos de las cuencas más importantes del país, las de los ríos Lerma y Balsas. (GEM, 2018).

En la Sierra Morelos las andesitas muestran diaclasamientos verticales sobre brechas volcánicas, lo que origina abundantes filtraciones en los municipios de Toluca y Zinacantepec, municipios que comprende la zona de estudio. (SEMARNAT, 2021).

*Figura 13. Cuerpo de agua del sitio de estudio.*



*Fuente: (CEPANAF, 2021)*

### 2.1.5 Geomorfología

El Parque Estatal Sierra Morelos, se encuentra localizado en la Sierra Morelos o Calixtlahuaca, por lo que se encuentra constituida por lavas andesíticas y dacíticas principalmente. Las laderas de dicha estructura son abruptas principalmente debido al fuerte control estructural; al oriente de la sierra se identifica una estructura semicircular en forma de herradura, definida por Fonseca (1999), como caldera

Morelos. Alrededor de esta unidad se identifican conos volcánicos aislados que corresponden al cuaternario; Elías (1993), le asigna una edad miocénica (SEMARNAT, 2021).

*Figura 14. Ladera del Cerro La Teresona.*



*Fuente: (Sánchez Galindo , 2005)*

#### 2.1.6 Edafología

Con base a la carta edafológica 1:50,000 (DETENAL, 1976), se observan suelos Feozem con textura media como unidad edáfica sobre la planicie de inundación que se encuentra hacia el oeste del Parque, al Sur de los C. De Enmedio, Los Tejocotes y Las Canoas; y cuya fase física de dicho suelo se caracteriza por tener roca continua entre 50 y 100 cm de profundidad (Lítica profunda) (INEGI, 2001). En la planicie aluvial en el norte y este de la sierra, correspondiente a la planicie del Valle de Toluca se tiene con una textura media Feozem haplico como suelo dominante y

Vertisol pelico como secundario. Al noroeste y este del parque en las laderas de los volcanes Las canoas y Tecaxic, así como al este de los cerros Tenizmo y de En medio se observan unidades edáficas de Leptosol como suelo dominante con Feozem haplico como secundario, de igual forma con una textura media (Figura 15).

*Figura 15. Muestras de suelo extraídas del sitio de estudio.*



*Fuente: Toma propia.*

### 2.1.7 Vegetación

En la actualidad se puede encontrar gran diversidad vegetal dentro de los límites del área de estudio, como lo son principalmente bosques de oyamel (*Abies religiosa*), los bosques de pino (*Pinus sp*), bosques de pino-encino (*Pinus y Quercus sp*) con fuerte presencia de elementos de bosque mesófilo de montaña, relictos de selva mediana subcaducifolia, selva baja caducifolia, vegetación acuática y subacuática y vegetación secundaria con pastizal inducido (CEPANAF, 2017).

*Figura 16. Cola de zorra (Cortaderia Selloana)*



*Fuente: (Sánchez Galindo , 2005)*

### 2.1.8 Fauna

A la fecha se han encontrado 10 familias de vertebrados con 14 especies; 16 familias de aves con 40 especies que incluyen las migratorias; cinco familias de

reptiles con seis especies; dos familias de anfibios con una especie cada una; una de crustáceos y otra de artrópodos.

Por otro lado en cuanto a fauna silvestre, se han hallado, conejos (*Sylvilagus floridanus*), ratón de campo (*Apodemus sylvaticus*), murciélago (*Mormoops megalophylla*), ardilla (*Sciurus aureogaster*), carpintero (*Melanerpes auritrono*), cernícalo (*Falco sparverius*), lechuza (*Tyto alba*), colibrí (*Selasphorus platycercus*), gorrión (*Carpodacus mexicanus*), garza (*Bubulcus ibis*), pato (*Anas acuta*), cerceta (*Anas cyanoptera*), camaleón (*Phrynosoma sp.*), víbora de cascabel (*Crotalus*) , y culebra (*Thamnophis eques*) (CEPANAF, 2017).

Figura 17. Gorrión cejas blancas (*Spizella passerina*)



Fuente: ( iNaturalist, 2021)

## 2.2. Caracterización socio económica

A continuación, se realiza un análisis general de la forma en la que se encuentra dividida la tenencia de la tierra dentro de los límites del parque, a partir del trabajo planteado por [Sierra Domínguez et al. \(2005\)](#) y [\(2018\)](#).

### 2.2.1 Tenencia de la tierra

El decreto del Parque Estatal Sierra Morelos estipula diferentes tipos de tenencia de la tierra (Tabla 7): particular que es la de mayor extensión, comunal, ejidal, de los gobiernos estatal y municipal. Por lo mismo, el hecho de que la mayor superficie del PESM no es de propiedad gubernamental obliga a convenir con los dueños de los terrenos para la aplicación de cualquier programa, incluida la reforestación.

*Tabla 7. Tenencia de la tierra en el Parque Estatal Sierra Morelos*

Tipo de propiedad	Superficie (ha)	Cobertura %
Ejidal	196	16
Comunal	230	18
Privada	521	42
Sector público (estatal y municipal)	308	24
Total	1 255	100

*Fuente: (Sierra Domínguez, 2005).*

A continuación, se presenta un mapa elaborado por (Figura 18), en el que se muestra espacialmente la compleja delimitación de la tenencia de la propiedad en el PESM, con lo cual se ejemplifica la dificultad para concertar estrategias y políticas

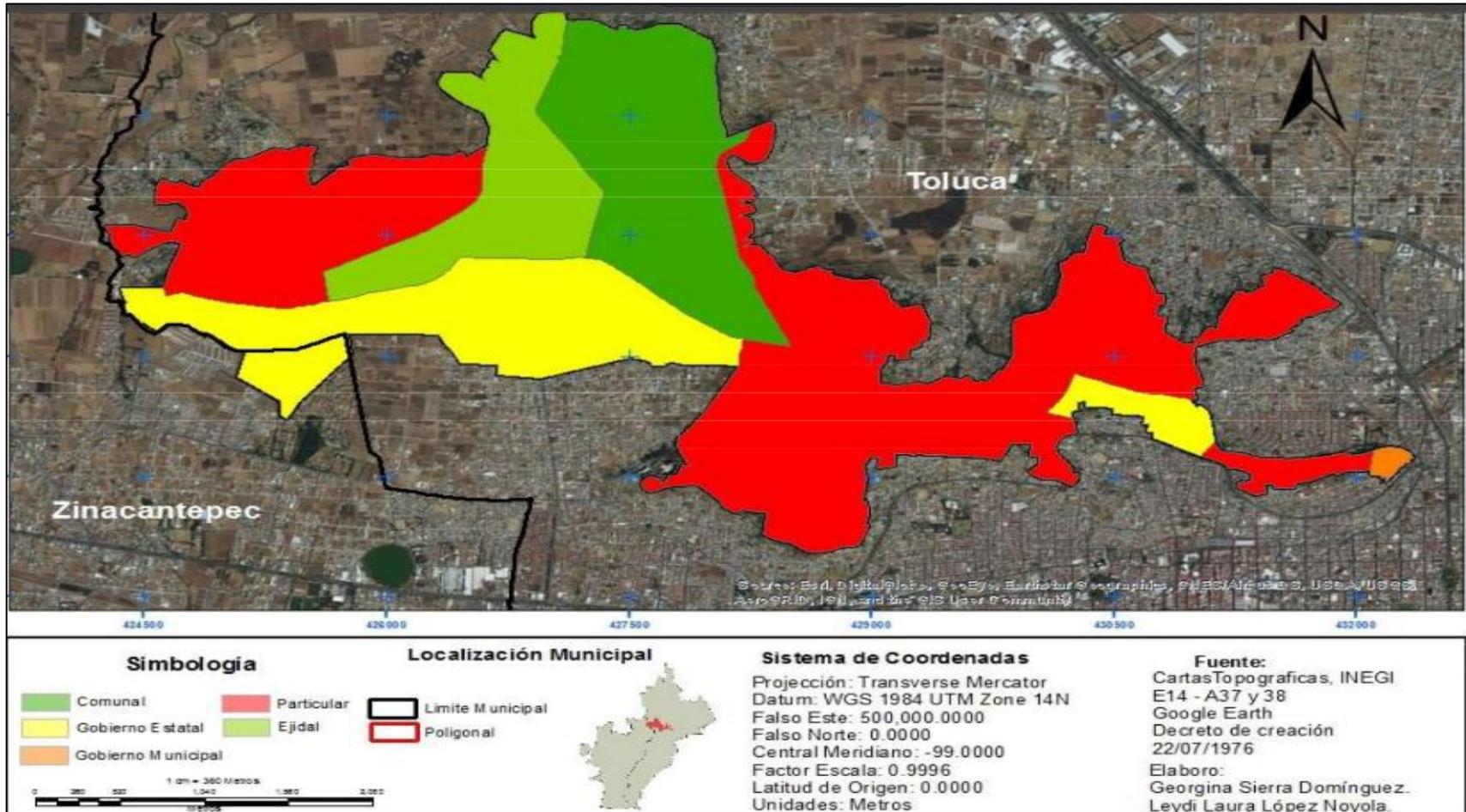
públicas de dicho espacio, condición de suma importancia al momento de realizar la evaluación sobre su manejo y desempeño ambiental.

De acuerdo con los mismos autores, se obtiene que, en el año de 1976 al decretarse el parque, 79 dueños de casas habitación y 136 dueños de terrenos negaron su reubicación por lo que se les expidió una carta de excepción con la cual se aceptaba su permanencia dentro del área. La superficie ocupada hasta ese momento fue de aproximadamente 12.65 ha cuyas construcciones insertas en el parque se encontraban aisladas unas de otras y su característica principal era que junto a ellas contaban con terrazas de cultivo; en esos momentos la infraestructura urbana era rudimentaria, sin embargo, esa situación cambio en el año 2000, cuando la superficie ocupada por casas aumentó al igual que su densidad, eliminándose terrenos de traspatio, con un aumento de superficie pavimentada y siendo ahora una mancha urbana más homogénea y dotada con los servicios públicos básicos.

A 40 años del decreto del PESM, el crecimiento urbano en las localidades aledañas al parque y de la ciudad de Toluca ha ido en aumento, ya que se ha expandido en las zonas montañosas de algunos de los barrios considerados en dicho decreto como son La Teresona, San Miguel Apipinahuisco, San Luis Obispo, Toloche, La Mora y Santiago Miltepec. La distribución de estos poblados no es homogénea, observándose que las laderas con población concentrada se ubican en las elevaciones que tienen vista a la Ciudad de Toluca, como La Teresona, Agua Bendita y Toloche.

La administración del PESM está a cargo de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México, a través de la CEPANAF. La gestión recae en un administrador y 16 guarda parques encargados de los actuales programas de reforestación, vigilancia, prevención y combate de plagas e incendios y, construcción y mantenimiento de obras.

Figura 18. Mapa de Tenencia de la Tierra dentro del Parque.



Fuente: (Sierra Domínguez et al., 2018)

Los programas que se aplican de manera permanente son:

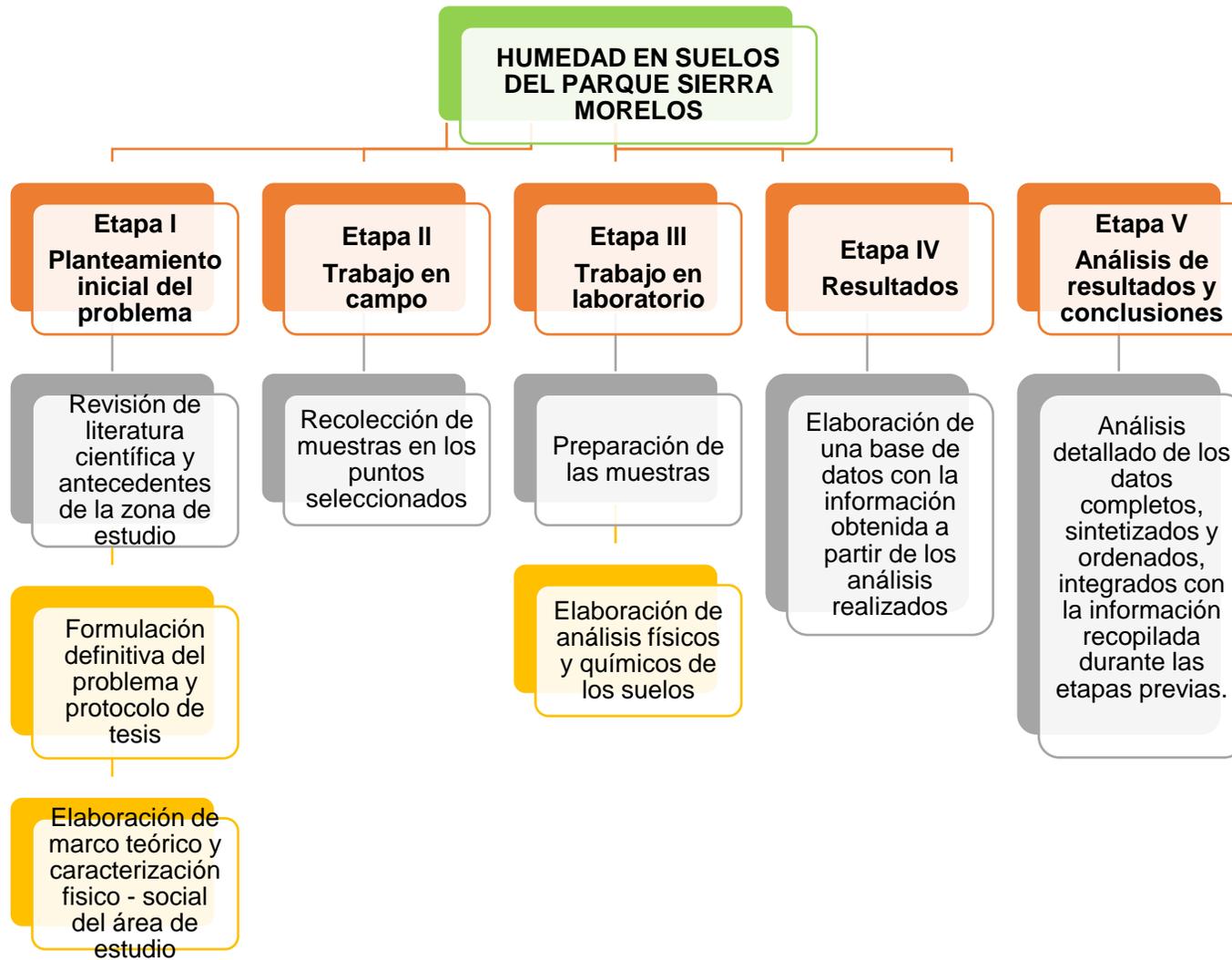
- Reforestación: se realiza anualmente en la época de verano.
- Vigilancia: se centra en el área de servicio, pero también habiendo recorridos en el resto de la poligonal
- Prevención y combate de plagas e incendios: se efectúan quemas controladas en la época de estiaje y limpieas de saneamiento
- Construcción y mantenimiento de obras: se busca limpiar los servicios infraestructura en el área destinada para ello.

### **2.3 Metodología**

La metodología seguida en esta investigación implica la integración de métodos deductivos inductivos, iniciando con la búsqueda de información procedente de diversas fuentes, su análisis e interpretación que fueron necesarias para plantear las siguientes etapas que involucraron la planeación y ejecución de trabajo de campo y laboratorio para finalmente, integrar los hallazgos obtenidos de acuerdo con los objetivos previstos.

En este apartado se abordará la metodología aplicada para la recolección de la información necesaria para el desarrollo de la presente tesis; se especificarán los métodos empleados para la obtención de los resultados de cada una de las propiedades analizadas en laboratorio. El esquema completo del proceso de investigación se ilustra en la Figura 19, que a continuación se muestra.

Figura 19. Metodología de la investigación



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe de forma individual cada una de las etapas realizadas a lo largo de la elaboración de la tesis.

## **Etapas 1**

### **Planteamiento inicial del problema**

Se partió de la búsqueda del problema principal al que se enfocaría el presente trabajo, encontrándose que existe una baja eficiencia en las campañas de reforestación realizadas dentro del PESM, focalizada en las zonas bajas de la microcuenca, lo que podría deberse a condiciones restrictivas en el suelo; posterior a esto se procedió a buscar información documental referente al que sería el tema de estudio, así mismo se revisaron los antecedentes documentados de estudios relacionados con el PESM, ubicado en el municipio de Toluca de Lerdo, Estado de México. Esta búsqueda se realizó con fuentes diversas como algunas tesis, artículos de noticias, artículos científicos, así como de revistas científicas.

Una vez ya con un panorama más amplio del tema que se estaría trabajando, así como del lugar en el que se desarrollaría el estudio se condujo a la construcción del protocolo de tesis, y posteriormente la elaboración del marco teórico, como de la caracterización física y social del parque.

## **Etapas 2**

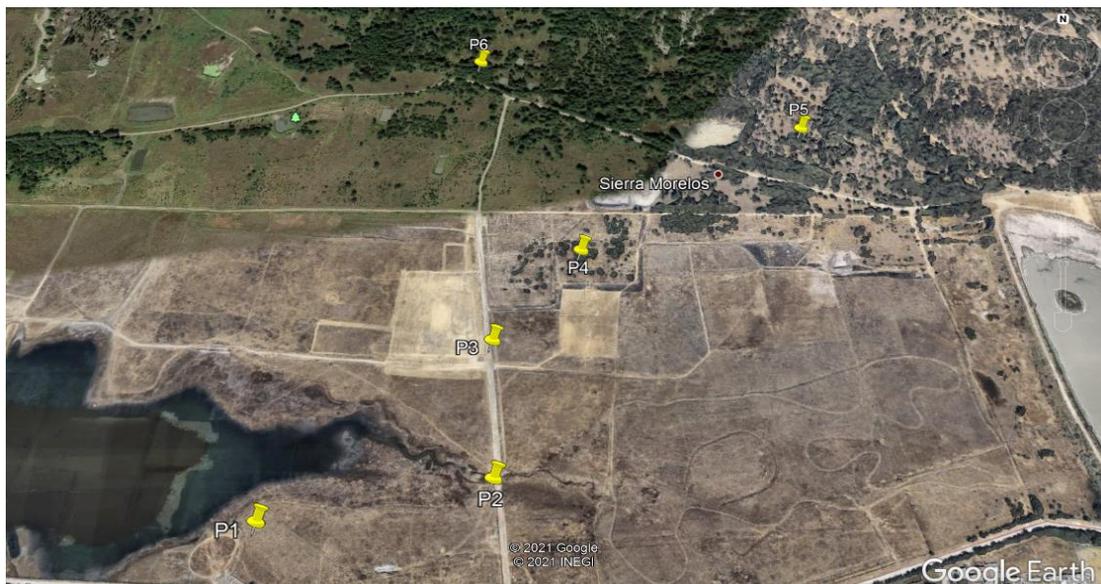
### **Trabajo en campo**

Mediante el análisis espacial de imágenes satelitales de la plataforma Google Earth (Figura 18), así como un recorrido preliminar en campo, se estableció un transecto de sur a norte del PESM en el que se identificaron diferentes condiciones de pendiente y cobertura vegetal, seleccionándose seis puntos para su posterior caracterización y muestreo (Ver Tabla 8).

En un segundo recorrido al PESM se procedió a recolectar las muestras de suelo con ayuda de una barrena. El diseño de recolección de los suelos fue en forma de "T", donde de cada punto se extrajo una muestra de suelo de aproximadamente 1 kg con dos repeticiones ( $n= 3$ ), con la finalidad de obtener datos de cada punto y

variable con una media estadística. Las extracciones se realizaron a una profundidad de 0 cm a 30 cm, y de 30 cm a 60 cm cada una, y a una distancia de 10 metros entre las mismas (Figura 20).

*Figura 20. Ubicación de los puntos de muestreo en el PESM.*



*Fuente: Elaboración propia con base a Google Earth.*

Tabla 8. Ubicación y características de los puntos de muestreo

Sitio	Coordenadas UTM		Altitud msnm	Pendiente (grados)	Uso de suelo/ vegetación
	X	Y			
1	426,696	2,134,981	2714	0 – 0.5	Pastizal asociado a reforestación
2	426,936	2,135,030	2713	0 – 0.5	Pastizal
3	426,929	2,135,207	2716	0.5 – 1.0	Pastizal asociado a reforestación
4	427,033	2,135,340	2730	0.5 – 2.0	Reforestación asociada con pastizal
5	427,328	2,135,541	2747	2.0 – 5.0	Reforestación
6	426,898	2,135,675	2738	2.0 – 5.0	Reforestación

Fuente: Elaboración propia

En campo se tomaron datos de porcentaje de humedad de los suelos y posterior a esto las muestras se etiquetaron y trasladaron a laboratorio para su preparación y análisis. De manera paralela se registraron las características ambientales de cada punto de muestreo como fueron su uso de suelo, tipo de vegetación, pendiente, altitud y orientación.

*Figura 21. Extracción de las muestras de suelo.*



*Fuente: Toma propia.*

### **Etapa 3**

#### **Trabajo en laboratorio**

En la tercera etapa del trabajo se procedió a preparar las muestras extraídas en campo, estas se extendieron sobre papel periódico y se dejaron secar a temperatura ambiente, posterior a su secado se trituraron con ayuda de un mazo de madera y se pasaron por un tamiz de 2mm (Figuras 22 y 23).

*Figura 22. Secado de muestras*



*Fuente: Toma propia.*

*Figura 23. Triturado de muestras.*



*Fuente: Toma propia.*

Las pruebas físicas realizadas se apegaron a la NOM 021-RECNAT-SEMARNAT, que especifica los procedimientos para la preparación y evaluación de parámetros físicos y químicos de muestras de suelo. De manera particular se determinó la textura del suelo por el método de Bouyoucos (Figura 24), Densidad Aparente (DA), por el método de la probeta, Densidad Real (DR), por el método del picnómetro, Humedad, así como otros parámetros relacionados con el comportamiento del agua

en suelo tales como Humedad a Capacidad de Campo (HCC), Humedad a Punto de Marchitez (HPM) (Tabla 9).

*Tabla 9. Métodos utilizados para los análisis físicos de laboratorio.*

Propiedad	Método	Autor
Textura	Método del hidrómetro	Bouyoucos (1962)
Densidad aparente (g cm <sup>3</sup> )	Método volumétrico o de la probeta	Beaver (1963)
Densidad real (g cm <sup>3</sup> )	Método del Picnómetro	Aguilera y Domínguez (1980)
Humedad (%)	Método Gravimétrico	Ortiz y Ortiz (1980)
Humedad a Capacidad de Campo (%)		
Humedad a Punto de Marchitez Permanente (%)		

*Fuente: Elaboración propia.*

Con los resultados obtenidos en la fase previa se efectuó un análisis estadístico descriptivo para determinar el comportamiento de las variables estimadas, se generaron tablas y gráficas para su presentación y análisis.

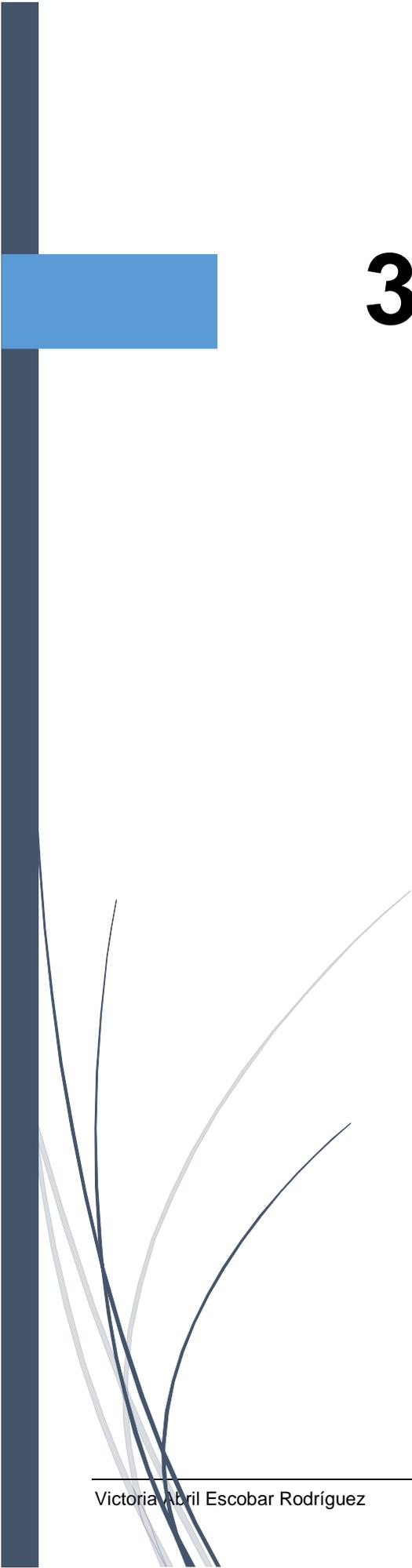
Finalmente, se procedió al análisis detallado con los resultados obtenidos de las muestras de suelo, lográndose gracias a una comparación con los antecedentes y a la información recopilada durante las etapas previas.

*Figura 24. Análisis de la textura del suelo*



*Fuente: Toma propia.*

Con los resultados obtenidos en la fase previa se efectuó un análisis estadístico descriptivo mediante el software SPSS (2015), considerando la media y desviación estándar de cada variable, considerando cada sitios y profundidad del suelo de cada una de las variables estudiadas y posteriormente se realizaron de pruebas de correlación entre las variables evaluadas para establecer relaciones causa efecto entre las propiedades físicas del suelo y su desempeño hídrico.



# 3. Resultados

## **Capítulo III. Resultados**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio realizados, los cuales se mostrarán de forma gráfica y ordenada. En primer lugar, se analizarán los resultados de las propiedades físicas de cada suelo, y posteriormente los resultados de las propiedades hídras, en donde se destacarán principalmente las variables que han influido significativamente en la calidad de cada suelo muestreado.

Los resultados de las propiedades físicas se muestran en la Tabla 10 y se describen a continuación.

*Tabla 10. Propiedades físicas del suelo*

Sitio	Altitud	Prof	DA	DR	Hum	Por	Are	Lim	Arc	Clase textural
	msnm	cm	g/cm <sup>3</sup>		(%)					
1	2714	0 - 30	1.11	2.41	53.80	54.18	70.07	18.13	11.80	Franco arenoso
		30 - 60	1.25	2.45	58.23	55.20	46.8	16.00	37.20	Franco arcillo arenosa
2	2713	0 - 30	1.01	2.18	65.38	53.42	40.20	28.40	31.40	Franco arcillo arenoso
		30 - 60	1.07	2.28	65.18	53.19	51.87	14.67	33.47	Arcillo arenosa
3	2716	0 - 30	1.03	2.13	66.41	51.31	21.33	44.67	34.00	Franco arcillo limosa
		30 - 60	1.09	2.26	59.31	51.66	38.33	28.47	33.2	Franco arcillosa
4	2730	0 - 30	1.14	2.35	51.05	51.68	64.40	15.20	20.40	Franco arcillo arenosa
		30 - 60	1.17	2.42	54.18	51.44	54.67	19.33	26.00	Franco arcillo arenosa
5	2747	0 - 30	1.13	2.32	48.20	51.48	62.47	20.47	17.07	Franco arenosa
		30 - 60	1.25	2.37	40.67	47.44	59.47	15.73	24.80	Arcillo arenoso
6	2738	0 - 30	1.11	2.33	52.75	52.71	67.33	14.00	18.67	Franco arcillo arenosa
		30 - 60	1.16	2.38	41.65	51.23	63.00	18.33	18.74	Franco arenoso

DA: Densidad Aparente; H: Humedad; Por: Porosidad, Are: Arenas; Lim: Limos; Arc: Arcillas.

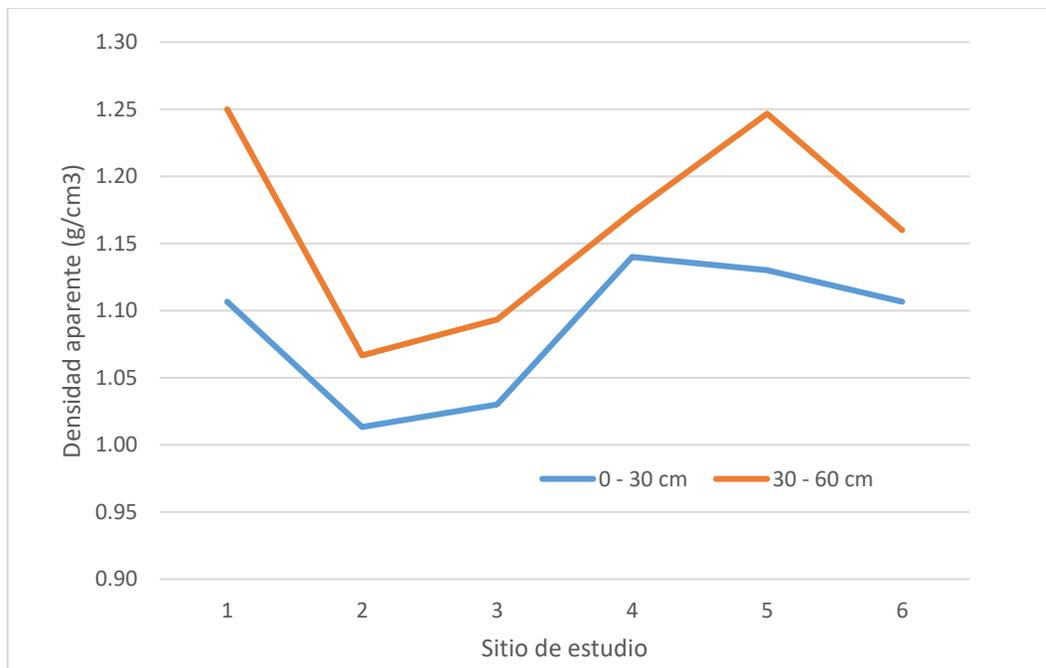
*Fuente: Elaboración propia con base a resultados obtenidos en laboratorio.*

A continuación, se describen los principales resultados de las pruebas de laboratorio:

### 3.1 Densidad Aparente

Los valores para la Densidad Aparente (DA) fluctuaron entre  $1.01 \text{ g/cm}^3$  y  $1.25 \text{ g/cm}^3$  como el valor más alto (Figura 25). El menor valor se obtuvo en el sitio 2 y el más elevado al sitio 1; cabe mencionar que el sitio 2 es el lugar con los resultados de D.A más bajos para ambas profundidades, y con los valores más elevados están las muestras del sitio 4 de 0 -30 cm con  $1.14 \text{ g/cm}^3$ , y el sitio 1 y 5 de 30 -60 cm con  $1.25 \text{ g/cm}^3$ . Se puede observar que de 0-30 cm los valores son inferiores en comparación a los de 30-60 cm, por lo que se entiende que en las partes superficiales el suelo se encuentra menos compacto en comparación a las inferiores.

Figura 25. Comportamiento de la Densidad aparente en los sitios de estudio.

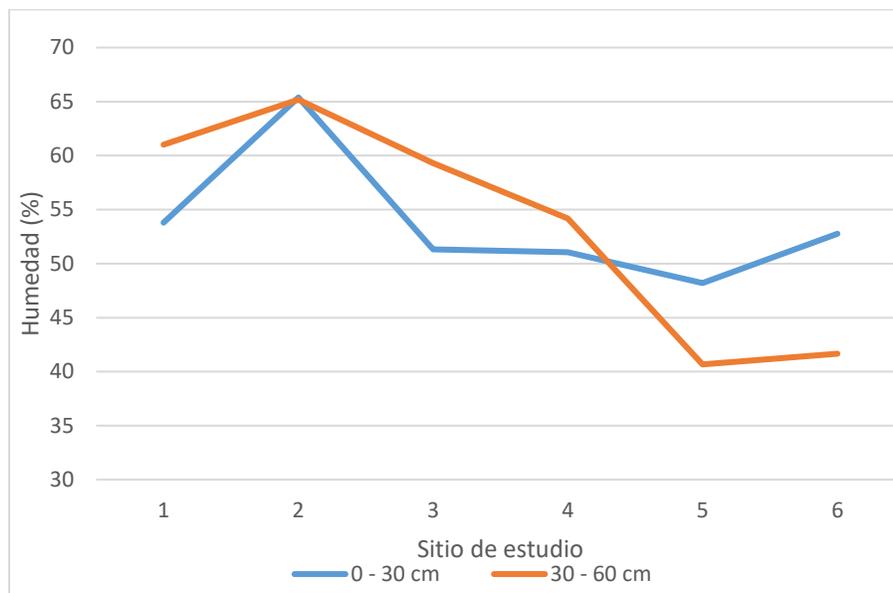


Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Humedad

Como se puede observar en los resultados de humedad registrados para el día de visita al PESM, que se ubicó dentro de la temporada de lluvia (Figura 26); los contenidos extremos para la capa de 0 a 30 cm se ubicaron en el sitio 5 (48.20%) como valor mínimo y el sitio 2 con 66.41% de humedad como valor máximo. Para la profundidad de 30 – 60 cm, esta tendencia se repitió para los mismos sitios como valores extremos, es decir, para el sitio 5 con el valor mínimo (40.67%) para el sitio 5 como la muestra con el menor porcentaje de humedad, y el sitio 2 con un 65.18% como el valor máximo. Considerando que el muestreo total se realizó en el mismo día y previo a un evento de lluvia, los datos registrados pueden dar indicios sobre la capacidad de almacenamiento de agua para los suelos de cada sitio.

Figura 26. Grafica de porcentaje de Humedad en el suelo.

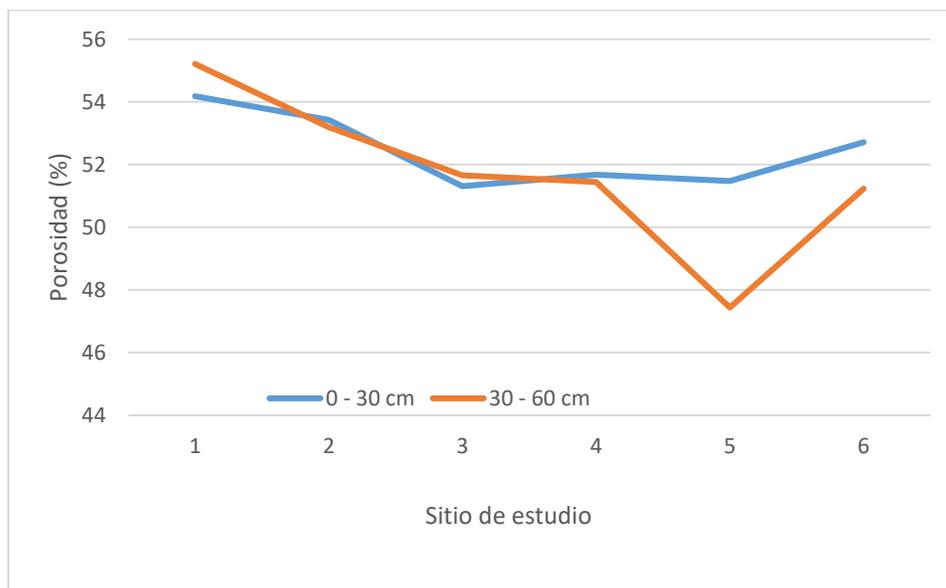


Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Porosidad

La porosidad total del suelo incluye a los poros de diferentes dimensiones que tienen funciones de traslado de agua y aire en el suelo. Suelos arcillosos pueden contener valores muy altos de espacio poroso, sin embargo, son poros de diámetros inferiores a 1 mm (Siebe et al., 2006), lo cual limita su desempeño para transmitir el agua de una profundidad a otra. Para esta propiedad el suelo que registró la porosidad más baja a ambas profundidades fue el del sitio 5, en tanto que el suelo del sitio 1 registró el mayor contenido de espacio poroso (Figura 27). Por lo que respecta a los suelos de los sitios 2,3 y 4 los valores de porosidad fueron similares a ambas profundidades, lo que indicaría la homogeneidad en las condiciones físicas al menos hasta los 60 cm de profundidad.

Figura 27. Grafica de porcentaje de porosidad.

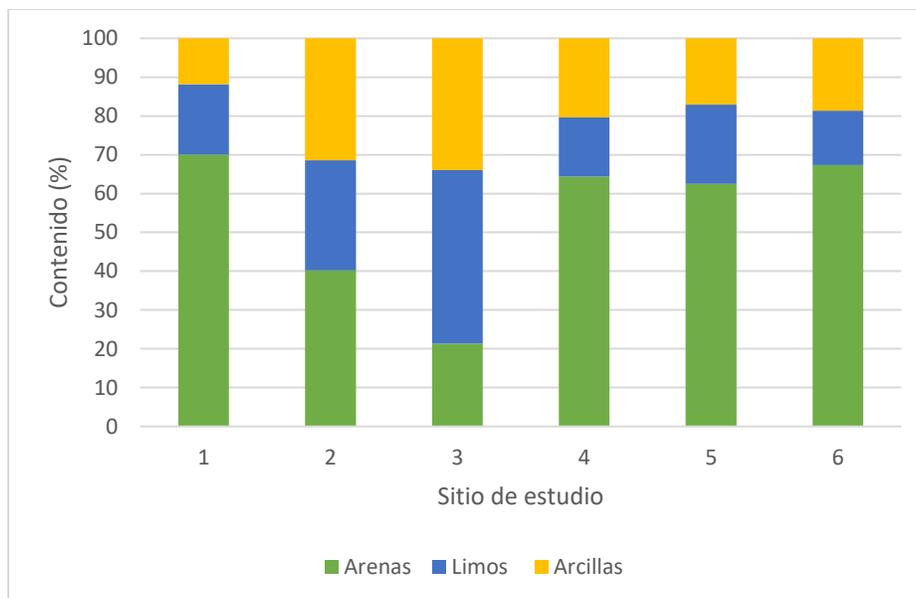


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de laboratorio

### 3.4 Granulometría del suelo

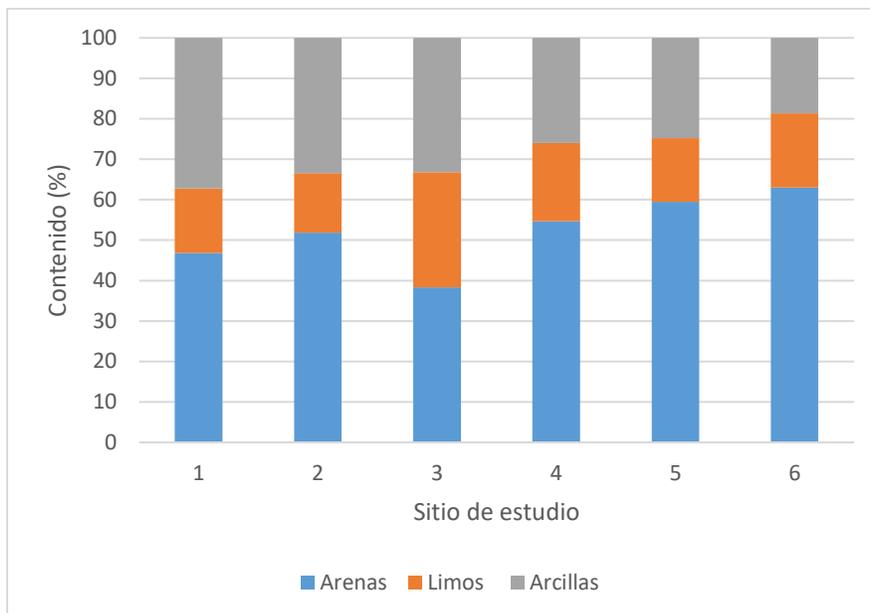
La composición de las partículas del suelo (textura), nos permite realizar inferencias acerca de su desempeño en la provisión de agua y aire para las plantas y organismos del suelo. De manera general, los suelos del PESM a una profundidad de 0 – 30 cm presentan texturas intermedias, es decir franco arcillosas, franco arcillo arenosas y franco arenosas con excepción del sitio 2 cuya granulometría es más fina (arcillo arenosa) (Figura 28). Para la profundidad de los 30 – 60 cm, las texturas tienden a ser más finas, lo cual indica que el contenido de arcillas se incrementa a esta profundidad con respecto a la capa superior (Figura 29).

*Figura 28. Distribución del contenido granulométrico del suelo en los sitios de estudio a una profundidad de 30 cm.*



*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de laboratorio*

Figura 29. Distribución del contenido granulométrico del suelo en los sitios de estudio a una profundidad de 30 – 60 cm.



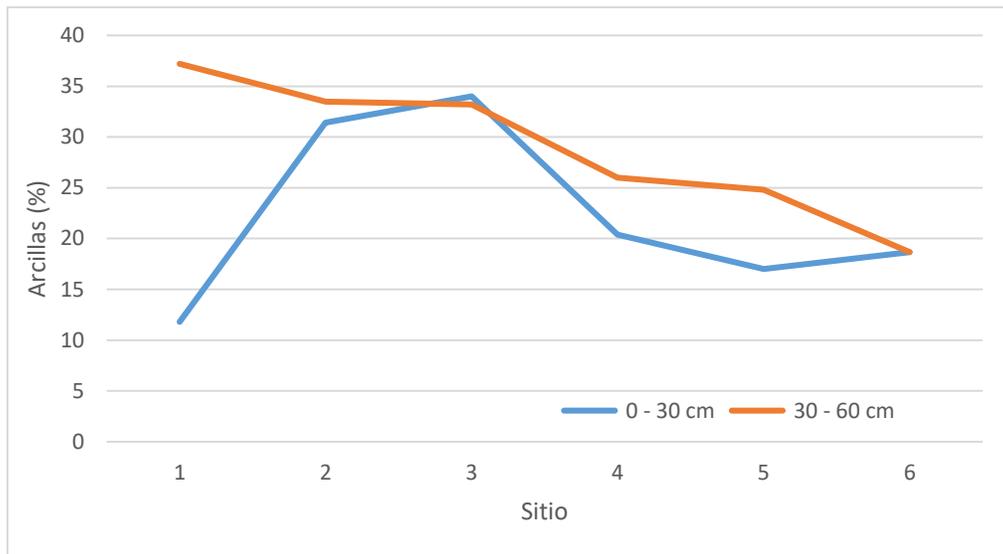
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de laboratorio

### 3.5 Contenido de arcillas

Al ser la fracción granulométrica más activa del suelo por su capacidad de almacenar agua y nutrientes, es preciso puntualizar las diferencias en el contenido de arcillas por sitio y profundidad: El contenido de arcillas tuvo diferencias significativas que va desde 17.07 % a 37.2 %, siendo el sitio 1, la muestra con menor cantidad de arcillas y el sitio 3 la de mayor cantidad, esto a la profundidad de 0-30 cm; para los suelos de 30-60 cm se tiene que el sitio 6 es el que menor porcentaje de arcillas tiene, mientras que el sitio 1 es el que cuenta con más arcillas. Por lo anterior destaca el hecho de que el sitio 1 muestra el mayor diferencial en cuanto al contenido de arcillas entre una profundidad y otra, lo anterior consideramos que puede deberse al manejo de que ha sido sujeto en el tiempo, así como al probable aporte de materiales ya sea natural o inducido.

Al observar la gráfica del contenido de arcillas (Figura 30), se puede contemplar como arroja valores más altos para las muestras de suelo inferiores, lo cual indica una mayor acumulación de éstas en las capas inferiores del suelo

Figura 30. Contenido de arcillas para los suelos de los sitios de estudio



Fuente: Elaboración propia.

### 3.6 Contenido de arenas

Para el contenido de arenas en los suelos se puede apreciar que el porcentaje más bajo lo tiene el sitio 3, con un 21.33%, mientras que el más alto cuenta con un 70.07% en el sitio 1, ambos para los 0-30 cm de profundidad; para las muestras de 30-60 cm se tiene al sitio 3 como la muestra con menor porcentaje de arenas con un 38.33%, y al sitio 6 el que mayor porcentaje tiene con un 63% de las mismas; obteniendo que en la parte superior de los suelos es donde se encuentra un mayor contenido de arenas que el suelo más profundo. El predominio de la fracción de arenas influye directamente sobre la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua y oxígeno a las raíces de las plantas, como se explicará más adelante.

### **3.7 Contenido de limos**

El contenido de limos en el suelo vario de 14% a 44.67%, en el sitio 6 y 3 respectivamente, ambos a una profundidad de 0-30 cm; para los resultados obtenidos de las muestras de 30-60 cm se observa el valor más bajo en el sitio 2 con 14.67%, mientras que el más elevado lo tiene el sitio 3 con 28.47%; observando así que los suelos con una profundidad de 0-30 cm contienen un mayor porcentaje de partículas de limo, a diferencia del sitio 4 y 6, en los que los limos predominan en las partes inferiores de los suelos. Los limos, al ser partículas de tamaño intermedio, generalmente son transportados por la fuerza del agua a las partes bajas del sistema, lo cual puede explicar su distribución con respecto al relieve.

### **3.8 Propiedades hídricas del suelo**

Entendiendo la conformación y proporción de los componentes del suelo (minerales, orgánicos, aire y agua), es posible determinar la dinámica de los fluidos al interior del suelo. En esta sección se evaluaron diferentes propiedades del suelo relacionadas con la capacidad de este para absorber y distribuir el agua y aire, componentes necesarios para que se lleven a cabo la dilución, transporte y asimilación de nutrientes por parte de las raíces de las plantas. En este sentido, la posibilidad del suelo de contar con el espacio poroso suficiente en cantidad y tamaño determinará su mayor o menor desempeño con respecto a estas funciones.

En la Tabla 11 se muestran los datos de las variables como son la Humedad a Punto de Marchitez Permanente (HPMP), Capacidad de Campo (HCC) y Humedad en condición Saturación (HS), obtenidos mediante métodos de laboratorio sugeridos por Ortiz (1985). De igual forma, se realizaron pruebas de Conductividad Hidráulica (CH) y volumen de agua disponible (VHD), con lo cual se integra un cuadro básico de variables que permitirán identificar el desempeño del suelo antes mencionado.

Tabla 11. Propiedades hídricas del suelo

Sitio	Altitud	Profundidad	HPMP	HCC	HPS	CH	Agua Disponible
	msnm	cm	g agua/cm <sup>3</sup> suelo			cm/hora	mm agua /m suelo
1	2714	0 - 30	0.12	0.22	0.44	1.02	101.56
		30 - 60	0.15	0.25	0.47	0.43	97.94
2	2713	0 - 30	0.18	0.30	0.49	0.31	125.23
		30 - 60	0.19	0.29	0.49	0.22	102.02
3	2715	0 - 30	0.19	0.35	0.51	0.36	158.30
		30 - 60	0.19	0.31	0.50	0.28	127.11
4	2730	0 - 30	0.13	0.23	0.45	0.67	94.99
		30 - 60	0.15	0.26	0.47	0.40	104.42
5	2747	0 - 30	0.10	0.19	0.42	0.85	96.36
		30 - 60	0.2	0.3	0.5	0.5	107.4
6	2738	0 - 30	0.12	0.22	0.45	0.81	92.55
		30 - 60	0.12	0.22	0.45	0.83	98.94

HPMP = Punto de Marchitez Permanente; HCC= Humedad a Capacidad de Campo; HPS= Humedad a Punto de Saturación; CH= Conductividad Hidráulica.

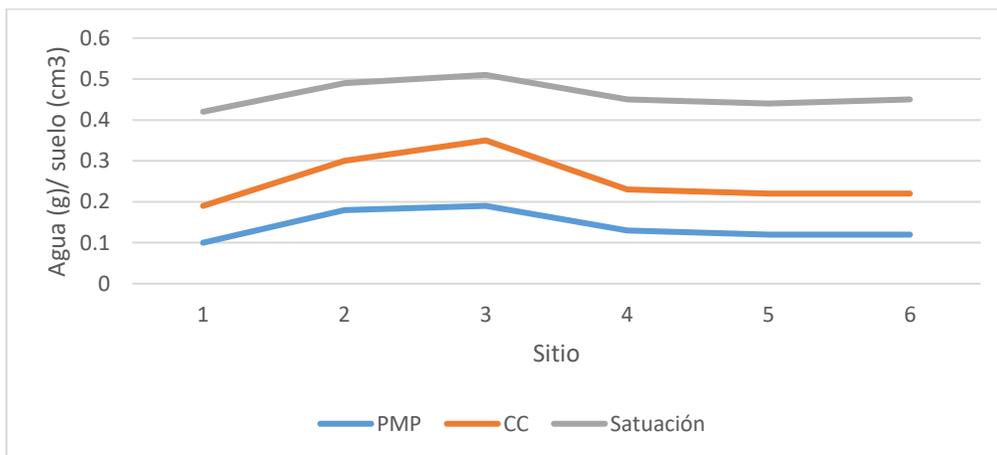
Fuente: Elaboración propia con base a resultados obtenidos en laboratorio.

### 3.8.1 Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y saturación

0 – 30 cm de profundidad.

En la Figura 31 se observa los resultados obtenidos para la Humedad a Punto de Marchitez Permanente (HPMP), Capacidad de Campo (HCC) y Punto de Saturación de cada una de las muestras de suelo de 0-30 cm de profundidad. Resalta el hecho de que a esta profundidad es posible identificar dos grupos de suelos, el primero, integrado por los sitios 1, 4,5 y 6 en los cuales los valores de estos parámetros son similares e inferiores con respecto al grupo 2 comprendido por los sitios 2 y 3. Esta diferencia probablemente está relacionada con el predominio de texturas medias para el grupo 1 y finas para el caso del grupo 2, lo anterior considerando la capacidad de retención de humedad que tienen las arcillas dentro del suelo. De los diferentes sitios es posible identificar que el sitio 3 es el que tiene la mayor capacidad de retención de agua disponible cuyo rango va de 0.19 a 0.35 %.

Figura 31. Grafica de HPMP, HCC y Punto de Saturación de 0-30 cm de profundidad.



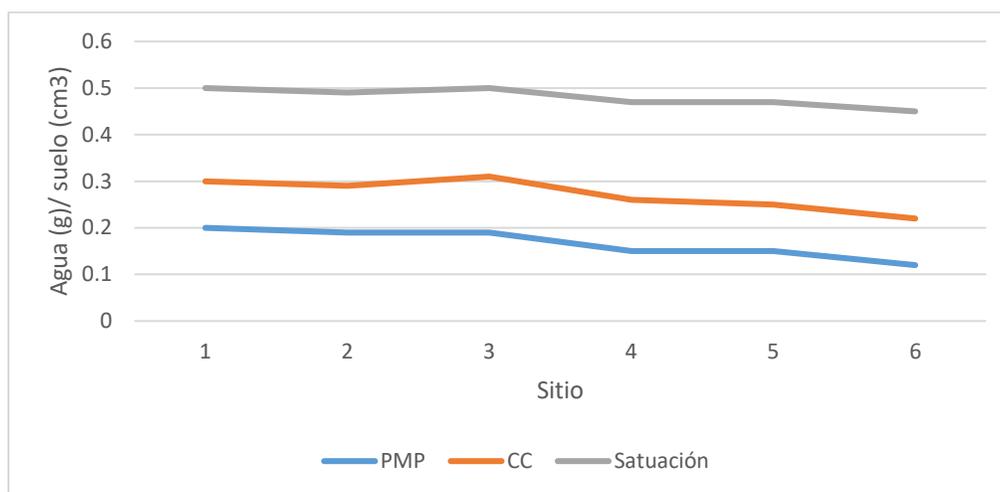
Fuente: Elaboración propia.

### 30 – 60 cm de profundidad

En los resultados recabados de las muestras de 30-60 cm (Figura 32), las variaciones de estos parámetros son menos pronunciadas, sin embargo, se observa

que en el caso de los sitios 4,5 y 6 los valores decrecen considerablemente indicando la menor capacidad de estos suelos para captar y almacenar agua disponible para los organismos del suelo y la vegetación arbórea. En tal sentido, el sitio 6 es el que evidencia mejor esta condición.

Figura 32. Grafica de PMP, CC y Punto de Saturación de 30-60 cm de profundidad.



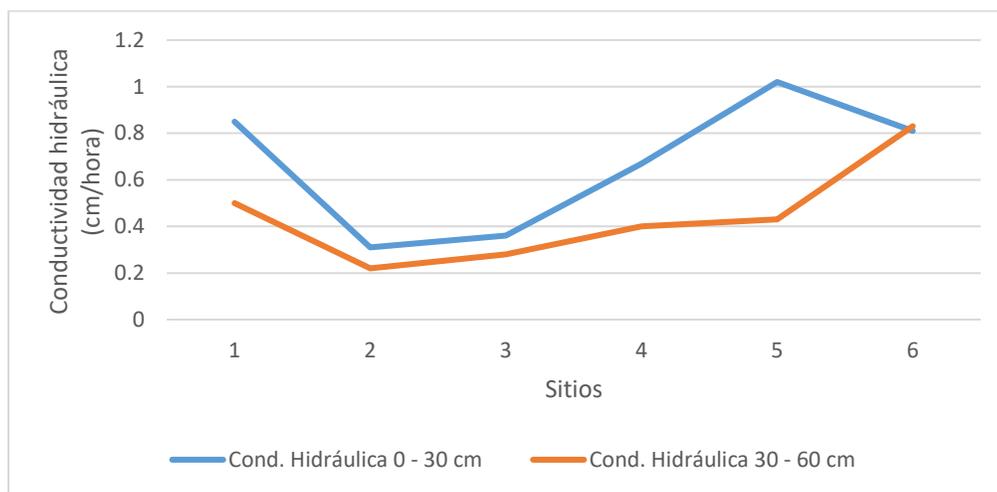
Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2 Conductividad hidráulica

Los resultados conseguidos de conductividad hidráulica (Figura 33), muestran que para los primeros 30 cm existe una amplia variación en el comportamiento de la capa superficial del suelo siendo los sitios 2 y 3 los que poseen la menor Conductividad Hidráulica (0.31 y 0.36 cm/h), condición que, ante eventos de precipitación frecuente, podría dificultar el desalojo del agua. Esta condición persiste en la profundidad de 30 a 60 cm. Para el caso de los sitios 4, 5, y 6 el diferencial de CH entre las profundidades es más pronunciado, identificándose que de manera general que la CH es mayor en superficie que en profundidad. El sitio 1 se sitúa en una condición intermedia de los grupos de suelo anteriores, sugiriendo que la mayor

problemática en cuanto al drenaje del suelo radica en las capas inferiores. Como se aprecia en los resultados graficados (Tabla 11) se puede contemplar una diferencia significativa en los resultados, con valores superiores en las muestras tomadas de 0-30 cm, e inferiores en las muestras de 30-60 cm, siendo que existe una mayor conductividad del agua en los primeros 30 cm de los suelos.

Figura 33. Grafica de Conductividad Hidráulica en cm/h.



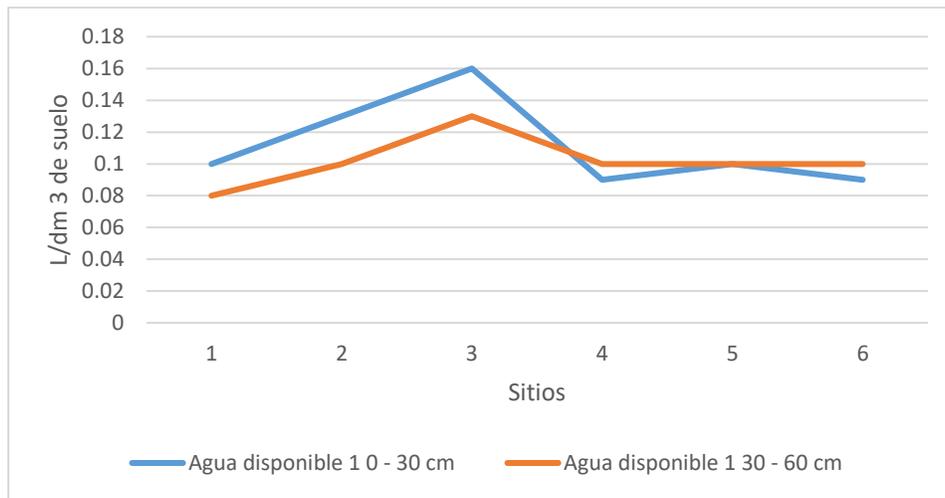
Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.3 Agua Disponible

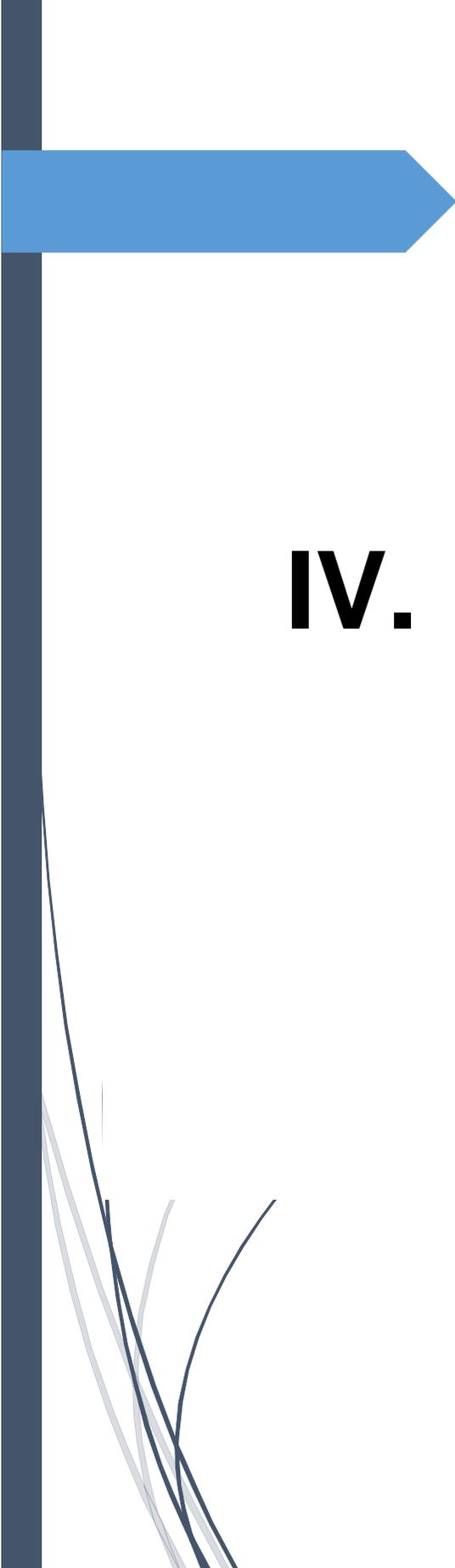
Los valores del Agua Disponible (AD) en el suelo indicaron los valores más altos para el sitio 3 en ambas profundidades, seguido del sitio 2. Es notable el hecho de que al igual que en otros parámetros realizados, los suelos 4, 5 y 6 tienen un comportamiento más homogéneo entre ellos que con los suelos restantes, no así en el caso del sitio 1 que mantiene una variación más alta entre ambas capas.

Como se observa en la Figura 34, el sitio con un mayor volumen de AD es el 3, mientras que el sitio 6 es el de menor disponibilidad.

Figura 34. Grafica de volumen de Agua Disponible.



*Fuente: Elaboración propia.*



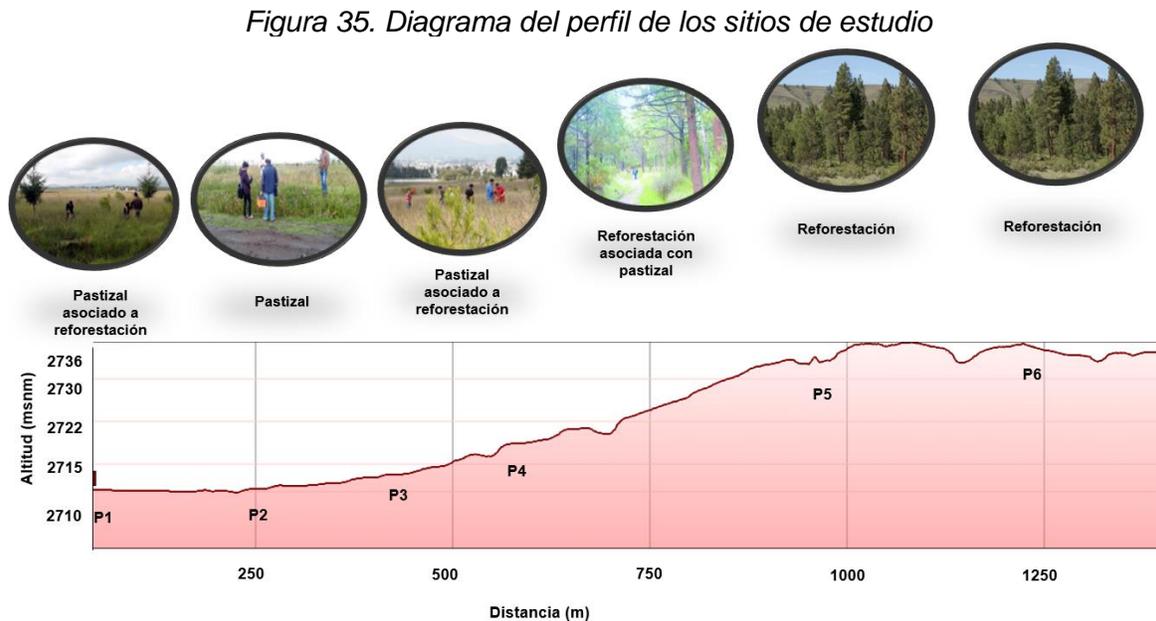
# IV. Discusión

## IV. Discusión

En este capítulo se pretende abordar de manera integral las características de los suelos de cada sitio de estudio y posteriormente sus implicaciones sobre el desempeño hídrico de estos a partir del análisis estadístico.

### 4.1 Análisis del desempeño del suelo en los sitios de estudio

A continuación, se muestra un perfil de los pisos altitudinales (Figura 35) de cada área estudiada, y enseguida, un análisis integrado de las principales características biofísicas y edáficas de los suelos de cada sitio, así como su relación general con su desempeño hídrico.



*Fuente: Elaboración propia con base a Google Earth.*

El **sitio 1** (2714 msnm), corresponde a la parte baja del sistema, aledaño a un cuerpo de agua artificial, posee una inclinación escasa menor a 5° y actualmente está a sujeto a prácticas de forestación con individuos del género *Pinus*, en

asociación con comunidades de pastizal. El suelo de este sitio presenta características diferenciales para ambas profundidades como son el cambio textural con el incremento de arcillas. Esta condición guarda relación con el incremento en el valor de los parámetros hidrológicos del suelo (HPMP, HCC, HS), pero con una drástica disminución de la conductividad hidráulica a mayor profundidad. Esta condición define un drenaje lento en la capa subsuperficial del suelo y muy probablemente condiciones de anoxia durante la época lluviosa con la consecuente afectación para el desarrollo radicular de especies arbóreas.

Fue el tercer sitio con valores de agua disponible más elevados, esto para la muestra de 30-60 cm de profundidad, y en la que se encontró mayor contenido de arcillas; para su conductividad hidráulica tuvo una diferencia notable entre una profundidad y otra, sin embargo, para ambos resultó una conductividad "Moderada", (Cabrera Gonzalez, 1999). Por otra parte, el elevado contenido de arcillas con alta capacidad de retención de agua podría ocasionar que, en la época de estiaje, las raíces de las plantas pudieran estar sometidas a estrés hídrico prolongado.

En el **sitio 2** es el punto con la posición altitudinal más baja dentro del transecto de estudio (2713 msnm), posicionado dentro del área de concentración de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales, esta condición lo hace abundante en la distribución de pastizales que durante la época de lluvias se encuentran de manera semipermanente inundados. El suelo presenta una textura franco arcillo arenosa y arcillo arenosa para las muestras de 0-30 cm y 30-60 cm respectivamente, de igual forma presento un elevado contenido de arcillas, sobrepasando el 30%.

Destaca el alto contenido de arenas, probablemente producto de la mezcla y transporte de materiales de las partes más altas del sistema, generando así una mayor porosidad en el suelo que se sitúa en una condición media (Muñoz Iniestra et al., 2013). EL contenido de arcillas determina que la conductividad hidráulica se sitúe en valores que la condicionan como baja o lenta de acuerdo con (Cabrera González, 1999). Por lo que respecta al contenido de humedad al momento de la

toma de muestras, así como de agua disponible es el segundo sitio con los valores más altos para estos parámetros. Esto lleva a que el bajo porcentaje de pendiente, aunado al elevado contenido de arcillas que presenta puede provocar que en condiciones de alta precipitación los escurrimientos se concentren en esta porción de terreno y el suelo quede saturado por un largo periodo de tiempo, limitando la disponibilidad de oxígeno para especies con raíces profundas.

En el **sitio 3** (2714 msnm), se registró un suelo ubicado en zona de planicie con vegetación de pastizal, en donde se obtuvo una textura franco arcillo limosa en los primeros 30 cm de profundidad y franco arcillosa de 30-60 cm, lo cual arroja que es un suelo con una textura medianamente fina (FAO, 2020) y de acuerdo con lo que menciona (Vicentini et al., 2010) que en las zonas con horizontes arcillosos y en especial en años secos muestran dificultad para el desarrollo radicular.

Los bajos presentan suelos con limitantes físicas para el desarrollo de las forestaciones, pues las plántulas tienen dificultad en superar la resistencia mecánica que ofrece el suelo seco, se restringe la penetración radicular y por tanto se limita la capacidad de absorción de agua.

Este sitio mostro una densidad aparente media de acuerdo con la escala presentada por (Muñoz Iniestra et al., 2013). Con contenido de arcillas superior al 30% para ambas muestras, siendo uno de los sitios con mayores porcentajes de arcilla. El espacio poroso se mantuvo en 51%, para ambas profundidades. Las características anteriores se relacionan con una conductividad hidráulica lenta (Cabrera González, 1999), lo cual resulta negativo, ya que una tasa de infiltración muy baja puede ser pernicioso debido a la posibilidad de inundación (Veenhuizen, 2021) aunado al relieve del lugar.

En este sitio los suelos tienen la mayor disponibilidad de agua y contenido de humedad, esto debido al elevado contenido de arcillas, ya que la energía de retención de humedad es alta, así como la capacidad de retención de agua disponible de las mismas (Valero Sancho, 1999). Es por esto, por lo que, en este suelo la clase textural, la baja conductividad hidráulica y el relieve generan un sitio

muy propenso a sufrir encharcamientos en épocas de lluvia, y ahogar a las raíces, pues el nivel de aire en el medio disminuye.

El **sitio 4** (2730 msnm), tiene uso forestal, producto de reforestaciones dentro del (PESM). Se ubica fisiográficamente dentro de la subunidad de pie de monte del cerro “De en medio”, con una pendiente de entre 0.5 y 2 grados. Los suelos de este punto están caracterizados por presentar una textura franco arcillo arenosa en ambas profundidades, que de acuerdo a ([Sánchez Corona et al., 2008](#)), corresponde a una mezcla granulométrica media sin problemas aparentes para el desarrollo radicular con ([Muñoz Iniestra et al., 2013](#)), lo que se vincula también con valores medios de DA y porosidad.

Esta condición les confiere valores de conductividad, igualmente se pudo observar en los resultados de conductividad hidráulica que esta fue más elevada en los primeros 30 cm de suelo, ya que como lo menciona ([Silva et al., 2015](#)) los suelos con mayor contenido de arenas drenan más rápido que los suelos arcillosos, pues como se observa en sus resultados, este sitio presentó un porcentaje considerable también de estas partículas de arena. Por su contenido de arcilla, este suelo presentó valores altos de agua disponible, principalmente en la muestra más profunda que es la que presentó mayor porcentaje de partículas arcillosas, así como porcentaje de humedad.

El **sitio 5** (2747 msnm) corresponde al punto de mayor elevación registrado con un pendiente promedio cercana a 5°, aunque su posición fisiográfica lo sitúa dentro de la subunidad de ladera media. Al igual que los sitios ubicados en una posición similar, históricamente ha estado sujeto a prácticas de reforestación con individuos de pino y cedro. El suelo superficial (0 – 30 cm) obtuvo una textura franco arenosa con incremento de arcillas (arcillo arenosa) 30-60 cm de profundidad. Esta característica da un panorama positivo, ya que como ([Huaroc Meza et al., 2014](#)) lo menciona, la pendiente moderada, así como la pedregosidad influyen en mayor medida en la calidad de un suelo. El porcentaje de porosidad también resultó mayor en estos primeros centímetros de la muestra, la densidad aparente en este sitio fue

“Media”. La muestra de 0-30 cm de suelo resulto con los valores de conductividad hidráulica más elevados, esto debido al contenido de arenas y arcillas de dicha muestra, ya que un suelo más arenoso hace que drene con mayor rapidez el agua; sin embargo, en los siguientes 30-60 cm de suelo los resultados de conductividad bajan significativamente debido al aumento de las partículas de arcilla, quedando con valores de “Moderada”, para la muestra suelo superior, y “Lenta” para la muestra inferior.

En cuanto a la humedad, se pudo observar que fue el sitio con menor porcentaje de humedad. En su conjunto, las condiciones observadas denotan condiciones diferenciales en el comportamiento del suelo en lo que se refiere al contenido y disponibilidad de humedad con la profundidad.

El **sitio 6** (2738 msnm) corresponde a un suelo bajo uso forestal asociado con manchones de pastizal en los claros de bosque. Fisiográficamente se puede ubicar en una posición de ladera media con una pendiente que no rebasa los 5°. El suelo presenta texturas medias, pero con un apenas observable incremento de arenas y limos en profundidad, lo que le confiere valores medios en los parámetros hidrológicos como son la HPMP, HCC y HPS.

Los valores obtenidos de conductividad hidráulica arrojaron una condición moderada de acuerdo a [\(Cabrerá González, 1999\)](#), para ambas profundidades, contando con los valores de conductividad hidráulica más homogéneos en cuanto a profundidades, corroborando así lo mencionado por [\(Gómez et al., 2014\)](#), que existe una relación positiva entre la pendiente y la tasa de infiltración debido a que las pendientes pronunciadas previenen la formación y desarrollo de sellos superficiales, siempre y cuando no estén sujetos a compactación en los primeros centímetros de profundidad.

## 4.2 Análisis estadístico descriptivo de las variables del suelo

Mediante el software estadístico PASW Statistics 18 *MR*, se efectuó el análisis de las propiedades del suelo para los diferentes sitios de estudio, cuyos valores promedio, desviaciones estándar y coeficiente de variación se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de las variables edáficas e hidráulicas

Estadísticos descriptivos			
	Media	Desv std	CV (%)
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.12	.0696	6.19
Densidad Real (g/cm <sup>3</sup> )	2.32	.0967	4.16
Humedad (%)	54.80	8.68	15.83
Porosidad (%)	52.31	2.45	4.69
Arenas (%)	53.33	14.40	27.01
Limos (%)	21.12	8.87	41.98
Arcillas (%)	25.56	8.23	32.21
HPMP (%)	.153	.035	22.99
HCC (%)	.262	.048	18.35
HPS (%)	.470	.028	6.02
Conductividad hidráulica (cm/h)	.557	.267	48.01
Agua Disponible (L/cm <sup>3</sup> suelo)	.108	.021	19.22

*HPMP= Humedad a Punto de Marchitez Permanente; HCC= Humedad a Capacidad de Campo; HPS= Humedad a Punto de Saturación.*

*Fuente: Elaborado a partir de datos propios*

A partir de la información anterior es posible advertir el comportamiento de las variables edáficas considerando la totalidad de los sitios de estudio y profundidades. Destacan mayor variabilidad en el comportamiento de las fracciones minerales del suelo (CV entre 27 y 41 %), así como de la Conductividad Hidráulica (48 %), lo anterior está fuertemente relacionado con su posición dentro del transecto estudiado, pero también con respecto a la profundidad del suelo. Por otra parte, es notable la escasa variabilidad de algunas propiedades como la densidad del suelo (Aparente y Real), así como del volumen poroso cuyo CV es inferior a 6 %.

### 4.3 Análisis de correlación de los parámetros edáficos

La información previa permite considerar un primer recuento de aquellas propiedades que pudieran tener un papel de primer orden sobre el desempeño hídrico del suelo, por lo cual se realizó en segunda etapa un análisis de correlación de variables, mismo que se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Matriz de correlaciones para las variables estudiadas

	DA	DR	Hum	Porosidad	Are	Lim	Arc	HPMP	HCC	HPS	CH	HD
DA	1											
DR	.829*	1										
Hum	-.751*	-.607	1									
Porosidad	-.164	.205	.508	1								
Arenas	.500	.720*	.715*	-.078	1							
Limos	-.620	.793*	.536	-.119	-.855*	1						
Arcillas	-.208	-.406	.674	.265	-.829*	.418	1					
HPMP	-.253	-.444	.703	.264	-.842*	.444	.995*	1				
HCC	-.402	-.632	.735*	.133	-.965*	.693	.942*	.947*	1			
HPS	-.268	-.518	.656	.142	-.898*	.548	.981*	.976*	.977*	1		
CH	.259	.427	-.622	.019	.712*	-.363	-.855*	-.861*	-.822*	-.853*	1	
HD	-.630	.819*	.608	-.078	-.914*	.977*	.547	.578	.785*	.664	-.509	1

DA= Densidad Aparente; DR= Densidad Real; Hum= Humedad; Porosidad= Porosidad; Are= Arena; Lim= Limos; Arc= Arcillas; HPMP= Humedad a Punto de Marchitez Permanente; HCC= Humedad a Capacidad de Campo; HPS= Humedad a Punto de Saturación; CH= Conductividad Hidráulica; HD= Humedad Disponible.

\*La correlación es significativa a nivel 0.05

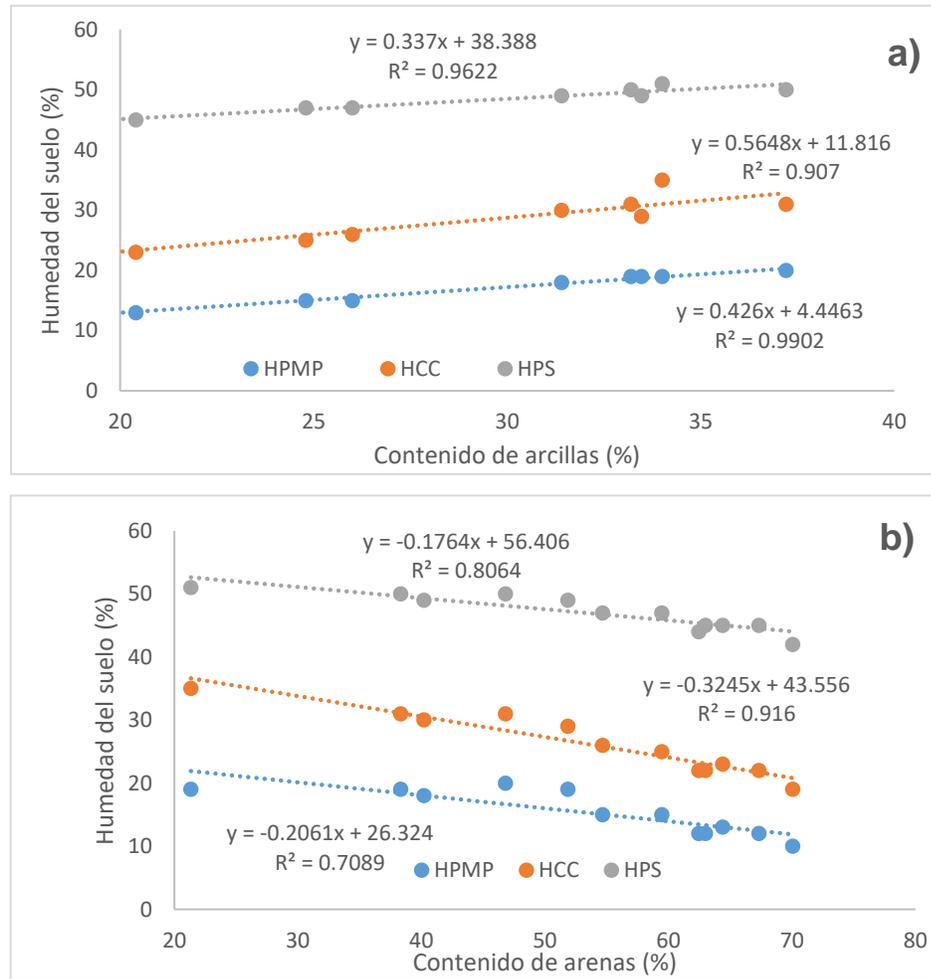
Fuente: Elaboración propia

De los datos anteriores es posible identificar que la variable con mayor número de correlaciones significativas ( $p < 0.01$ ) fue el contenido de arenas (8), contenido de arcillas (4), así como HPMP y HCC (ambas con tres correlaciones significativas). Destaca por tanto el hecho de que el tamaño de las partículas del suelo está significativamente relacionado con la capacidad de estos suelos para acumular y distribuir el agua que ingresa a ellos mediante eventos de lluvia y escurrimientos superficiales y sub- superficiales.

#### 4.4 Parámetros del suelo y su relación con los tipos de humedad del suelo

Las figuras 36 (a) y (b), muestran los modelos de correlación lineal entre el contenido de arcillas, arenas y los valores para los tipos de humedad en el suelo como son HPMP, HCC y HPS.

Figura 36. Relación entre el contenido de arcillas (a) y arenas (b) en el suelo con los tipos de humedad en el suelo



HPMP= Humedad a Punto de Marchitez Permanente; HCC= Humedad a Capacidad de Campo; HPS= Humedad a Punto de Saturación.

Fuente: Elaboración propia

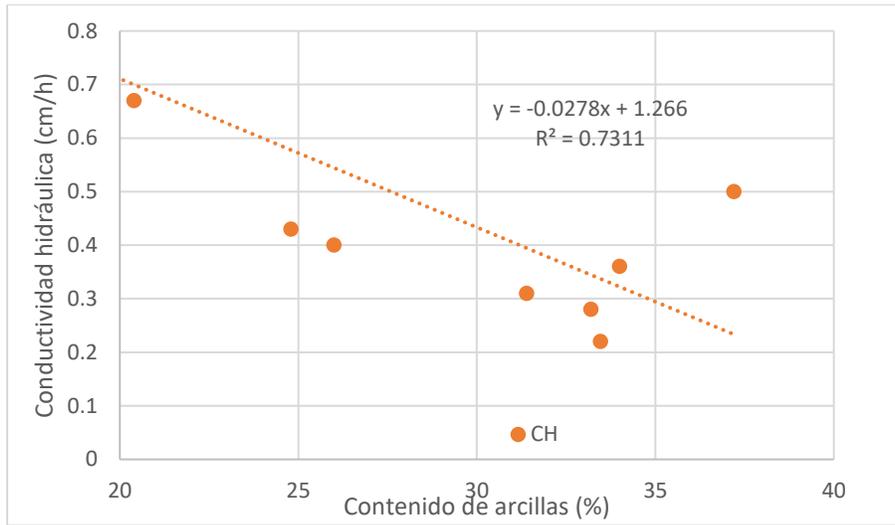
A partir de la selección de variables edáficas que tuvieron una mayor correlación con los diferentes tipos de humedad en el suelo como son la HPMP, HCC, HPS, así como la Conductividad Hidráulica y la Humedad Disponible, se desprendió que la composición granulométrica es la que permite ofrecer una mayor explicación sobre el comportamiento de estos parámetros. Por tal motivo se desarrollaron modelos de regresión lineal para identificar la eficiencia de establecer un modelo predictivo tanto de arcillas como de arenas, los cuales se muestran en la Figura 36.

Cuando se empleó a la variable “Contenido de arcillas” (Figura 36<sup>a</sup>), todos los modelos de regresión lineal mostraron un valor de  $R^2$  superior a 0.9, lo cual manifiesta la posibilidad de emplear esta variable del suelo, que es de fácil obtención en laboratorio para establecer un modelo predictivo que nos lleve a identificar los tipos de humedad del suelo en diferentes espacios del PESM.

Con el uso de la variable “Contenido de arenas” los modelos de regresión lineal mostraron una  $R^2$  menor a 0.9, excepto para HCC, lo cual indica que dichos modelos son menos eficientes con respecto a los generados con la variable “Contenido de arcillas”, sin embargo, y tal como lo demuestran los análisis de correlación previa, ambos casos podrían tener una eficiencia predictiva significativa.

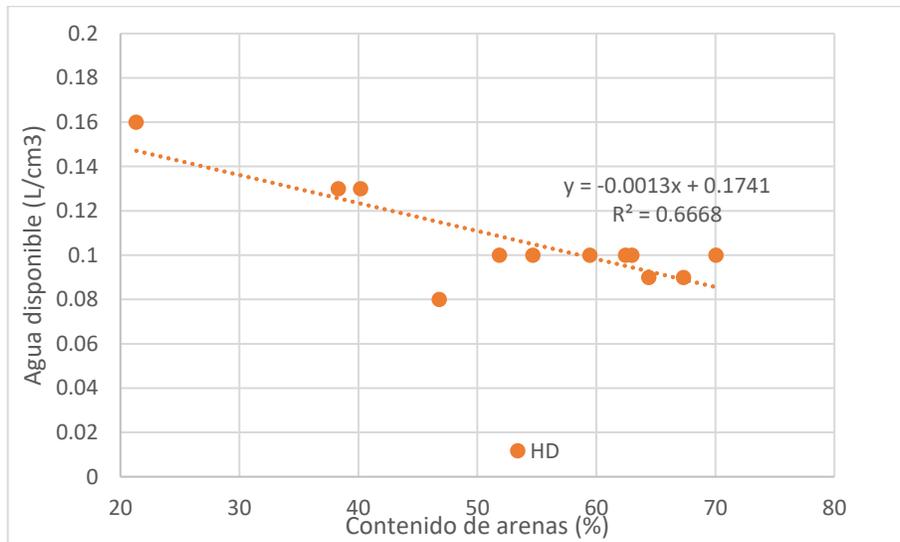
Por lo que respecta a las variables Conductividad Hidráulica y Agua Disponible, el ensayo de los diferentes modelos de regresión lineal no arrojó resultados similares a los casos anteriores: Los modelos de regresión lineal que emplearon a la variable “Contenido de arcillas” mostraron los valores de  $R^2$  más elevados que, sin embargo, no superaron a 0.7, por lo cual los podríamos considerar como de eficiencia media. Los resultados se muestran en las figuras 37 y 38.

Figura 37. Relación entre el contenido de arcillas y la Conductividad Hidráulica del Suelo



Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Relación entre el contenido de arenas y el Agua disponible en el suelo



Fuente: Elaboración propia

Respecto del efecto de las propiedades físicas del suelo sobre la tasa de infiltración, el autor ([Tapia et al., 2020](#)) reporta que la textura, estructura y contenido de materia orgánica se encuentran entre los factores que más afectan la velocidad de la conductividad hidráulica.

En el caso de la conductividad hidráulica y el porcentaje de arcillas en el suelo (Figura 37), presenta una correlación significativa de 0.73, obteniendo así que, a mayor contenido de estas partículas, la velocidad de la conductividad hidráulica se reduce, ya que las arcillas son de alta plasticidad, impermeables y baja capacidad de infiltración ([Guevara et al., 2011](#)).

Por otra parte, el modelo de agua disponible en conjunto con el porcentaje de partículas de arena (Figura 38) muestra un valor de correlación más bajo, pero significativo de 0.66, lo cual demuestra que favorece que la infiltración sea mayor en suelos con alta porosidad, como lo son suelos arenosos, pues como ([Guevara et al., 2011](#)) menciona, estos suelos pierden agua rápidamente y pasan a un estado desmoronado y agrietado, lo cual genera que requieran de riegos o lluvias más continuas para cubrir las necesidades de la vegetación.

El uso de modelos predictivos en los que se emplean variables de fácil obtención en campo o laboratorio con objeto de establecer aproximaciones sobre el valor de parámetros más complejos en el suelo ha sido considerado como una alternativa eficaz para entender el funcionamiento del suelo. Estos modelos conocidos como “Funciones de Pedotransferencia” han sido aplicados en México por ([Paz Pellat et al., 2016](#)), para predecir condiciones como la reserva de carbono en suelos bajo diferentes usos de suelo, generando modelos predictivos con eficiencias similares a las que se presentan en este estudio. Sin embargo, es preciso puntualizar la necesidad de continuar con los estudios para ampliar el número de sitios de muestreo de tal forma que permitan eventualmente valorar la calidad de estos modelos con objeto de proponerlos como apoyo para la toma de decisiones sobre el manejo que se tiene al interior del PESM.

#### **4.5 Consideraciones sobre la importancia del estudio del suelo dentro del PESM**

El análisis del transecto altitudinal indica tres condiciones representativas para el desempeño hídrico de los suelos del PESM:

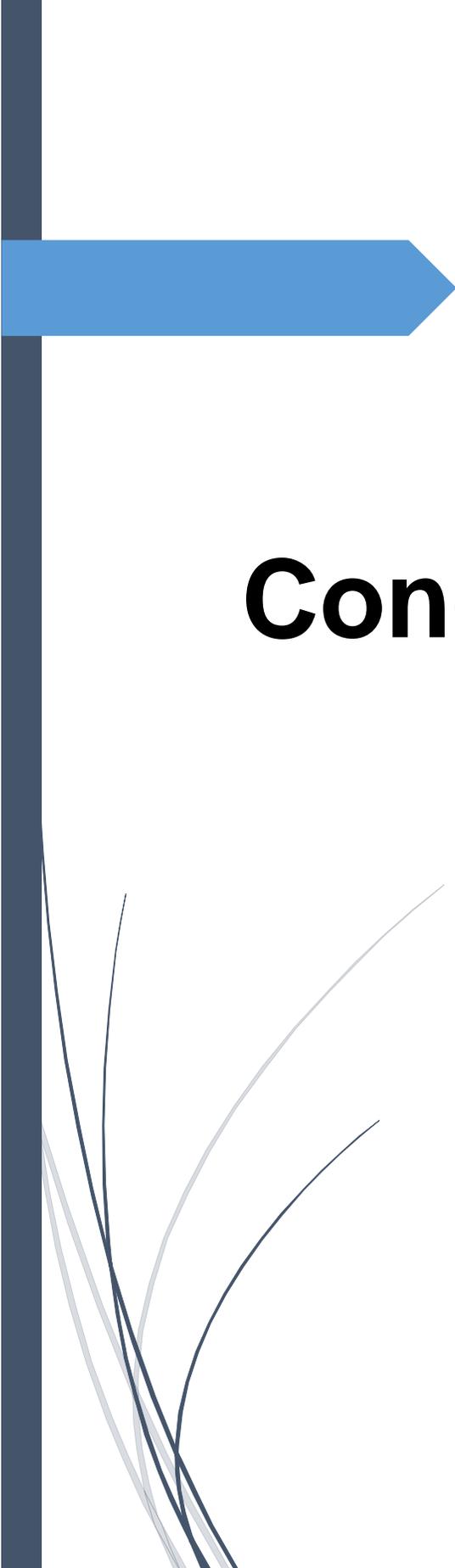
En el primer grupo se ubica el sitio 1 que presentó características singulares en su granulometría, ya que en los primeros 30 cm de profundidad se encontró un suelo con alto contenido en arenas, con una conductividad hidráulica muy elevada, obteniendo los valores más bajos para su PMP, PCC y PS y por el contrario, en los siguientes 30-60 cm de profundidad la muestra presentó contenidos más elevados de arcillas, con una conductividad hidráulica significativamente más baja que la capa superior y valores de más elevados para los parámetros anteriormente mencionados, lo que representa un cambio abrupto en estas condiciones, producto de la incorporación de materiales pétreos exógenos, abonos orgánicos y obras para mejorar el drenaje interno del suelo realizadas en años recientes para favorecer el desarrollo de las plantaciones forestales (Anónimo, 2018). Lo que hasta el momento ha resultado inoperante si se considera la elevada mortalidad de plántulas en el periodo 2018-2020.

En el segundo grupo se pueden ubicar los sitios 2 y 3, altitudinalmente los más bajos, que mostraron características bastante similares entre sí como fue el alto contenido de arcillas en ambas profundidades y una conductividad hidráulica muy lenta en comparación al resto. En cuanto a la HPMP, HCC y HS, se obtuvieron valores muy altos, lo cual se justifica por el elevado contenido de arcillas.

Finalmente, los sitios 4, 5 y 6, revelaron texturas semejantes, abundantes en arena, con una conductividad hidráulica más rápida en comparación con los sitios anteriores y bajos porcentajes de las diferentes condiciones de humedad, lo que lleva a suponer probables condiciones de estrés para las plantas sobre todo durante el periodo final de la época seca. Este grupo de suelos presentó pendientes de entre 0.5° y 5°, que, aunque no son considerables, si pudieron propiciar la erosión

del suelo y mayores tasas de escorrentía previas a la etapa de reforestación, lo que pudiera explicar la remoción de partículas finas en superficie y la prevalencia de texturas gruesas.

Así mismo, se pudo observar que la textura es una propiedad elemental para poder explicar el comportamiento del agua en los suelos, ya que su granulometría es la que determinará la magnitud de los valores de las propiedades hídricas del suelo, necesarias para saber cuan limitadas de agua y oxígeno estarán las raíces para su desarrollo, así como el volumen de agua disponible que un suelo pueda almacenar y finalmente, la velocidad de la conductividad hidráulica.



# Conclusiones

## V. Conclusiones

El crecimiento y desarrollo de las especies arbóreas está altamente influenciado por el comportamiento de las funciones hídricas del suelo, importantes para predecir el comportamiento del agua dentro del suelo a lo largo del año. Actualmente existe una base de información muy escasa acerca de los suelos que conforman al PESM, en consecuencia, resulta muy complejo encontrar datos sobre las propiedades hídricas esenciales de los mismos, por lo que una opción para comenzar a afrontar esta limitante fue justamente abordar con el presente trabajo para definir el desempeño hídrico del suelo a partir de datos de rápida obtención en campo y laboratorio, con lo cual se ha podido generar conocimiento básico al respecto.

De manera general se identificaron tres condiciones sobre el desempeño hídrico de los suelos dentro del Parque Estatal Sierra Morelos, relacionadas significativamente con el contenido de arcillas y arenas, por lo que se pudieron generar modelos de regresión lineal con valores de  $R^2$  superiores a 0.9, que explican el comportamiento hídrico de los suelos. Adicionalmente se pudo establecer que la ubicación de los sitios con respecto a su micro relieve y clase textural determinan la prevalencia de conductividades hidráulicas altas en los sitios de ladera y bajas en las zonas de planicie, lo que puede ocasionar problemas de saturación hídrica durante la época de lluvias, condición que predispone afectaciones al desarrollo radicular de las especies empleadas para reforestar el parque. El estudio detectó que esta condición caracterizada por presentar suelos con alto contenido de arcillas, rangos de humedad disponible elevados y baja conductividad hidráulica se identifican en las partes más bajas de la microcuenca (sitios 2 y 3), denotando que son suelos poco propicios para el establecimiento de vegetación arbórea, ya que si bien cuentan con mayor capacidad de retención de agua, también presentan dificultad para desalojarla, generando implicaciones en el desarrollo de las plantas, ya que sin oxígeno suficiente a causa de exceso de agua en el suelo, los tejidos de las raíces se descomponen, causando en la mayoría de los casos la muerte de las plantas, lo cual corrobora los altos índices de mortalidad que se presentan en estos individuos durante el primer año de su establecimiento. En los suelos de ladera (4, 5 y 6), se

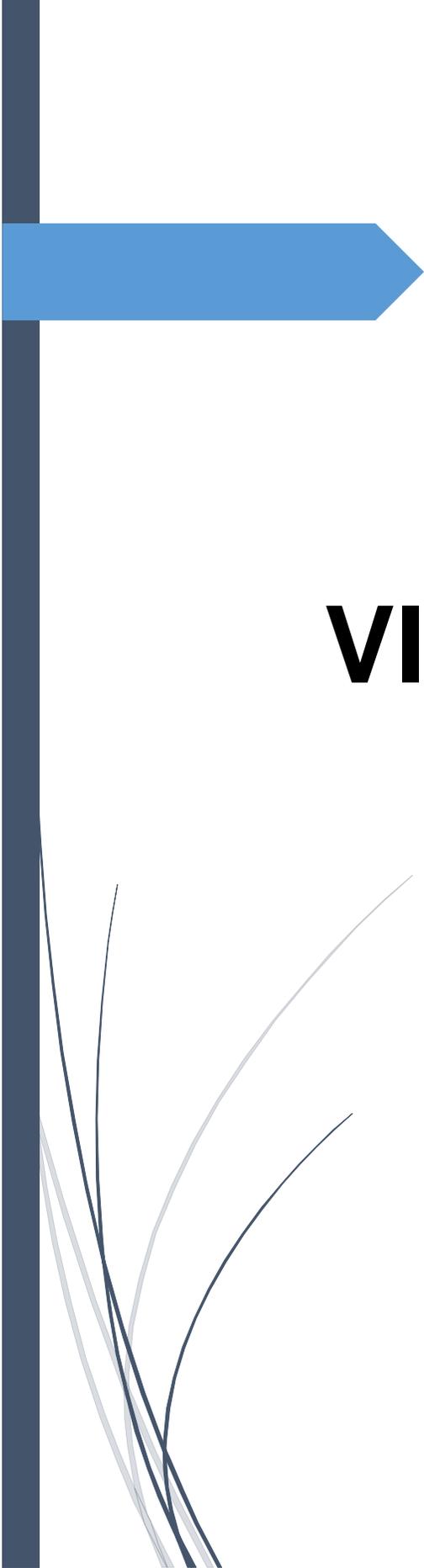
presentan texturas medias y medias gruesas, con mayor contenido de arenas, determinando condiciones de baja disponibilidad de agua al poseer una conductividad hidráulica alta, por lo que es altamente probable que los individuos arbóreos presenten condiciones de estrés hídrico durante la época seca, una de las principales causas de muerte en plantas, y disminución en las tasas de crecimiento; por lo que la posición de determinadas especies arbóreas dentro del gradiente altitudinal estudiado será determinante para establecer futuras plantaciones con especies que sean más tolerantes a estas condiciones.

Los valores de Agua disponible resultaron bajos en las clases texturales ricas en arena, y aumentaron considerablemente en los suelos arcillosos, sin embargo, en el sitio 3 se presentó el valor más alto de Agua disponible, esto a causa de la presencia de las partículas de limo, pues arrojó como resultado la muestra con mayor porcentaje de dichas partículas, siendo este el factor más importante en la formación de una elevada capacidad de retención de Agua disponible en el suelo, debido a que los poros creados entre las partículas de limo son del tamaño que permiten retener agua en el rango disponible para las plantas.

La Conductividad hidráulica tuvo una variación significativa, esto debido principalmente a su correlación con el contenido de arcilla y arena registrados en cada suelo, por lo que en los sitios 4, 5 y 6 que fueron los puntos con mayor porcentaje de partículas de arena, la conductividad hidráulica fue más rápida a la registrada en los sitios 2 y 3, en los que abundaron las partículas arcillosas.

Con respecto a la Densidad aparente, Densidad real y porcentaje de Porosidad de los suelos muestreados, no se encontró una variación considerable entre un sitio y otro, sin embargo, se pudo observar un incremento de la densidad aparente y aunque existe un incremento de la porosidad, este se debe principalmente a poros menores a 2 micras en los que el paso de agua y aire queda fuertemente restringido. Esta condición es representativa de los suelos con contenidos de arcillas superiores al 30 %.

Finalmente, se puede establecer que el conocimiento del desempeño hídrico de los suelos y la generación de modelos predictivos mediante el uso de propiedades de fácil obtención permitirá establecer las limitantes hídricas de los suelos dentro del Parque Estatal Sierra Morelos, y de esta forma contribuir a la eficiencia de los programas de reforestación, pues se espera que con estos datos se posibilite la implementación de planes de reforestación pertinentes y apegados a las características reales de los suelos estudiados, generando así campañas de reforestación con un mayor índice de supervivencia, y contribuyendo con la conservación de uno de los principales pulmones del municipio de Toluca.



# VI. Referencias

## VI. Referencias

- iNaturalist. (2021). *Parque Sierra Morelos, MX, MX* . Obtenido de <https://www.inaturalist.org/places/parque-sierra-morelos#taxon=3>
- Biología del suelo. (2020). *Fases del suelo*. Obtenido de <https://biologiadelsuelo2015.wordpress.com/fases-del-suelo/>
- Cabrera González, R. (Marzo de 1999). *Prácticas Básicas en el Uso y Manejo del Agua. Tesis*. Saltillo, Coahuila, México. Recuperado el 12 de 01 de 2021, de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5460/T10142%20CABRERA%20GONZALEZ,%20ROGELIO%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Carta edafologica 1:50 000. (1976). E-14-A-37. Obtenido de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia\\_hist/1\\_50\\_000/702825658182.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_50_000/702825658182.pdf)
- Castellanos, J. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. Celaya, Guanajuato , México: Intagri.
- CEPANAF. (2017). *Reserva federal, Área de protección y Parques administrados por el Gobierno del Estado de México*. Obtenido de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiFuLaly6HxAhUOMawKHUy3B-YQFjAGegQIERAE&url=https%3A%2F%2Fwww.ipomex.org.mx%2Fipo%2Farchivos%2FdownloadAttach%2F1004471.web&usg=AOvVaw2H\\_IzAJ6vcMgtAmDwZETZQ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiFuLaly6HxAhUOMawKHUy3B-YQFjAGegQIERAE&url=https%3A%2F%2Fwww.ipomex.org.mx%2Fipo%2Farchivos%2FdownloadAttach%2F1004471.web&usg=AOvVaw2H_IzAJ6vcMgtAmDwZETZQ)
- CEPANAF. (11 de 06 de 2021). *Parque Estatal Sierra Morelos*. Obtenido de [http://cepanaf.edomex.gob.mx/parque\\_sierra\\_morelos](http://cepanaf.edomex.gob.mx/parque_sierra_morelos)
- CONAFOR. (2013). *Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica*. Recuperado el 17 de 11 de 2019, de [https://drive.google.com/drive/folders/1gGZAI\\_ABfelY97G5sMDGZlhPPI5hsWwb](https://drive.google.com/drive/folders/1gGZAI_ABfelY97G5sMDGZlhPPI5hsWwb)
- Dorronsoro, C. (2020). *Departamento de Edafología y Química Agrícola Universidad de Granada*. Recuperado el 12 de 01 de 2020, de Tema 3. Constituyentes. Fases líquida y gaseosa: <http://www.edafologia.net/introeda/tema03/tema.htm>

- FAO. (2020). *¿Qué es el Suelo?* Recuperado el 16 de 01 de 2020, de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO. (2020). 9. *Permeabilidad del suelo*. Recuperado el 15 de 01 de 2020, de [http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s09.htm](http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm)
- FAO. (2020). Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe. Recuperado el 02 de 01 de 2020, de <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- FAO. (2020). *Portal de suelos de la FAO*. Recuperado el 15 de 01 de 2020, de Propiedades Físicas del Suelo: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Flores Delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Recuperado el 09 de 01 de 2021, de <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Flores Navarro, M. A. (2016). Efecto del pastoreo sobre el proceso de infiltración del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- García, A. (02 de 08 de 2017). Reforestaciones, sin éxito; sobreviven sólo entre 10 y 15% de los árboles. *El Sol de Toluca*. Recuperado el 28 de 12 de 2019, de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/reforestaciones-sin-exito-sobreviven-solo-entre-10-y-15-de-los-arboles-281308.html>
- GEM. (20 de Diciembre de 2018). *Gaceta de Gobierno*. Obtenido de Periodico Oficial: <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2018/dic201.pdf>
- GEM. (Diciembre de 2018). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano Toluca*. Recuperado el 07 de 2021, de [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes\\_municipales/toluca/pmdutol.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/toluca/pmdutol.pdf)
- Gómez, G. C., Munive Cerrón, R., Mallma Capcha, T., & Orihuela Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 32-43. Recuperado el 31 de 01 de 2021
- Google Earth Pro. (2021). *Sierra Morelos*.

- Graetz, H., Kirchner Salinas, F., & López González, E. (1997). *Suelos y fertilización. Traducción de F. Orozco Luna.*
- Guevara, E., & Márquez, A. (2011). *Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela.* Recuperado el 01 de 09 de 2021, de <http://www.ingenieriadelaagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/BP17rev.pdf>
- Huaroc Meza, R. J., & Porta Borja, J. C. (2014). Potencialidad de tierras y calidad de sitio con fines agroforestales en la microcuenca del río Vilca – Huancavelica. *Tesis*. Universidad Nacional del Centro Del Perú, Perú.
- INEGI. (2020). Climatología. Recuperado el 08 de 02 de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- INEGI. (2020). Cúentame de Mexico. Recuperado el 08 de 02 de 2020, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/clima.a.spx?tema=me&e=15>
- Julca Otiniano, A., Meneses Florian, L., Blas Sevillano, R., & Bello Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de uso en la agricultura . *IDESIA*, 49-61.
- Linares Forero, J. (2012). Aplicacion de un modelo unidimensional para flujo en suelos saturados y no saturados y transporte de herbicidas. Aplicacion en zona centro de la provincia de Córdoba . Córdoba, Argentina. Recuperado el 16 de 01 de 2020, de [https://www.academia.edu/4857371/APLICACION\\_DE\\_UN\\_MODEL\\_O\\_UNIDIMENSIONAL\\_PARA\\_FLUJO\\_EN\\_SUELOS\\_SATURADOS\\_Y\\_NO\\_SATURADOS\\_Y\\_TRANSPORTE\\_DE\\_HERBICIDAS.\\_APLICACION\\_EN\\_ZONA\\_CENTRO\\_DE\\_LA\\_PROVINCIA\\_DE\\_CORDOBA](https://www.academia.edu/4857371/APLICACION_DE_UN_MODEL_O_UNIDIMENSIONAL_PARA_FLUJO_EN_SUELOS_SATURADOS_Y_NO_SATURADOS_Y_TRANSPORTE_DE_HERBICIDAS._APLICACION_EN_ZONA_CENTRO_DE_LA_PROVINCIA_DE_CORDOBA)
- Meza Pérez, E., & Geissert Kientz, D. (Junio de 2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana*, 163-170. Recuperado el 09 de 02 de 2021, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311108002>
- Monico, B. (2020). *StuDocu*. Recuperado el 12 de 01 de 2020, de Tema 10. Agua - Solucion del suelo, tipos de agua en el suelo: higroscopica, capilar, gravifera,: <https://www.studocu.com/es-mx/u/2944340>
- Muñoz Iniestra, D. J., Soler Aburto, A., López Galindo , F., & Hernández Moreno, M. (2013). *Edafología : Manual de métodos de análisis de suelos*. México: UNAM, Facultad de Estudios Superiores Iztacala.

- Niño Gutiérrez, N. S., Melo Gallegos, C., & Sierra Domínguez, G. (2007). *Diagnóstico actual de los recursos naturales del Parque Estatal "Sierra Morelos", Estado de México*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/320042930\\_Diagnostico\\_actual\\_de\\_los\\_recursos\\_naturales\\_del\\_Parque\\_Estatal\\_Sierra\\_Morelos\\_Estado\\_de\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/320042930_Diagnostico_actual_de_los_recursos_naturales_del_Parque_Estatal_Sierra_Morelos_Estado_de_Mexico)
- Novillo Espinoza, I. D., Carrillo Zenteno, M. D., Cargua Chavez, J. E., Cargua Chavez, V., Albán Solarte, K. E., & Morales Intriago, F. L. (Mayo de 2018). *Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador*. Recuperado el 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6587923>
- ONU. (2016). *Noticias de ONU-Habitat América Latina y el Caribe*. Recuperado el 17 de 08 de 2021, de <https://onuhabitat.org.mx/index.php/noticias/noticias-america-latina>
- Ortiz Villanueva, B., & Ortiz Solorio, C. (1984). *Edafología* (Cuarta ed.). Chapingo, México.
- Paz Pellat, F., Espinoza, J., Cruz Gaistardo, C., Etchevers, J., & Jong, B. (01 de 05 de 2016). *Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/305653802\\_Distribucion\\_espacial\\_y\\_temporal\\_del\\_carbono\\_organico\\_del\\_suelo\\_en\\_los\\_ecosistemas\\_terrestres\\_de\\_Mexico/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/305653802_Distribucion_espacial_y_temporal_del_carbono_organico_del_suelo_en_los_ecosistemas_terrestres_de_Mexico/citation/download)
- Pereira Morales, C., Maycotte Morales, C., Restrepo, B., Mauro, F., Calle Montes, A., & Esther Velarde, M. (2011). *Edafología 1*. Recuperado el 15 de 01 de 2020, de Universidad en el Campo UNICA: <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>
- Porta, J., López Acevedo, M., & Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España.
- Quevedo Tejada, D. I. (Noviembre de 2010). *Desarrollo de un modelo conceptual dinamico suelo- vegetacion para zonas áridas y semiáridas*. Recuperado el 11 de 2020, de Tesis: <https://riunet.upv.es/handle/10251/11516>
- Readymap. (2021). *Parque Estatal Sierra Morelos, Toluca de Lerdo*. Obtenido de <http://readymap.mx/6864/39140>
- Salamanca Jiménez, A., & Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relacion con otras propiedades en suelos de la zona caferera colombiana. Colombia. Recuperado el 16 de 01 de 2020, de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>

- Sánchez Corona, V., Castelán Vega, R., & Tamaríz Flores, J. (2008). Variación de las propiedades fisicoquímicas como respuesta al establecimiento de distintas actividades agropecuarias en los luvisoles de la sierra norte de Puebla. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 259-268. Recuperado el 30 de 01 de 2021
- Sánchez Galindo, S. (2005). *Propuesta Educativa para el Área Natural Protegida Parque Estatal Sierra Morelos: Sendero Interpretativo "Los Pinos"*. Universidad de Guadalajara. Recuperado el 07 de 2021
- SEMARNAT; GEM; SMA. (2021). *Ordenamiento ecológico territorial de la zona metropolitana del valle de toluca: siete municipios (Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec)*. Obtenido de <https://dgoia.edomex.gob.mx/sites/dgoia.edomex.gob.mx/files/files/POER%20VALLE%20DE%20TOLUCA.pdf>
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Roma. Obtenido de <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s06.htm#bm06>
- Sierra Domínguez, G. (Ed.). (1999). *Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Sierra Morelos*. México.
- Sierra Dominguez, G. (2005). Parque Estatal Sierra Morelos, Estado de México : Diagnóstico, zonificación y programas para su manejo. *Tesis de maestría*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado el 11 de 04 de 2020, de <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?id=oai:tesis.dgbiblio.unam.mx:000347636>
- Sierra Domínguez, G., Flores Olvera, P., & Pérez Ramírez, C. (2018). Factor de cambio antropogénico detectado en los ecosistemas del parque estatal Sierra Morelos: el crecimiento poblacional. En M. V. Santana Juárez, G. d. Hoyos Castillo, G. Santana Castañeda, F. Zepeda Mondragon, J. R. Calderón Maya, & U. A. MÉXICO (Ed.), *Vulnerabilidad, Resiliencia y Ordenamiento Territorial* (Primera edición ed., págs. 435-459). Toluca, Estado de México, México.
- Sigala Rodríguez, J., González Tagle, M., & Jiménez Pérez, J. (SEPTIEMBRE-OCTUBRE de 2015). Análisis de supervivencia para una reforestación con *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el sur de Nuevo León. *Ciencia UANL*(75), 61-66. Recuperado el 31 de 03 de 2020, de <http://cienciauanl.uanl.mx/wp-content/uploads/2015/10/art.-del-pino.pdf>

- Silva C, P., Silva R, H., Garrido S, M., & Acevedo H, E. (2015). *Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos*. Recuperado el 04 de 01 de 2021, de Universidad de Chile.
- Suelos, Ecología y Agricultura. (2016). Obtenido de <https://sites.google.com/site/suelosecologiayagricultura/triangulo-de-textura>
- Tapia, R., Carmona Crocco, J., & Martinelli, M. (2020). Velocidad de infiltración e infiltración base en dos comunidades arbustivas del desierto hiper árido de San Juan (Argentina). *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. Recuperado el 01 de 09 de 2021
- Thompson, L., & Troeh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad* (Cuarta ed.). España.
- Topographic-map.com. (2021). *Parque Nacional Sierra Morelos*. Obtenido de <https://es-mx.topographic-map.com/maps/ayrl/Parque-Nacional-Sierra-Morelos/>
- Torres Ariza, S. I., & Alejandro Hernández, C. G. (Abril-Mayo de 2016). Programa de “Preservación del Parque Sierra Morelos” del PAI. *Interesatec*(7), 3-4. Recuperado el 23 de 11 de 2019, de <http://www.ittoluca.edu.mx/difusion/pagina%20itt/interesatec/No.%207.pdf>
- USDA. (Agosto de 1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Recuperado el 05 de 12 de 2020, de [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf)
- Valero Sancho, A. (Septiembre de 1999). Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) para las plantas en suelos del Alto y Medio Aragón. *Tesis*. Recuperado el 09 de 02 de 2021
- Veenhuizen, R. (2021). *Revisión de Bases Técnicas*. Recuperado el 12 de 01 de 2021, de [http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/prior/reccat/pdf/capta/rev.pdf](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/reccat/pdf/capta/rev.pdf)
- Vicentini, G., & Perez, V. (Octubre de 2010). Caracterización edafológica de los sitios reforestados con Algarrobo. *XXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Recuperado el 09 de 02 de 2021
- Wightman, K., & Cruz, S. (2003). La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana*, 45-51. Recuperado el 22 de 02 de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750108.pdf>

