



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

PROPIEDADES DEL SUELO Y MESOFAUNA EDÁFICA EN ÁREAS REHABILITADAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

YANETH JUÁREZ SANTOS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: "**Propiedades del suelo y mesofauna edáfica en áreas rehabilitadas de la cuenca del Río Chapingo**", realizada por la alumna: **Yaneth Juárez Santos**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR



CONSEJERO:

DR. ENRIQUE OJEDA TREJO

ASESOR:



DR. DEMETRIO SALVADOR FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESORA:



DRA. IRMA DÍAZ AGUILAR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2020

PROPIEDADES DEL SUELO Y MESOFAUNA EDÁFICA EN ÁREAS REHABILITADAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

Yaneth Juárez Santos, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

La rehabilitación de suelos degradados a partir de tepetates, generalmente se realiza a partir de reforestaciones y prácticas de conservación de suelo. Sin embargo, existen pocos estudios que evalúen el efecto que han tenido estas actividades sobre la formación del suelo y sobre la diversidad de la fauna del suelo. En este estudio se analizaron cuatro áreas rehabilitadas partir de tepetates con reforestaciones de *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata* y un sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*, sobre obras de conservación en terrazas y zanjas trinchera en dos tipos de tepetate (rojo y blanco); sobre el efecto en el desarrollo del perfil del suelo, las propiedades físico-químicas y la diversidad de la mesofauna, ácaros y colémbolos, en la cuenca del río Chapingo. Se describieron perfiles de suelo y se realizaron análisis de propiedades físicas y químicas, así como, la identificación de la mesofauna de la hojarasca. Los resultados indicaron que el material parental influye en las características físicas del suelo y el tipo de vegetación en las propiedades químicas de este. Los suelos más desarrollados fueron los de la vegetación nativa de *Q. rugosa* y en las reforestaciones los suelos más someros fueron los de *P. radiata* y *E. globulus* y los más profundos los de *P. montezumae*. El mayor cambio en las propiedades químicas se produjo en el pH, de moderadamente ácido en el sitio de referencia a pH neutros en los sitios rehabilitados, en los sitios rehabilitados el porcentaje de saturación de bases se redujo considerablemente (80%) y se incrementó la disponibilidad de nutrimentos. El sitio de referencia, bosque natural, presentó una abundancia y diversidad de mesofauna diferente a la de las reforestaciones. Los tipos de especie arbóreas utilizadas en las reforestaciones formaron mantillos forestales con diferentes características que se relacionaron con la abundancia, riqueza de órdenes y subórdenes y dominancia relativa de colémbolos y ácaros lo que resalta la importancia de la especie forestal utilizada en las reforestaciones y en la estructuración de la mesofauna edáfica.

Palabras clave: Tepetates, rehabilitación, formación de suelo, mesofauna edáfica.

SOIL PROPERTIES AND EDAPHIC MESOFAUNA IN REHABILITATED AREAS OF THE CHAPINGO RIVER BASIN

Yaneth Juárez Santos, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

The rehabilitation of degraded soils from tepetates is generally carried out through reforestations and soil conservation practices. However, there are few studies that evaluate the effect these activities have had on soil formation and on the diversity of soil fauna. In this study, four rehabilitated areas were analyzed from tepetates with reforestations of *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata* and a reference site with the native *Quercus rugosa* vegetation, on conservation works in terraces and trenches in two types of tepetate (red and white), on the effect on the development of the soil profile, the physical-chemical properties and the diversity of mesofauna, mites and collembola, in the Chapingo river basin. Soil profiles were described and analyzes of physical and chemical properties were carried out, as well as the identification of the mesofauna of the litter. The results indicated that the parental material influences the physical characteristics of the soil and the type of vegetation in its chemical properties. The most developed soils were those of the native vegetation of *Q. rugosa* and in the reforestations the shallowest soils were those of *P. radiata* and *E. globulus* and the deepest those of *P. montezumae*. And The greatest change in chemical properties occurred in the pH, of moderately acidic in the reference site at neutral pH in the rehabilitated sites, in the rehabilitated sites the percentage of base saturation was considerably reduced (80%) and the availability of nutrients increased. The reference site, natural forest, presented an abundance and diversity of mesofauna very different from that of reforestations. The types of tree species used in the reforestations formed forest mulches with different characteristics that were related to the abundance, richness of orders and sub-orders and relative dominance of collembola and mites, which highlights the importance of the forest species used in reforestations in the structuring the diversity of the edaphic mesofauna.

Keywords: Tepetates, rehabilitation, soil formation, edaphic mesofauna.

DEDICATORIA

A mis padres Sr. Antonio Juárez García y Sra. Silvia Santos Calvo, por su amor, enseñanzas, valores y confianza, por ser ustedes la motivación para continuar superando retos.

A mis hermanos Patrick, Marco, Leo, Areli y Emmanuel por su apoyo y por la confianza depositada en mí.

A mi esposo y compañero de vida Miguel Ángel, por tu amor, comprensión y apoyo, porque tomaste este reto como tuyo.

Al pequeño gran amor de mi vida, porque tu llegada me inspira a esforzarme más cada día.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme concluir esta etapa de mi vida, por ser mi guía y mi fortaleza en los momentos difíciles.

Al CONACYT por el financiamiento otorgado para la culminación de esta etapa.

Al Colegio de Postgraduados por proporcionarme las herramientas necesarias para mi formación.

A los profesores del Colegio de Postgraduados que, en algún momento de mi estancia, con su experiencia y conocimiento contribuyeron a mi formación.

Al Dr. Enrique Ojeda Trejo por su entera disposición, consejos y tiempo brindados durante mi estancia en el postgrado.

Al Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, por sus importantes aportaciones a este trabajo por su tiempo y apoyo.

A la Dra. Irma Díaz Aguilar por sus enseñanzas, tiempo, paciencia y dedicación a la culminación de este trabajo.

Al MC. Patricio Sánchez Guzmán por su valioso apoyo tanto en la fase de campo como en laboratorio, por sus importantes aportaciones a esta investigación.

Al Dr. Jorge Valdez, del postgrado en Entomología y Acarología del Colegio de Postgraduados por su gran apoyo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO I. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LOS SUELOS DERIVADOS DE TEPETATES EN ÁREAS REHABILITADAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO	4
1.1. RESUMEN.....	4
1.2. ABSTRACT	5
1.3. INTRODUCCIÓN.....	6
1.3.1. Suelos degradados	6
1.3.2. Rehabilitación de suelos degradados.....	7
1.3.3. Rehabilitación de suelos en México	8
1.3.4. Antecedentes de degradación y restauración de la zona oriente del lago de Texcoco	9
1.3.5. Evaluación de obras de reforestación y conservación de suelos en la zona oriente del lago de Texcoco	12
1.4. OBJETIVOS	14
1.4.1. Objetivo general	14
1.4.2. Objetivos específicos	14
1.5. MATERIALES Y MÉTODOS	15
1.5.1. Área de estudio	15
1.5.2. Áreas de muestreo	16
1.5.3. Ubicación de los sitios de muestreo.....	20
1.5.4. Descripción de perfiles de suelo.....	22
1.5.5. Muestreo de suelos.....	23
1.5.6. Análisis de suelos.....	23

1.5.7. Análisis estadístico.....	24
1.6. RESULTADOS	25
1.6.1. Desarrollo de perfiles de suelos en las áreas rehabilitadas	25
1.6.1.1. Área 1. Reforestación con <i>Cupressus lindleyi</i> en zanjas trinchera sobre tepetate rojo	25
1.6.1.2. Área 2. Reforestación con <i>Pinus montezumae</i> en zanjas trinchera sobre tepetate rojo	27
1.6.1.3. Área 3. Reforestación con <i>Eucalyptus globulus</i> en terrazas sobre tepetate blanco.....	29
1.6.1.4. Área 4. Reforestación con <i>Pinus radiata</i> en terrazas sobre tepetate blanco.....	31
1.6.1.5. Área 5. Sitio de referencia con vegetación nativa de <i>Quercus</i> <i>rugosa</i> sin práctica de conservación sobre suelo volcánico.....	33
1.6.1.6. Comparación del desarrollo de los perfiles de suelo de las áreas rehabilitadas con el sitio de referencia	35
1.6.2. Propiedades físicas de los suelos en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia.....	37
1.6.2.1. Color del suelo	37
1.6.2.2. Densidad aparente (Dap).....	40
1.6.2.3. Textura.....	41
1.6.3. Propiedades químicas de los suelos en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia.....	42
1.6.3.1. pH	43
1.6.3.2. Materia Orgánica (MO)	44
1.6.3.3. Contenido de nitrógeno total	45
1.6.3.4. Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)	46
1.6.3.5. Sodio (Na).....	47
1.6.3.6. Calcio (Ca).....	49
1.6.3.7. Potasio (K)	50
1.6.3.8. Magnesio (Mg)	51
1.6.3.9. Porcentaje de saturación de bases (PSB)	52

1.6.3.10. Contenido de carbonatos	53
1.7. DISCUSIÓN.....	54
1.7.1. Desarrollo de perfiles de suelos en las áreas rehabilitadas	54
1.7.2. Propiedades físicas	57
1.7.3. Propiedades químicas.....	59
1.8. CONCLUSIONES.....	63
1.9. LITERATURA CITADA	65
CAPITULO II. EFECTO DE LAS REFORESTACIONES SOBRE LA MESOFAUNA EDÁFICA EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO	74
2.1. RESUMEN.....	74
2.2. ABSTRACT	75
2.3. INTRODUCCIÓN.....	76
2.4. OBJETIVOS	79
2.4.1. Objetivo general	79
2.4.2. Objetivo específico	80
2.5. MATERIALES Y MÉTODOS	81
2.5.1. Área de estudio	81
2.5.2. Áreas seleccionadas	82
2.5.3. Sitios de muestreo.....	84
2.5.4. Muestreo de la mesofauna.....	84
2.5.5. Variables ambientales	85
2.5.6. Extracción e identificación taxonómica de mesofauna	86
2.5.7. Análisis estadístico.....	88
2.6. RESULTADOS	90
2.6.1. Abundancia de colémbolos y ácaros en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia.....	90
2.6.2. Riqueza de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden.....	96
2.6.3. Dominancia de órdenes y subórdenes	97
2.7. DISCUSIÓN.....	99
2.8. CONCLUSIONES	103
2.9. LITERATURA CITADA	104

CONCLUSIONES GENERALES	113
RECOMENDACIONES	114
ANEXOS	115

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Profundidad de los horizontes del perfil del suelo en centímetros, en cada área de estudio.....	35
Cuadro 1.2. Color en seco con las cartas Munsell de los sitios de muestreo en las reforestaciones y sitio de referencia.	38
Cuadro 1.3. Color en húmedo con las cartas Munsell de los sitios de muestreo en las reforestaciones y sitio de referencia.	39
Cuadro 1.6. Diferencias en las propiedades químicas entre áreas estudiadas.	43
Cuadro 1. 8. Comparación de valores de propiedades químicas del tepetate en 1992 y después de la rehabilitación en 2019.	59
Cuadro 2.1. Medias de las variables ambientales del mantillo forestal de las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia.	85
Cuadro 2.2. Porcentajes de las abundancias de ácaros y colémbolos colectados en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.	90
Cuadro 2.3. Valores de abundancia relativa (DV') de ácaros y colémbolos en la hojarasca de cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia, ordenados de acuerdo con los valores de (DV') del sitio de referencia (A5).	97
Cuadro A 1. Propiedades químicas de los suelos en las cinco áreas estudiadas...	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Condiciones originales del tepetate en los años 1970 (Cruickshank, 1998).....	9
Figura 1.2. Áreas degradadas en 1974 y reforestadas en 2012, en la zona oriente del lago de Texcoco ubicada en la cuenca del río Chapingo. (Márquez-Zarate, 2013).....	11
Figura 1.3. Actividades de roturación de tepetates con maquinaria pesada en 1974 (Cruickshank, 1995).	12
Figura 1.4. Ubicación de la cuenca del río Chapingo, en Tequesquináhuac, en el municipio de Texcoco, Estado de México.	16
Figura 1.5. Recorridos realizados para identificar las áreas reforestadas y el sitio con vegetación nativa, en la cuenca del río Chapingo.	17
Figura 1.6. Distribución de áreas rehabilitadas dentro de la cuenca del río Chapingo. a) Obras de conservación de suelos y especies reforestadas y b) Áreas de estudio seleccionadas.....	19
Figura 1.7. Distribución de los sitios de muestreo en las áreas seleccionadas.....	20
Figura 1.8. Panorámica del Área 1, rehabilitada con reforestación de <i>Cupressus lindleyi</i> en zanjas trinchera, en la cuenca del río Chapingo.	21
Figura 1.9. Panorámica del Área 2, rehabilitada con reforestación de <i>Pinus montezumae</i> en zanjas trinchera en la cuenca del río Chapingo.....	21
Figura 1.10. Panorámica del Área 3, rehabilitada con reforestación de <i>Eucalyptus globulus</i> en terrazas en la cuenca del río Chapingo.	21
Figura 1.11. Panorámica del Área 4, rehabilitada con reforestación de <i>Pinus radiata</i> en terrazas en la cuenca del río Chapingo.....	22
Figura 1.12. Panorámica del Área 5, sitio de referencia con vegetación natural de <i>Quercus rugosa</i> , sin obras de conservación de suelos en la cuenca del río Chapingo.....	22
Figura 1.13. a) Panorámica de la reforestación con <i>Cupressus lindleyi</i> , b) ubicación de la reforestación respecto a la práctica de conservación	

de suelo, en zanjas trinchera, c) esquema de la obra de conservación y la reforestación, d) perfil de suelo formado a partir de tepetate rojo.	26
Figura 1.14. a) Panorámica de la reforestación de <i>Pinus montezumae</i> , b) estrato herbáceo y superficie del suelo cubierto por acículas de pino, c) esquema de la reforestación y práctica de conservación de suelo en zanjas trinchera, d) perfil del suelo a partir de tepetate rojo.....	28
Figura 1.15. a y b) panorámicas de la reforestación de <i>Eucalyptus globulus</i> , c) esquema de la reforestación con las prácticas de conservación, los árboles se encuentran plantados en terrazas, d) perfil del suelo en el área reforestada.....	29
Figura 1.16. a) Panorámica de la reforestación con <i>Pinus radiata</i> , b) esquema de la reforestación y prácticas de conservación en terrazas, c) Perfil del suelo en el área reforestada.	31
Figura 1.17. a) Panorámica de la vegetación natural con <i>Quercus rugosa</i> , b) superficie del suelo con acumulación de materia orgánica, c) perfil del suelo en la vegetación nativa.	33
Figura 1.18. Esquema de los perfiles de suelo en áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.....	35
Figura 1. 19. Densidad aparente en los suelos de cuatro áreas rehabilitadas y un sitio con vegetación nativa en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).....	40
Figura 1.20. Clases texturales de acuerdo a las medias de los porcentajes de arena, limo y arcilla, en las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia.	41
Figura 1.21. Promedio del porcentaje de arenas, limo y arcilla, en los suelos de cuatro áreas rehabilitadas y un sitio con vegetación nativa en la cuenca de río Chapingo.	42
Figura 1.22. Valores de pH en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	44

Figura 1.23. Porcentaje de materia orgánica en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	45
Figura 1.24. Porcentaje de nitrógeno en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	46
Figura 1.25. Valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	47
Figura 1.27. Contenido de sodio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	48
Figura 1.28. Contenido de calcio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	49
Figura 1.29. Contenido de potasio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$)	50
Figura 1.30. Contenido de magnesio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	51
Figura 1.26. Porcentaje de saturación de bases de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	52
Figura 1.31. Contenido de carbonatos en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo.	

Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	53
Figura 1.32. Esquematzación del proceso de intemperismo del tepetate posterior a la roturación con maquinaria pesada (INTAGRI, 2017).	55
Figura 2.1. Localización de la Cuenca del río Chapingo, en el municipio de Texcoco, Estado de México.	81
Figura 2.2. Áreas reforestadas y sitio de referencia dentro de la cuenca del río Chapingo.....	83
Figura 2.3. Ubicación de los sitios de muestreo en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.....	84
Figura 2.4. Proceso de extracción de mesofauna edáfica. a) Vista de los embudos Berlese-Tullgren b) Canastilla con hojarasca. c) Muestra de hojarasca tomada en campo.	87
Figura 2.5. Diversidad y abundancia de mesofauna observada en el microscopio estereoscópico en una muestra de hojarasca en el área 2 reforestada con <i>Pinus montezumae</i>	88
Figura 2.6. Abundancia de colémbolos en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia, con <i>Q. rugosa</i> , en la cuenca del río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).	92
Figura 2.7. Abundancia de ácaros en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia, con <i>Q. rugosa</i> , en la cuenca del río Chapingo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha =$ 0.05).....	92
Figura 2.8. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el A5 del sitio de referencia con la vegetación nativa de <i>Quercus rugosa</i>	93
Figura 2.9. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A1 con <i>Cupressus lindleyi</i>	94
Figura 2.10. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A2 con <i>Pinus montezumae</i>	94

Figura 2.11. Porcentajes de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A3 con <i>Eucalyptus globulus</i>	95
Figura 2.12. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A4 con <i>Pinus radiata</i>	95
Figura 2.13. Riqueza de órdenes y subórdenes estimada por curvas de rarefacción basadas en el número de individuos de mesofauna, ácaros y colémbolos, colectados en cuatro áreas reforestadas y un sitio de referencia. La estimación se estandarizó a un tamaño de muestra de 1776 individuos indicado por la flecha.....	96
Figura 1A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A1 con <i>Cupressus lindleyi</i>	117
Figura 2A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A2 con <i>Pinus montezumae</i>	117
Figura 3A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A3 con <i>Eucalyptus globulus</i>	118
Figura 4A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A4 con <i>Pinus radiata</i>	118
Figura 5A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A5 sitio de referencia con vegetación nativa de <i>Quercus rugosa</i>	119

INTRODUCCIÓN GENERAL

El suelo es un cuerpo natural constituido por sólidos, líquidos y gases, presenta horizontes bien diferenciados cuyas características se deben a diversos factores como el material parental, la presencia de materia orgánica y los diversos procesos que se llevan a cabo en él. Las propiedades del suelo dependen de sus constituyentes minerales y orgánicos, la proporción de cada uno de ellos y de sus flujos y fluctuaciones tanto en el espacio como en el tiempo (Donoso-Zegers, 1992; Thiers *et al.*, 2014).

Los suelos cambian de acuerdo con el uso que tengan y los más cercanos a las condiciones naturales generalmente se encuentran en las zonas boscosas. La presencia de un horizonte orgánico bien definido sobre el suelo mineral es una característica relevante de suelos forestales saludables (Schlatter, 1993) y sus propiedades físicas, químicas y biológicas, son factores esenciales en la regulación general de este sistema sobre la superficie terrestre.

El uso del suelo, la intensificación de la deforestación, la agricultura y la expansión urbana son los factores asociados a la degradación del suelo. De acuerdo con la FAO (2019), la degradación del suelo se define como un cambio en el estado del suelo que resulta en una disminución de su capacidad para proporcionar bienes y servicios. La degradación del suelo es un gran reto porque tiene importantes repercusiones en la sostenibilidad y servicios ecosistémicos que el suelo proporciona. Sin embargo, el estado de los suelos con un alto grado de degradación sigue actualmente estando muy poco caracterizados a escala global (Valentin, 2018).

La degradación del suelo se hace visible en casos extremos con el afloramiento de horizontes subsuperficiales, denominados tepetates. La aparición del tepetate (horizonte C) en la superficie terrestre indica un proceso avanzado de degradación del suelo; entendiéndose como tepetates a una capa de tobas, flujos piroclásticos o antiguas cenizas volcánicas endurecidas incorporadas en el perfil del suelo y que

afloran en condiciones de erosión extrema resultado de la eliminación de la cubierta vegetal (Etchevers-Barra *et al.*, 2006).

El proceso de afloramiento de tepetates comienza con la desaparición de la cubierta vegetal, seguido de la pérdida del suelo superficial, principalmente en áreas con pendiente, por erosión laminar, canalillos o erosión en cárcavas. De este modo el subsuelo queda expuesto y se erosiona por episodios alternados de lluvia y periodos secos hasta dejar al descubierto únicamente los horizontes más endurecidos.

Existen distintos métodos de restauración o rehabilitación de suelos degradados (SER, 2004). En sitios altamente degradados la estrategia aplicada es la rehabilitación, cuyo objetivo es revertir la tendencia, pero no tiene la finalidad de devolver al suelo a su estado inicial, de tal modo que se puedan evitar o atenuar los efectos adversos de su degradación (Valentin, 2018). Por tanto, la vegetación es el componente que más rápidamente evidencia los impactos y las acciones de recuperación del suelo en áreas altamente degradadas. Para ello se realizan actividades como la reforestación y en algunos casos la construcción de obras de conservación de suelo. La importancia de la revegetación en zonas degradadas radica en la aportación de materia orgánica al suelo a través de la hojarasca, que se deposita en la superficie del suelo y se descompone por la acción de factores ambientales y biológicos, como la fauna del suelo (SER, 2004; Chazdon, 2008; Bradshaw y Sykes, 2014).

La presencia o ausencia de fauna del suelo es un indicador del grado de perturbación y recuperación del suelo forestal (Socarrás y Rodríguez, 2007). La fauna del suelo se clasifica de acuerdo con su tamaño en macro, meso y microfauna. Entre sus funciones esta la descomposición de la materia orgánica, la formación de la estructura del suelo, influyen en el ciclo de nutrientes y forman interacciones con otros organismos (Coleman *et al.*, 2004). Los grupos más representativos de la mesofauna son los ácaros y colémbolos; esta fauna del suelo con tamaños entre 0.2 mm y 2 mm es muy diversa y participa activamente en la descomposición de la materia orgánica,

principalmente en los horizontes orgánicos. Además, se caracterizan por tener diferentes estrategias de alimentación, que los ubican en diferentes posiciones tróficas en la cadena alimenticia, sus funciones en los procesos del suelo son muy diversas y habitan principalmente en los horizontes superficiales del suelo; principalmente aquellos ricos en materia orgánica. La vegetación es un factor importante en la composición de las comunidades de la mesofauna, por lo tanto, un cambio o perturbación en la vegetación puede tener un efecto en la estructura de las comunidades y diversidad de la mesofauna (Socarrás, 2013; Socarrás e Izquierdo, 2014).

En la cuenca del río Chapingo, a inicios de los años 70, se realizaron actividades de rehabilitación de áreas degradadas donde afloraban distintos tipos de tepetate; las actividades incluyeron reforestaciones con diferentes especies forestales exóticas, así como la construcción de obras de conservación de suelo.

En este estudio se evaluó el desarrollo de los suelos después de casi cincuenta años de haberse realizado actividades de rehabilitación de las áreas degradadas en la cuenca del río Chapingo, y conocer el grado de formación del perfil de suelo, a partir del tepetate. Además, se estimó la riqueza y abundancia de la mesofauna de la hojarasca y se evaluó si las reforestaciones han favorecido el establecimiento de diversos taxones de mesofauna del suelo.

CAPITULO I. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LOS SUELOS DERIVADOS DE TEPETATES EN ÁREAS REHABILITADAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

1.1. RESUMEN

Uno de los objetivos del Plan Lago de Texcoco de 1973 fue la rehabilitación de áreas degradadas con presencia de tepetates. Existen pocos estudios donde se evalúe el efecto que han tenido las actividades de rehabilitación sobre el desarrollo y las propiedades del suelo en áreas rehabilitadas de la cuenca del río Chapingo. En este estudio se evaluó el desarrollo de los suelos y sus propiedades en áreas rehabilitadas mediante reforestaciones de *Eucalyptus globulus* con terrazas en tepetate blanco, *Cupressus lindleyi* con zanjas trinchera en tepetate rojo, *Pinus montezumae* con zanjas trinchera en tepetate rojo y *Pinus radiata* con terrazas en tepetate blanco y se comparó con un sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*. Se describieron perfiles de suelo por cada área y se analizaron las propiedades físicas y químicas. Los suelos más profundos se encontraron en *Q. rugosa* y *E. globulus* los menos profundos en el área con *P. montezumae* y *P. radiata*. Se presentó un mayor desarrollo de horizonte en los suelos del sitio de referencia y el área con *C. lindleyi* y menor desarrollo en áreas de *P. montezumae* y *P. radiata*. Los suelos del sitio de referencia fueron ácidos, con alto contenido de materia orgánica y nitrógeno y bajo contenido de Na, K, Ca, Mn y carbonatos. Mientras que en las áreas rehabilitadas se obtuvieron suelos con pH ácidos a neutros, menor contenido de materia orgánica y nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico, Na, K, Ca, Mn y carbonatos menores a los obtenidos en el sitio de referencia. Las características del material original (tepetate) influyen en características físicas del suelo, mientras que el tipo de vegetación ejerce influencia en las propiedades químicas.

Palabras clave: rehabilitación; tepetates, áreas degradadas, reforestación, propiedades del suelo.

1.2. ABSTRACT

One of the objectives of the Plan Lago de Texcoco of 1973 was the rehabilitation of degraded areas with the presence of tepetates. There are few studies evaluating the effect that rehabilitation activities have had on development and soil properties in rehabilitated areas of the Chapingo River basin. In this study, the development of the soils and their properties in rehabilitated areas were evaluated through reforestations of *Eucalyptus globulus* with terraces in white tepetate, *Cupressus lindleyi* with trenches in red tepetate, *Pinus montezumae* with trenches in red tepetate and *Pinus radiata* with terraces in white tepetate and was compared with a reference site with native *Quercus rugosa* vegetation. Soil profiles were described for each area and the physical and chemical properties were analyzed. The deepest soils were found in *Q. rugosa* and *E. globulus*, the shallowest in the area with *P. montezumae* and *P. radiata*. There was a greater development of horizon in the soils of the reference site and the area with *C. lindleyi* and less development in areas of *P. montezumae* and *P. radiata*. The soils of the reference site were acidic, with a high content of organic matter and nitrogen and low content of Na, K, Ca, Mn and carbonates. While in the rehabilitated areas soils with acidic to neutral pH, lower content of organic matter and nitrogen and cation exchange capacity, Na, K, Ca, Mn and carbonates lower than those obtained in the reference site were obtained. The characteristics of the original material (tepetate) influence the physical characteristics of the soil, while the type of vegetation influences the chemical properties.

Keywords: rehabilitation; tepetates, degraded areas, reforestation, soil properties.

1.3. INTRODUCCIÓN

1.3.1. Suelos degradados

En un suelo degradado sus condiciones bióticas y abióticas, así como las interacciones entre estos factores se encuentran en desequilibrio, por lo que su diversidad, complejidad, productividad y capacidad de carga disminuyen considerablemente. Las causas más comunes de degradación del suelo son las de origen antrópico, entre las que se encuentran la deforestación, la contaminación por el uso de agroquímicos y el cambio de uso de suelo (Lal y Stewart, 1990). Montoya-Greenheck (2005) define la degradación del suelo como la disminución de su calidad y por lo tanto su productividad actual y potencial. La disminución en la calidad de un suelo puede ser causada por alteraciones desfavorables en una o todas las propiedades del suelo.

Similarmente, Cardoza-Vázquez *et al.* (2007) mencionan que la degradación es la disminución de la capacidad presente o futura de sostener vida, por causas naturales o antrópicas, Lal *et al.* (1989) y Blum (1998) consideran la degradación como un desbalance de una o todas sus funciones que causan el deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que pueden llegar a ocasionar la destrucción total del suelo.

El uso del suelo para la producción intensiva de alimentos, forrajes y materias primas es uno de los usos que más contribuyen a la degradación del suelo (FAO, 2015), en los suelos forestales un manejo inadecuado puede llevar a una pérdida completa de este recurso (Blum, 1998). Además, los efectos de la eliminación de la cobertura boscosa sobre el suelo incluyen una mayor erodabilidad (erosión por agua), pérdida de materia orgánica, reducción en la biodiversidad del suelo, así como cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Montoya-Greenheck, 2005).

La degradación del suelo se hace visible en un caso extremo con el afloramiento de horizontes subsuperficiales donde se ha eliminado la cubierta vegetal, donde el suelo superficial ha sido erosionado y afloran los horizontes endurecidos denominados tepetates (Etchevers-Barra *et al.*, 2006). Gama-Castro *et al.* (2007), define al tepetate como un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, que se encuentra comúnmente en los paisajes volcánicos de México, subyaciendo a suelos o bien aflorando en la superficie, mientras que Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) menciona que desde el punto de vista macromorfológico y micromorfológico el tepetate se considera una saprolita, que es una toba volcánica intemperizada *in situ*.

1.3.2. Rehabilitación de suelos degradados

Un ecosistema perturbado tiene la capacidad para regenerarse por sí mismo al eliminar el factor que provoca la alteración y no requerir la intervención humana para volver a su condición original y continuar con sus procesos ecológicos (Hernández y Pastor, 2008). Sin embargo, cuando un ecosistema ha perdido sus mecanismos de regeneración por sí mismo, requiere de la intervención humana que asegure el desarrollo de los procesos de recuperación (Vargas-Ríos, 2011). Por tanto, la rehabilitación es una práctica que se ha utilizado ampliamente en la recuperación de suelos muy degradados, cuyo objetivo es revertir la tendencia (Valentin, 2018).

El SER (2004) indica que la restauración y la rehabilitación comparten un enfoque fundamental que es tomar como base un modelo o ecosistema de referencia, pero estas dos actividades difieren en sus objetivos y estrategias. La rehabilitación persigue el restablecer la productividad y los servicios de un ecosistema para suministrar productos; pero no tiene la finalidad de devolver al suelo a su estado original. Mientras que la meta de la restauración es restablecer de la complejidad de todos los atributos preexistentes del ecosistema. Generalmente, un ecosistema muy degradado se comienza por rehabilitar, para reparar en el menor tiempo posible los procesos ecológicos (Rovere, 2010).

En condiciones de pérdida extrema de suelo se requieren programas de rehabilitación para optimizar el establecimiento de cobertura vegetal y, posteriormente, la formación de suelo. Un primer paso es seleccionar especies que puedan tolerar las condiciones ambientales de los sitios degradados (Gómez-Romero *et al.*, 2012) y la implementación de prácticas de conservación de suelos que favorezcan el establecimiento de la cubierta vegetal y retención de humedad. Las reforestaciones son una estrategia de rehabilitación de zonas altamente degradadas donde la pérdida de la cubierta vegetal ha propiciado procesos de erosión, formación de cárcavas, pérdida de la fertilidad del suelo y de la biodiversidad de organismos (Pensado-Fernández *et al.*, 2014; Ventura-Ríos *et al.*, 2017).

1.3.3. Rehabilitación de suelos en México

En México la estrategia más aplicada para la rehabilitación de áreas degradadas con afloramiento de tepetates es la construcción de obras de conservación de suelos y la reforestación (Pensado-Fernández *et al.*, 2014; Ventura-Ríos *et al.*, 2017); para ello se han utilizado especies de coníferas y latifoliadas, que en muchas ocasiones son especies exóticas como *Eucaliptus* spp., *Casuarina* spp., *Pinus radiata*, *Acacia* spp., *Schinus molle*, entre otras (Carabias *et al.*, 2007).

Las áreas con tepetates representan una limitante para la producción agrícola o reforestación; sin embargo, desde tiempos prehispánicos estas áreas han sido reincorporadas a la agricultura mediante la construcción de terrazas, actividades como el relleno con suelo fértil, rompimiento de capas endurecidas y la incorporación de abonos (Arias, 1992; Báez-Pérez *et al.*, 2007).

Las plantaciones forestales han sido una opción viable para la reforestación de áreas con tepetates, debido a la utilización de especies arbóreas de crecimiento rápido y fácil adaptabilidad, características que permiten acelerar los procesos para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Ortiz-Torres *et al.*, 2018).

1.3.4. Antecedentes de degradación y restauración de la zona oriente del lago de Texcoco

Los problemas de degradación de las cuencas que desembocan en el ex-lago de Texcoco comenzaron en el siglo XVI, como consecuencia de la eliminación de la cobertura vegetal debido a la tala de árboles. A partir de 1921 con la dotación de tierras a los ejidos y la autorización de la explotación del bosque por la compañía papelera San Rafael, la degradación del bosque y erosión del suelo fue más severa (Ojeda-Trejo *et al.*, 2015).

Para 1970 la parte media de las cuencas se encontraba totalmente degradada debido a la deforestación, existían áreas muy erosionadas (Figura 1.1) y presencia de cárcavas. Gran cantidad de azolves y escurrimientos descargaban en el Lago de Texcoco, reduciendo su capacidad de regulación. Además, las superficies sin vegetación y la acumulación de suelo, polvo, basura y detritus en la zona del lago producían grandes tolveneras que se dirigían a la ciudad de México (Cruickshank, 1995).

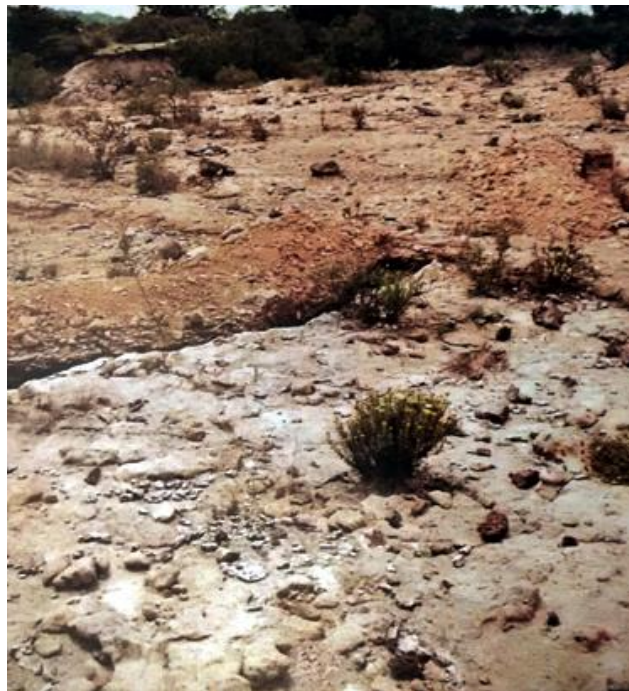


Figura 1.1. Condiciones originales del tepetate en los años 1970 (Cruickshank, 1998).

En 1971 debido a las tolvaneras del Lago de Texcoco, se instituyó el Plan Lago de Texcoco (PLT) con el objetivo de implementar un programa para recuperar el ecosistema en el vaso del lago y la zona oriente, donde se encuentra el área montañosa y favorecer su función como vaso regulador (Pimentel-Bribiesca, 1992; Becerra-Luna, 1998).

Con el PLT de 1973-2003, en la zona oriente del lago de Texcoco, se roturaron con maquinaria pesada 9,323 ha de tepetate, se construyeron 1,553 ha de terrazas, 348 ha de zanjas trincheras y 214 ha de cepas para reforestación, además se construyeron 1,150 presas de mampostería y gaviones. La superficie total reforestada fue de 16,387 ha. En las reforestaciones se utilizaron diversas especies arbóreas exóticas como *Cupressus lindleyi*, *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus spp.*, *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus oaxacana* y *Pinus michoacana*, entre otras especies (Cruickshank, 1998 y 2003). En la Figura 1.2 se muestran las diferencias entre 1974 y 2012 en las áreas sin rehabilitación y con reforestación.

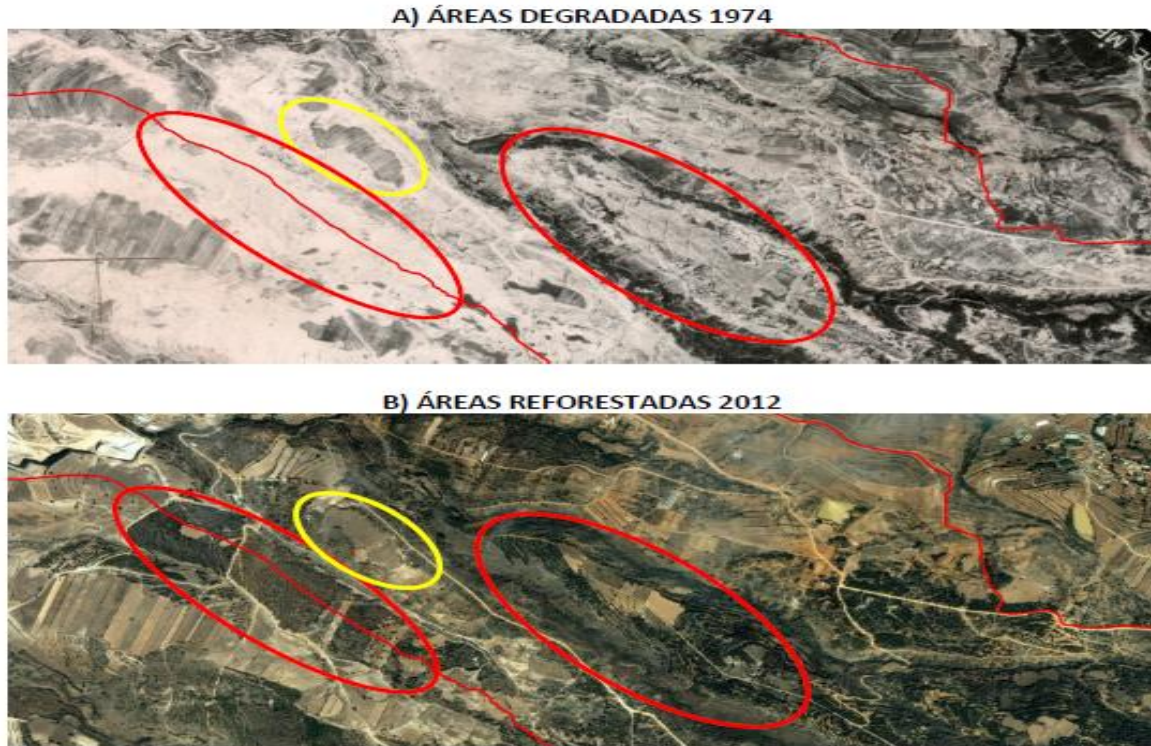


Figura 1.2. Áreas degradadas en 1974 y reforestadas en 2012, en la zona oriente del lago de Texcoco ubicada en la cuenca del río Chapingo. (Márquez-Zarate, 2013).

Para la construcción de las obras de conservación se requirió la roturación del tepetate con maquinaria pesada (Figura 1.3) y la construcción de obras de conservación con objetivos múltiples como: retener suelo y sedimentos; disminuir el grado y longitud de la pendiente; impedir la formación de cárcavas; reducir el contenido de sedimentos en el agua de escorrentía; interceptar escurrimientos y disminuir su velocidad; incrementar la humedad en el suelo, lo que coadyuvó al establecimiento de la vegetación forestal, retención de humedad y mejora de la calidad del agua.



Figura 1.3. Actividades de roturación de tepetates con maquinaria pesada en 1974 (Cruickshank, 1995).

Las principales obras de conservación fueron: a) Zanja bordo que son un conjunto de zanjas y bordos continuos contruidos en curvas a nivel, colocando el producto de la excavación aguas abajo de la zanja para formar el bordo. Las zanjas se construyen con diques divisores para seccionar el almacenamiento de agua. b) Zanjas trinchera o tinas ciegas, son un conjunto de excavaciones intercaladas y diseñadas para la captación de agua de lluvia; el diseño utilizado para su construcción fue a “tres bolillo”. c) Terrazas de formación sucesiva. Son terraplenes formados por el movimiento del suelo que se deposita en los bordos. Este tipo de terrazas se construyen siguiendo las curvas a nivel. La selección de los sitios para la construcción de las obras de conservación se eligió con base en la pendiente y el tipo de tepetate. (Cruickshank, 1995).

1.3.5. Evaluación de obras de reforestación y conservación de suelos en la zona oriente del lago de Texcoco

El objetivo del PLT en la zona oriente del lago de Texcoco fue la reducción de los escurrimientos superficiales y la restauración de la vegetación en las cuencas tributarias, como resultado, en la cuenca del río Texcoco se observó una disminución de los escurrimientos superficiales y un incremento de la cobertura vegetal durante el periodo 1973-1990 (Adame-Martínez y Gómez-Guerrero, 1999). Existen pocos

estudios donde se haya evaluado el impacto que tienen las prácticas de rehabilitación de suelos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, además, que indiquen la calidad del suelo formado y por ende la eficiencia de dichas actividades.

Uno de los primeros estudios fue el realizado por Pedraza (1987) y posteriormente por Llerena-Villalpando y Sánchez-Bernal (1992) quienes cuantificaron la cantidad de obras y prácticas de conservación de suelo como fueron el terraceo, zanjas trinchera, cepas y subsoleo, construidas con el fin de complementar las actividades de reforestación en la zona oriente del lago de Texcoco, y señalaron el impacto de estas actividades sobre una superficie de 5110.2 reportando un 23.1% de sobrevivencia de árboles plantados; sin embargo, las actividades de conservación de suelo influyeron considerablemente en la reducción de la pérdida de suelo de 16.31 a 0.261 ton/ha/año entre 1973 y 1992.

Otros estudios, evaluaron el impacto de las reforestaciones con base en parámetros dasométricos, evaluando el crecimiento de los árboles plantados. Pedraza *et al.* (1987) obtuvo que la altura promedio de *Eucalyptus* sp fue de 4,50 m, de *Cupressus lindleyi* de 2,82 m, *Pinus radiata* de 2,80 m y *Pinus montezumae* 1,54 m después de 14 años de la reforestación, así mismo, Adame y Gómez (1999) mencionan que la altura promedio del arbolado de las diferentes especies plantadas fue de 4.59 m, siendo las de mayor altura la de *Pinus pseudostrobus* con 7.50 m, Eucalipto de 6.47 m, Casuarina con 4.55 m y *Pinus ayacahuite* de 5.70 m, después de aproximadamente 21 años de haber sido realizadas las reforestaciones.

Adame-Martínez, 2003 identificó y cuantificó la diversidad biológica vegetal que se desarrolló a partir de la realización de las actividades de rehabilitación y encontró un estrato herbáceo compuesto principalmente por 41 especies de herbáceas y pastos y 13 especies arbóreas forestales, lo anterior indicó un avance en los procesos de recuperación de suelos degradados considerando que previo a las actividades de rehabilitación realizadas la cobertura vegetal era nula.

Ávila-Campuzano *et al.* (2011) evaluó el impacto de las reforestaciones sobre áreas con tepetate rojo, en la zona oriente del Estado de México, los resultados evidenciaron que tanto las casuarinas como los cedros fueron las especies que formaron suelo en menos tiempo; mientras que los pinos y eucaliptos tuvieron una influencia menor.

1.4. OBJETIVOS

En el presente estudio se seleccionaron cuatro áreas rehabilitadas con reforestaciones de *Pinus montezumae* en zanjas trinchera sobre tepetate rojo, *Cupressus lindleyi* en zanjas trinchera sobre tepetate rojo, *Eucalyptus globulus* sobre terrazas en tepetate blanco y *Pinus radiata* sobre terrazas en tepetate blanco y además se eligió un sitio de referencia que comprendía un área con vegetación natural de *Quercus rugosa*.

1.4.1. Objetivo general

Describir el desarrollo de los suelos (procedentes de diferentes tepetates) en áreas rehabilitadas con prácticas de conservación de suelos y reforestaciones de *E. globulus*, *C. lindleyi*, *P. montezumae* y *P. radiata*, en comparación al suelo de un área con vegetación nativa de *Q. rugosa* en la cuenca del río Chapingo.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Describir el desarrollo del perfil del suelo en las áreas de estudio a través de la caracterización de la formación de sus horizontes.
- ✓ Caracterizar los suelos formados a partir de tepetates, con base en sus propiedades físicas y químicas.

1.5. MATERIALES Y MÉTODOS

1.5.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la Cuenca del río Chapingo, que se localiza en la ladera oriental de la sierra del Tláloc en la comunidad de Tequesquináhuac, municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 1.4). Es una pendiente disectada por corrientes fluviales en dirección este-oeste se encuentra a una altitud que va de los 2250 a 3580 msnm y abarca un área con una superficie de 1,923.42 ha. Para la caracterización de la cuenca se utilizó la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:250,000 y el modelo digital de elevaciones (MDE) escala 1: 50,000.

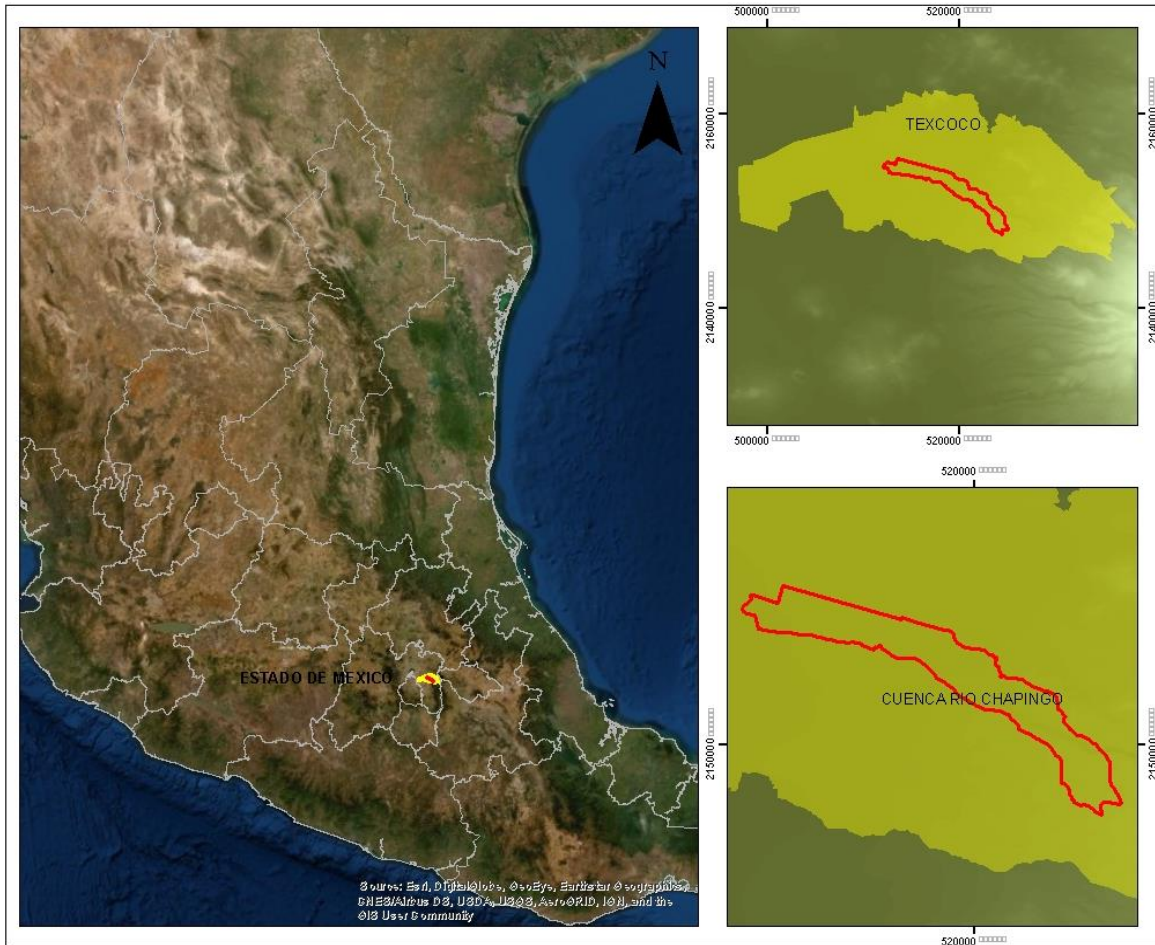


Figura 1.4. Ubicación de la cuenca del río Chapingo, en Tequesquinahuac, en el municipio de Texcoco, Estado de México.

1.5.2. Áreas de muestreo

Las áreas de muestreo se identificaron por tipos de tepetate, tipo de obras de conservación y especies utilizadas en las reforestaciones, utilizando información disponible para la cuenca del río Chapingo. Los tipos de tepetate se identificaron en los sitios de muestreo como tepetate blanco y rojo de acuerdo con Peña y Zebrowski (1992 y 1991); Gutiérrez *et al.* (1990) y Gutiérrez y Solorio (1992). Para ubicar las obras de conservación y especies usadas para la reforestación se obtuvo la información a partir de Cruickshank (1998 y 2003) y Márquez-Zarate *et al.* (2013). La identificación de las especies arbóreas se realizó mediante el uso de los manuales de

identificación de especies forestales de López-Camacho *et al.* (2005) y Arizaga *et al.* (2009).

La selección de las áreas de estudio se realizó a partir de tres recorridos de campo (Figura 1.5), donde se ubicaron puntos de referencia considerando características relevantes como presencia de reforestación, el arreglo utilizado, la homogeneidad del arbolado en cuanto a estatura (edades) y especie, además, se realizó una identificación visual del color del tepetate y de las prácticas de conservación de suelos donde se ubicaban las reforestaciones.



Figura 1.5. Recorridos realizados para identificar las áreas reforestadas y el sitio con vegetación nativa, en la cuenca del río Chapingo.

Los sitios se seleccionaron considerando: 1) Tipo de tepetate (blanco o rojo). 2) Especie forestal utilizada en la reforestación: *Pinus montezumae*, *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* o *Cupressus lindleyi*. 3) Obra de conservación de suelo en zanja trinchera o terraza. Como sitio de referencia se seleccionó un área con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

Con la información recabada en los recorridos de campo y considerando el tipo de tepetate, tipo de obra de conservación, especie reforestada, estado de la vegetación, pendiente y ubicación en la cuenca se seleccionaron cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo utilizando Google Earth (Figura 1.6).

En la Figura 1.6a se muestra la distribución de las áreas reforestadas y las obras de conservación de suelo realizadas en la cuenca del río Chapingo y en la Figura 1.6b las áreas seleccionadas para llevar a cabo el estudio.

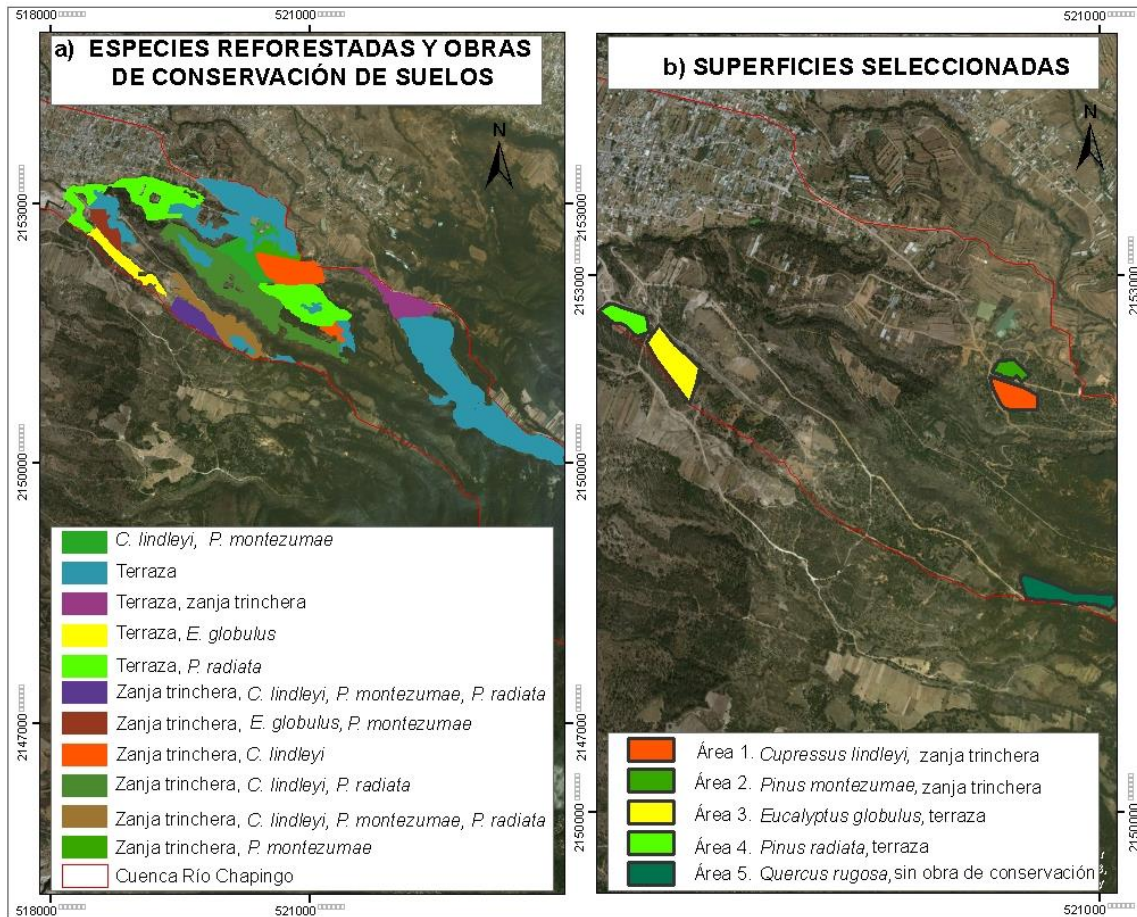


Figura 1.6. Distribución de áreas rehabilitadas dentro de la cuenca del río Chapingo. a) Obras de conservación de suelos y especies reforestadas y b) Áreas de estudio seleccionadas.

Las áreas seleccionadas se denominaron de la siguiente manera: Área 1. Reforestada con *C. lindleyi*, sobre tepetate rojo, en zanja trinchera (3.1 ha). Área 2. Reforestada con *P. montezumae*, sobre tepetate rojo, en zanja trinchera (2.5 Ha). Área 3. Reforestada con *E. globulus*, en tepetate blanco, en terraza (5.4 Ha), Área 4. Reforestada con *P. radiata*, en tepetate blanco, en terraza (1.5 ha) y Área 5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Q. rugosa*, en suelos de cenizas volcánicas, sin obras de conservación de suelos (4.3 ha).

1.5.3. Ubicación de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se seleccionaron por el método de generación de puntos aleatorios, ubicándose un total de ocho sitios de muestreo por cada área de estudio. Los puntos de muestreo se generaron utilizando el algoritmo de puntos aleatorios (*Random Points*) de arctool box en Arc map. En la Figura 1.7 se muestra la distribución de puntos de muestreo aleatorios en los sitios de estudio.

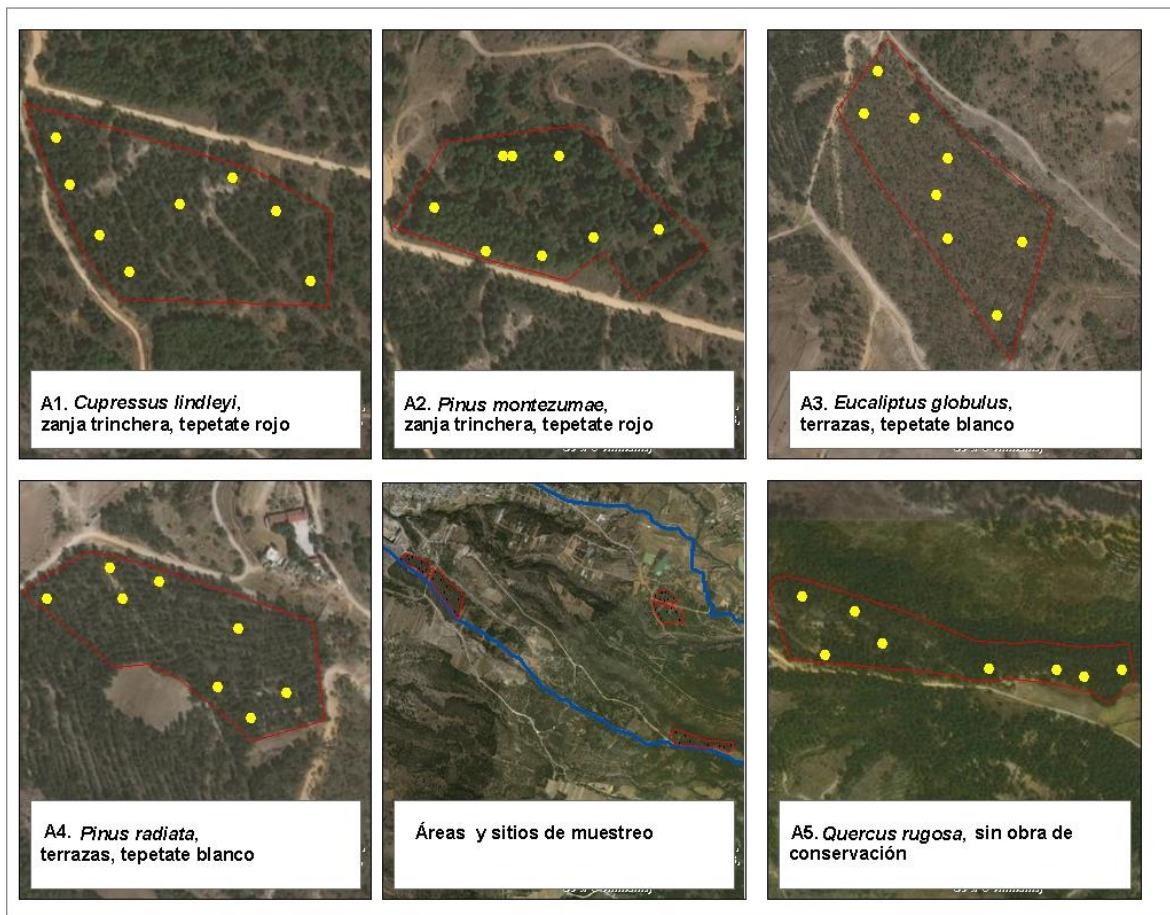


Figura 1.7. Distribución de los sitios de muestreo en las áreas seleccionadas.

Algunas de las características de las áreas rehabilitadas se presentan en las siguientes figuras.



Figura 1.8. Panorámica del Área 1, rehabilitada con reforestación de *Cupressus lindleyi* en zanjas trinchera, en la cuenca del río Chapingo.



Figura 1.9. Panorámica del Área 2, rehabilitada con reforestación de *Pinus montezumae* en zanjas trinchera en la cuenca del río Chapingo.



Figura 1.10. Panorámica del Área 3, rehabilitada con reforestación de *Eucalyptus globulus* en terrazas en la cuenca del río Chapingo.

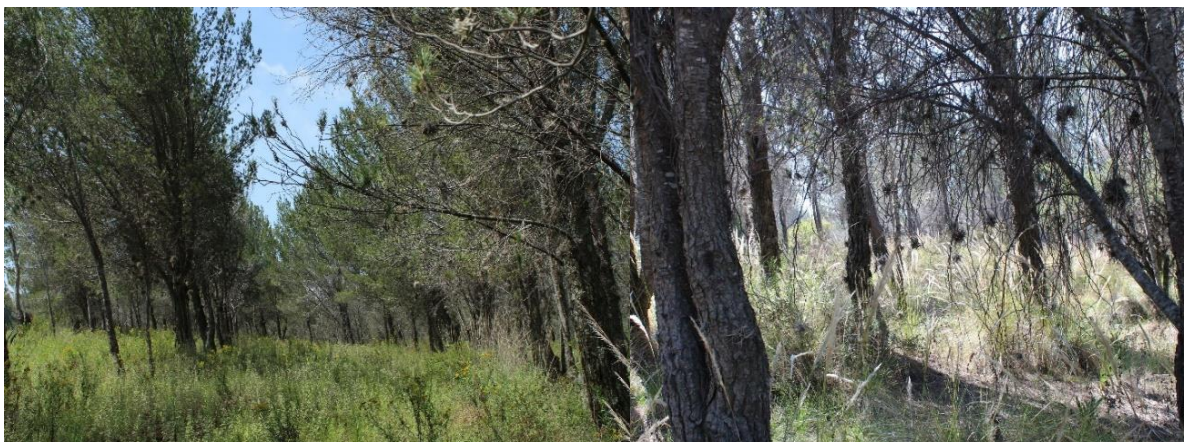


Figura 1.11. Panorámica del Área 4, rehabilitada con reforestación de *Pinus radiata* en terrazas en la cuenca del río Chapingo.



Figura 1.12. Panorámica del Área 5, sitio de referencia con vegetación natural de *Quercus rugosa*, sin obras de conservación de suelos en la cuenca del río Chapingo.

1.5.4. Descripción de perfiles de suelo

Con el fin de conocer el desarrollo de los suelos que se han generado a partir de las prácticas de rehabilitación, después de 50 años, se realizó la descripción de un perfil de suelo en cada área.

Para la descripción del perfil de suelo se elaboró un formato, donde se consideraron aspectos generales del paisaje y las características propias del perfil, los aspectos

considerados están basados en el manual de descripción de suelos de Cuanalo de la Cerda (1975). Los aspectos ambientales más importantes que se consideraron son la localización en coordenadas, localidad, elevación, forma y porcentaje de pendiente, descripción general del paisaje, material parental, drenaje superficial, flora, fauna, los datos de quien describe y la fecha.

Para la descripción del perfil de suelo se realizó una excavación de profundidad variable, según la profundidad del suelo, se identificaron los horizontes del perfil y se caracterizó cada uno de ellos. En el formato se realizó un esquema del perfil donde se anotaron las características generales del paisaje y las características de cada horizonte en el perfil de suelo, las cuales fueron: identificación del tipo de horizonte, profundidad, color en seco y húmedo, consistencia, humedad, textura, estructura, permeabilidad, presencia de raíces, pH, presencia de materia orgánica, carbonatos y manganeso.

1.5.5. Muestreo de suelos

En cada uno de los sitios de muestreo se obtuvieron muestras compuestas de suelo de aproximadamente dos kilogramos. Las muestras se tomaron de todo el perfil del suelo, excluyendo el horizonte orgánico, cada muestra se guardó en bolsas plásticas previamente etiquetadas para su posterior análisis en laboratorio. Se colectaron ocho muestras en cada área obteniéndose un total de 40 muestras.

1.5.6. Análisis de suelos

El análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo se realizó en el laboratorio de Génesis de Suelos, Postgrado de Edafología, del Colegio de Postgraduados en el Campus Montecillo, con base en los procedimientos descritos en el manual de Van Reeuwijk (2003). Las propiedades físicas analizadas fueron, densidad aparente (Dap), textura y color y las propiedades químicas fueron pH, contenido de nitrógeno total (N), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases

intercambiables Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+ , porcentaje de saturación de bases (PSB) y carbonatos de calcio.

1.5.7. Análisis estadístico

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades físicas y químicas del suelo, entre las reforestaciones y el sitio de referencia, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) a los datos que presentaron distribución normal y homogeneidad de varianzas y pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis y comparaciones *post hoc* a los valores de las medias utilizando la prueba de Tukey en datos que no cumplieran con estos supuestos. Ambos análisis se realizaron bajo un diseño experimental completamente al azar. El procesamiento de los datos se realizó con el software de análisis estadístico SAS versión 9.3.

1.6. RESULTADOS

Los perfiles de suelos se describirán para cada una de las áreas definidas en este estudio en la cuenca del río Chapingo, las cuales se identificarán como:

Área 1. Reforestación con *Cupressus lindleyi* en zanja trinchera sobre tepetate rojo.

Área 2. Reforestación con *Pinus montezumae* en zanja trinchera sobre tepetate rojo.

Área 3. Reforestación con *Eucalyptus globulus*, en terraza sobre tepetate blanco.

Área 4. Reforestación con *Pinus radiata* en terraza sobre tepetate blanco

Área 5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*, en suelos de cenizas volcánicas, sin obra de conservación de suelos.

1.6.1. Desarrollo de perfiles de suelos en las áreas rehabilitadas

El desarrollo de los perfiles de suelo y sus horizontes en las áreas rehabilitadas fueron un resultado, del material parental, las obras de conservación y la especie arbórea utilizada en la reforestación.

1.6.1.1. Área 1. Reforestación con *Cupressus lindleyi* en zanjas trinchera sobre tepetate rojo

Material parental de tobas volcánicas con presencia de tepetate rojo, pendiente regular del 15 % con drenaje normal. Altitud 2,596 msnm. Vegetación arbórea de *C. lindleyi* con una edad aproximada de 47 años según datos reportados por Ávila-Campuzano *et al.* (2011). El estrato herbáceo está conformado por diversas especies de pastos, herbáceas y musgo. Las obras de conservación de suelos realizadas en esta zona son principalmente zanjas trinchera (Figura 1.13b).

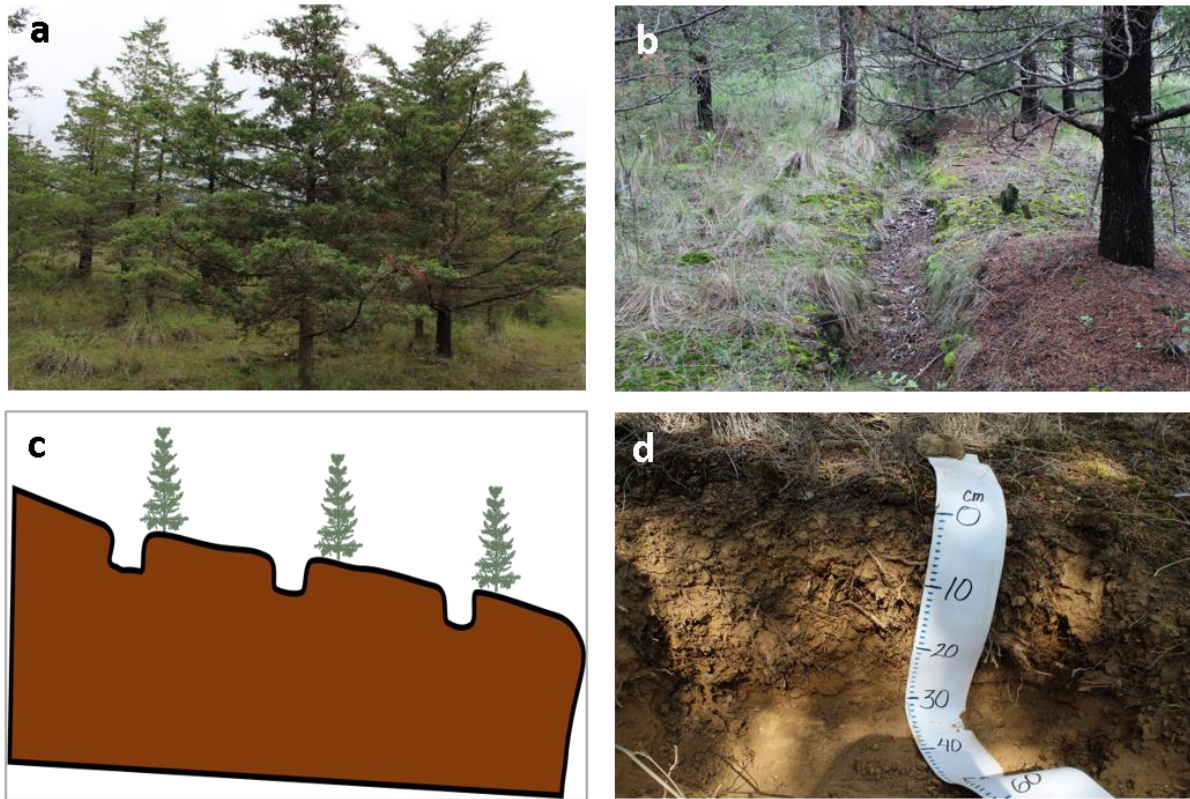


Figura 1.13. a) Panorámica de la reforestación con *Cupressus lindleyi*, b) ubicación de la reforestación respecto a la práctica de conservación de suelo, en zanjas trinchera, c) esquema de la obra de conservación y la reforestación, d) perfil de suelo formado a partir de tepetate rojo.

El perfil de suelo tiene una profundidad 32.5 cm conformado por cuatro horizontes; **O** (2.5 cm), **A** (8cm), **Bw** (19cm) y **C** (3cm).

El horizonte orgánico **O** se encuentra en la superficie del suelo y tiene una profundidad de 2.5 cm, está conformado por restos de hojas de *C. lindleyi*, pastos, herbáceas y musgo en diferentes estados de descomposición.

El horizonte **A** tiene un espesor de 8 cm, color anaranjado opaco (10YR7/4) en seco y en húmedo es pardo (10YR4/6), transición marcada, muy seco y duro y en húmedo muy firme y ligeramente pegajoso, presenta poca pedregosidad, con estructura subangular moderadamente desarrollada, permeabilidad moderada y textura franco-arcillosa; la presencia de raíces es abundante y dominan raíces delgadas entre 1 y 3

mm de diámetro. El pH es de 4.5 con alto contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **Bw** tiene un espesor de 19 cm, transición marcada horizontal a la siguiente capa, seco y muy permeable, de consistencia muy dura en seco, muy firme en húmedo y ligeramente pegajoso, la textura es franco arenosa y de estructura subangular poco desarrollada, su color en seco es brillante (10YR6/6) y en húmedo es pardo (10YR3/4), presenta abundancia de raíces de 3 a 10 mm de diámetro, el pH de este horizonte es 5, con bajo contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **C** tiene un espesor de 3 cm, una transición marcada de forma horizontal con el lecho rocoso, ligeramente húmedo, con permeabilidad rápida, consistencia muy dura en seco, muy firme en húmedo y no pegajoso. Textura arenosa y sin estructura, su color en seco y húmedo es marrón (10YR5/8) y (10YR3/4), las raíces son gruesas (de 10 a 30 mm de diámetro) y poco abundantes, el pH es de 5 con presencia de manganeso y sin contenido de materia orgánica y carbonatos.

1.6.1.2. Área 2. Reforestación con *Pinus montezumae* en zanjas trinchera sobre tepetate rojo

El material parental en este sitio son tobas volcánicas que dieron origen al tepetate rojo, tiene una pendiente regular del 15 % con drenaje normal y se ubica a una altitud de 2598 msnm. La vegetación dominante es *P. montezumae* de aproximadamente 38 años (Ávila-Campuzano *et al.*, 2011), el estrato herbáceo está constituido principalmente por pastos. Las obras de conservación de suelo realizadas fueron zanjas trinchera (Figura 1.14).



Figura 1.14. a) Panorámica de la reforestación de *Pinus montezumae*, b) estrato herbáceo y superficie del suelo cubierta por acículas de pino, c) esquema de la reforestación y práctica de conservación de suelo en zanjas trinchera, d) perfil del suelo a partir de tepetate rojo.

El perfil tiene una profundidad de 27 cm con dos horizontes **O (10cm)** y **C (17cm)**.

El horizonte orgánico **O** con un espesor promedio de 10 cm, presenta una transición irregular muy marcada al siguiente horizonte.

El horizonte **C** tiene un espesor promedio de 17 cm con una transición marcada de forma irregular con el lecho rocoso, es un horizonte seco impermeable, de consistencia ligeramente dura en seco, firme en húmedo y no pegajoso, su textura es arcillo arenosa y de estructura subangular desarrollada, su color en seco es brillante (10YR6/6) y en húmedo es marrón (10YR4/6), las raíces son gruesas y medias (de 3 a 30 mm de diámetro) y poco abundantes, el pH de este horizonte es ácido (5) con alto contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

1.6.1.3. Área 3. Reforestación con *Eucalyptus globulus* en terrazas sobre tepetate blanco

El material parental son principalmente tobas volcánicas que dieron lugar a la presencia de tepetate blanco existe una pendiente dominante del 15 % clasificada como una pendiente regular, respecto al drenaje este sitio se clasifica como un sitio normal. La vegetación arbórea dominante es de *E. globulus* con una edad aproximada de 47 años (Ávila-Campuzano *et al.*, 2011), en el estrato herbáceo dominan las herbáceas y en menor cantidad los pastos. Las obras de conservación realizadas fueron terrazas (Figura 1.15).

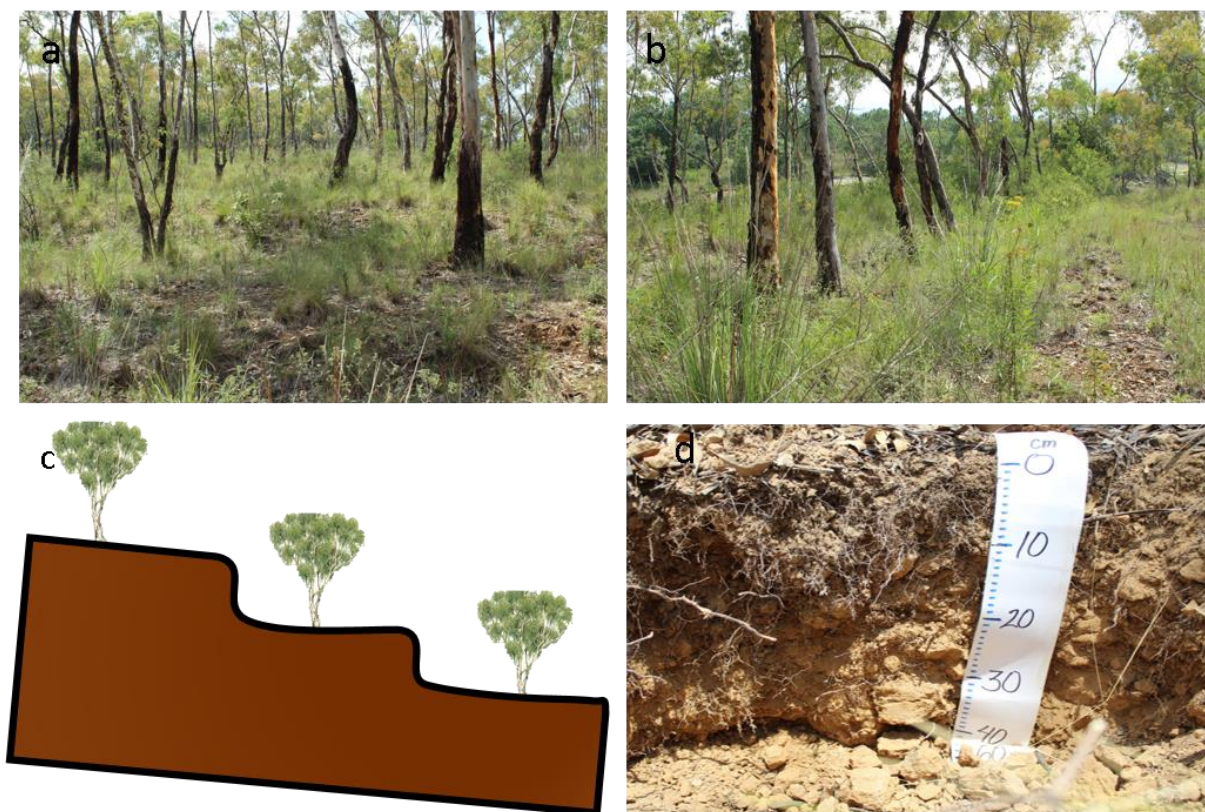


Figura 1.15. a y b) panorámicas de la reforestación de *Eucalyptus globulus*, c) esquema de la reforestación con las prácticas de conservación, los árboles se encuentran plantados en terrazas, d) perfil del suelo en el área reforestada.

El perfil tiene una profundidad de 46 cm con cuatro horizontes **O (1 cm)**, **A (8 cm)**, **Bw (22 cm)** y **C (15 cm)**.

El horizonte orgánico **O** con un espesor de 1 cm, compuesto principalmente por hojarascas, residuos de corteza de eucalipto y pastos.

El horizonte **A** tiene un espesor de 8 cm con una transición marcada horizontalmente al siguiente horizonte. Es un horizonte seco de lenta permeabilidad, de consistencia suelta en seco, no friable en húmedo y ligeramente pegajoso. Su textura es franco arcillo arenosa y de estructura granular débilmente desarrollada. Su color en seco es amarillo anaranjado opaco (10YR6/3) y en húmedo es marrón (10YR4/4), las raíces son finas y abundantes, el pH de este horizonte es de 6 con muy bajo contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **Bw** tiene un espesor de 22 cm con una transición marcada horizontalmente al siguiente horizonte. Es un horizonte seco muy permeable, de consistencia suelta en seco, no friable en húmedo y no pegajoso. Su textura arenosa y de estructura granular débilmente desarrollada. Su color en seco es amarillo anaranjado opaco (10YR5/6) y en húmedo es marrón (10YR4/6), las raíces son medias (3 a 10 mm de diámetro) y poco abundantes, el pH de este horizonte es de 6 con muy bajo contenido de materia orgánica, con presencia de manganeso y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **C** tiene profundidad de 15 cm con una transición al siguiente horizonte de forma horizontal. Es un horizonte seco muy permeable de consistencia suelta en seco, no friable en húmedo y no pegajoso. Su textura es arenosa y sin estructura, su color en seco es amarillo anaranjado opaco (10YR6/6) y en húmedo es marrón (10YR4/6); no hay presencia de raíces y su pH es de 6. Tiene muy bajo contenido de materia orgánica, presencia de manganeso y es un horizonte calcáreo con presencia de carbonatos.

1.6.1.4. Área 4. Reforestación con *Pinus radiata* en terrazas sobre tepetate blanco

El material parental son tobas volcánicas con tepetate blanco, pendiente regular del 15 %, drenaje normal y se ubica a una altitud de 2481 msnm. En el estrato arbóreo domina el *P. radiata* con una edad aproximada de 47 años (SARH,1990). En el estrato herbáceo dominan algunas herbáceas y pastos, las prácticas de conservación realizadas son terrazas (Figura 1.16).

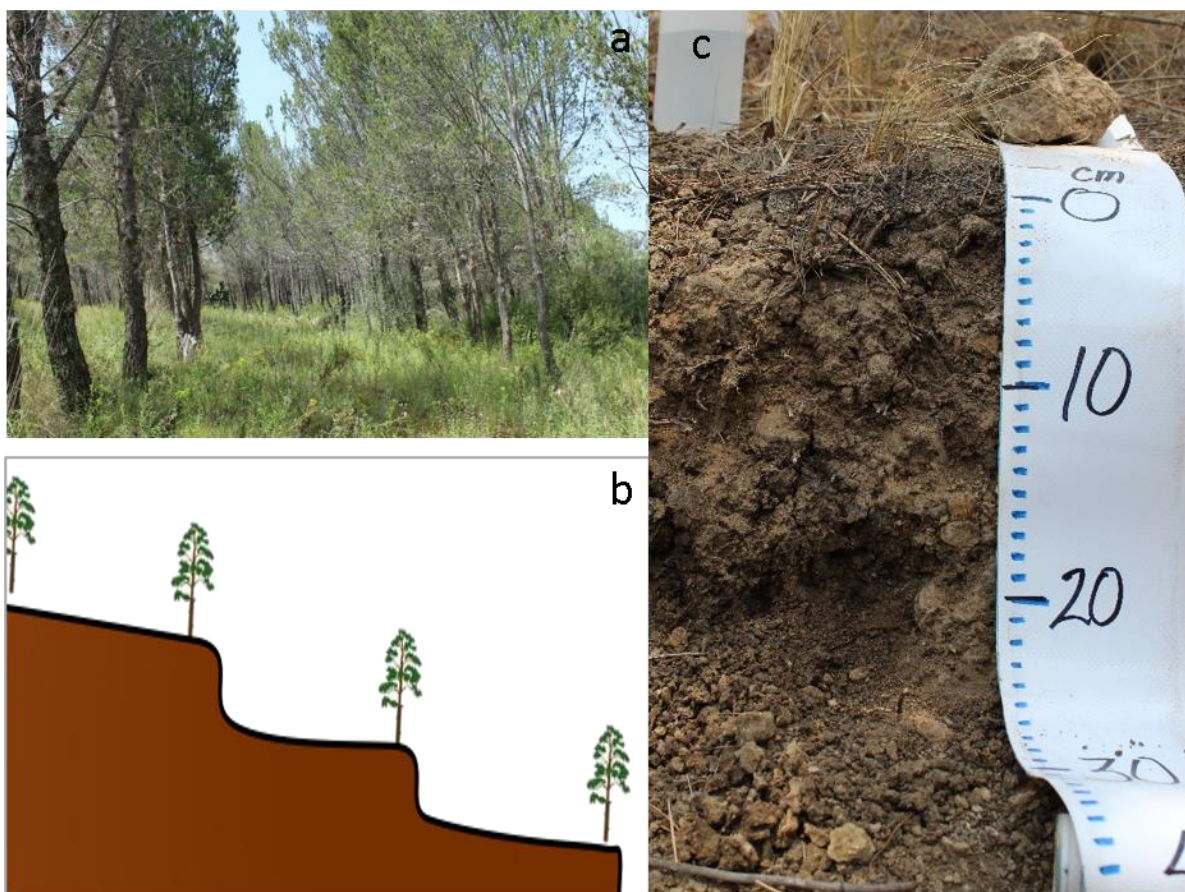


Figura 1.16. a) Panorámica de la reforestación con *Pinus radiata*, b) esquema de la reforestación y prácticas de conservación en terrazas, c) Perfil del suelo en el área reforestada.

El perfil tiene una profundidad de 26 cm con tres horizontes **O (1.5 cm)**, **A (3 cm)** **AC (13 cm)** y **AC2 (10 cm)**.

El horizonte orgánico **O** tiene un espesor promedio de 1.5 cm, está compuesto principalmente por acículas de *P. radiata* con poca descomposición.

El horizonte **A** tiene un espesor de 3 cm, una transición ondulada, es seco y moderadamente permeable de consistencia muy dura en seco, friable en húmedo y ligeramente pegajoso. Su textura es arcillo limosa y tiene una estructura subangular desarrollada, su color en seco es gris parduzco (10YR6/1) y en húmedo es negro parduzco (10YR3/2), presenta pocas raíces delgadas (de 1 a 3 mm de diámetro), el pH de este horizonte es de 6, alto contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **AC** tiene un espesor de 13 cm con transición marcada ondulada, es seco y moderadamente permeable tiene consistencia muy dura en seco, firme en húmedo y pegajoso. Su textura es franco arcillo limosa con estructura subangular desarrollada, su color en seco es gris amarillento marrón (10YR5/2) y en húmedo es negro parduzco (10YR3/3), existen pocas raíces gruesas (10 a 30 mm de diámetro) el pH es de 6 con alto contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

Horizonte **AC2** tiene un espesor de 10 cm con una transición marcada ondulada. Es seco y moderadamente permeable su consistencia es dura en seco muy firme en húmedo y pegajoso. Tiene textura franco arcillo limosa y de estructura subangular desarrollada, su color en seco es gris amarillento marrón (10YR5/2) y en húmedo es negro parduzco (10YR3/3), existen pocas raíces gruesas ((10 a 30 mm de diámetro) el pH de este horizonte es 6 con alto contenido de materia orgánica y con presencia de manganeso.

1.6.1.5. Área 5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa* sin práctica de conservación sobre suelo volcánico

El material parental son cenizas volcánicas y la pendiente dominante moderada (30 %), con drenaje normal, y se ubica a una altitud de 2,660 msnm. La vegetación presente es natural con dominancia de *Q. rugosa* en el estrato arbóreo, se tiene un estrato arbustivo y herbáceo.



Figura 1.17. a) Panorámica de la vegetación natural con *Quercus rugosa*, b) superficie del suelo con acumulación de materia orgánica, c) perfil del suelo en la vegetación nativa.

El perfil tiene una profundidad de 61 cm conformado por cuatro horizontes; **O (10 cm)**, **A (8 cm)**, **Bw (32 cm)** y **2Bw (11 cm)**.

El horizonte **O** está formado principalmente por la hojarasca de *Q. rugosa*, arbustos y herbáceas en diferentes estados de descomposición (Figura 1.17b).

El horizonte **A** tiene un espesor de 8 cm con una transición marcada horizontal, es seco con permeabilidad lenta consistencia dura en seco firme en húmedo y ligeramente pegajoso. Su textura es franco arcillo limosa con estructura subangular fuertemente desarrollada. El color en seco es gris parduzco (7.5YR4/1) y en húmedo es negro parduzco (10YR2/2), las raíces son pocas y delgadas (de 1 a 3 mm de diámetro), el pH de este horizonte es 5 con alto contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos.

El horizonte **Bw** tiene un espesor de 32 cm, transición marcada horizontal, seco con permeabilidad lenta, consistencia muy dura en seco friable en húmedo y ligeramente pegajoso. Su textura es franco limosa y de estructura subangular débilmente desarrollada, color en seco es marrón opaco (7.5YR5/4) y en húmedo es marrón (10YR3/4), las raíces son pocas y gruesas (de 10 a 30 mm de diámetro), el pH de este horizonte es de 5 con poco contenido de materia orgánica y sin presencia de carbonatos; se presenta una discontinuidad litológica.

El horizonte **2Bw** tiene un espesor de 11 cm, transición horizontal marcada, es húmedo con permeabilidad moderada, su consistencia es dura en seco, muy firme en húmedo y muy pegajoso de textura arcillosa, su estructura es subangular desarrollada; su color en seco es marrón (7.5YR4/4) y en húmedo es oscuro 10YR3/3), no presenta raíces ni materia orgánica y hay presencia de manganeso.

1.6.1.6. Comparación del desarrollo de los perfiles de suelo de las áreas rehabilitadas con el sitio de referencia

Para evaluar la formación del suelo se consideraron dos factores que fueron la profundidad del perfil de suelo y los tipos de horizontes formados. Los perfiles de suelo de las cinco áreas estudiadas se muestran en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Profundidad de los horizontes del perfil del suelo en centímetros, en cada área de estudio.

Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
O 2.5	O 10	O 1.0	O 1.5	O 10.0
A 8.0	C 17	A 8.0	A 3.0	A 8.0
Bw 19.0		Bw 22.0	AC 13.0	Bw 32.0
C 3.0		C 15.0	AC2 21.0	2Bw 11.0

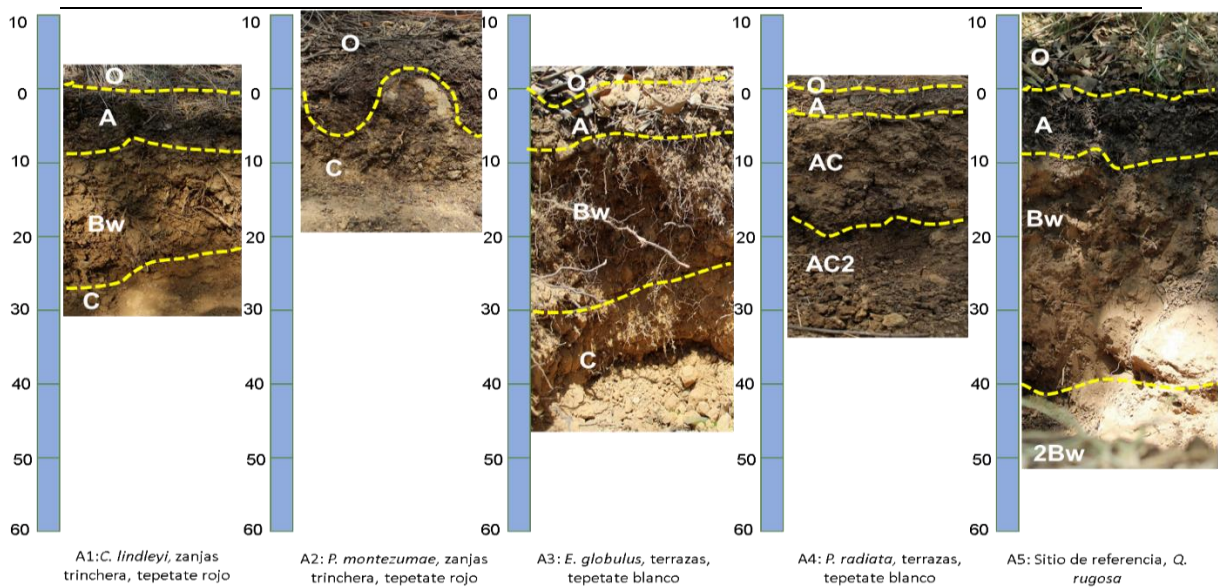


Figura 1.18. Esquema de los perfiles de suelo en áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.

Los resultados indicaron que el perfil de suelo más profundo con 61 cm fue el del área con vegetación nativa y sin obra de conservación. En las áreas rehabilitadas el perfil de suelo más profundo que fue encontrado fue el del área 3 que fue rehabilitada con *E. globulus* en terrazas sobre tepetate blanco con una profundidad de 46 cm, seguido por el del área 1 con *C. lindleyi* en zanja trinchera y tepetate rojo presento una profundidad de 32.5 cm; los suelos con menor profundidad se encontraron en el área

2 con *P. montezumae* en zanja trinchera y tepetate rojo y con *P. radiata* en terraza y tepetate blanco con una profundidad de 27 cm y 27.5 cm, respectivamente.

En el perfil de la vegetación natural se observó mayor acumulación del mantillo forestal y se encontró la formación de un horizonte O con un espesor de 10 cm. Similarmente, el horizonte orgánico donde se acumuló un espesor de 10 cm fue el del área 2 con *P. montezumae* y los de menor acumulación fueron con *C. lindleyi* (2.5 cm) y en las áreas 3 con *E. globulus* y área 4 con *P. radiata* donde el horizonte orgánico fue de 1 cm y 1.5 cm, respectivamente.

De las áreas rehabilitadas, la mayor profundidad se observó en el perfil de suelo de *E. globulus*, esto fue debido a que la roturación del tepetate y la construcción de las terrazas aportaron una gran cantidad de material desagregado de tepetate, que conjuntamente con la acumulación de suelo de las partes altas, aportaron una mayor cantidad de material para el desarrollo del perfil de suelo. Este perfil presentó un horizonte A, un horizonte de acumulación Bw y un horizonte C (Figura 1.18), similares en nomenclatura a los del sitio de referencia. Sin embargo, el horizonte O fue de un mucho menor espesor (1cm).

En el área 1 de *C. lindleyi* sobre tepetate rojo y con zanjas trinchera, el establecimiento de la reforestación favoreció la formación de un horizonte orgánico y horizontes minerales A y Bw bien definidos. Este fue otro de los perfiles más parecido al sitio de referencia, con excepción de que el horizonte orgánico era más delgado.

En el área 2 de *P. montezumae* en zanja trinchera y tepetate rojo, fue donde se observó el menor desarrollo del perfil del suelo (27 cm) entre las plantaciones estudiadas (Figura 1.18) debido a la poca remoción del suelo y a que el tepetate se encuentra poco intemperizado; sin embargo, se encontró un horizonte orgánico superficial bien definido de 10 cm de espesor, donde la materia orgánica se encuentra en diferentes estados de descomposición y en seguida de este se encontró un horizonte C con tepetate poco intemperizado.

Otro de los perfiles de suelo poco desarrollados fue el del área 4 con la plantación de *P. radiata*, con una profundidad de 26 cm, lo anterior fue debido a que para la formación de terrazas solo se niveló el terreno y no hubo roturación del tepetate. Se identificó el desarrollo de un horizonte A y el inició el proceso de intemperismo en los horizontes A y C, designándose como horizontes AC y AC2; la nomenclatura AC es utilizada para indicar un horizonte transicional poco común entre los horizontes A y C, que tiene tanto propiedades de uno como de otro, pero no está dominado por las propiedades ni por las características de A ni de C, siendo más bien intermedio entre ambos, se observa poca materia orgánica.




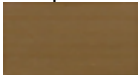

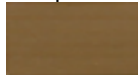

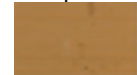


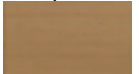

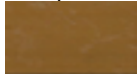
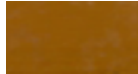
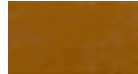
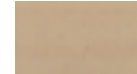
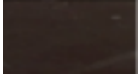

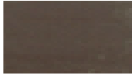


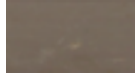




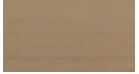
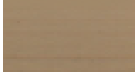
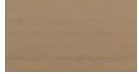


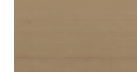






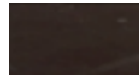
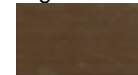
1.6.2. Propiedades físicas de los suelos en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia

Las propiedades físicas del suelo en el área de estudio están determinadas por las características del material parental, en este caso, los dos-tipos de tepetate (rojo y blanco), la especie que se utilizó para la reforestación y las dos prácticas de conservación de suelo en conjunto con los factores del clima y el tiempo transcurrido (aproximadamente 50 años) desde que se llevaron a cabo actividades de rehabilitación (SARH,1990; Cruickshank, 1998 y 2003).

1.6.2.1. Color del suelo

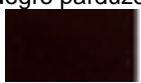
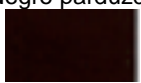
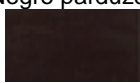
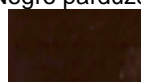
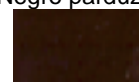
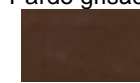
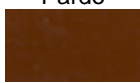
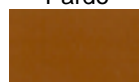
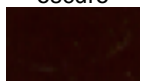





















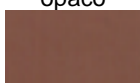
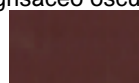



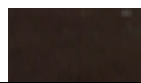

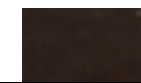
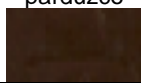
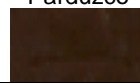
Los suelos más oscuros se presentaron en el área 5 del sitio de referencia con vegetación nativa de *Q. rugosa*, donde dominaron los colores negro parduzco tanto en seco como en húmedo (Cuadro 1.2 y 1.3); mientras que los suelos en las áreas rehabilitadas presentaron colores más claros en el suelo seco (Cuadro 1.2). De acuerdo a su origen por tipo de tepetate, los suelos del área 1 y 2 formados a partir de tepetate rojo presentaron colores pardo amarillentos a anaranjados amarillentos opacos, mientras que los suelos de las áreas 3 y 4 formados a partir de tepetate blanco presentaron coloraciones de pardo amarillento a gris parduzco.

Cuadro 1.2. Color en seco con las cartas Munsell de los sitios de muestreo en las reforestaciones y sitio de referencia.

ÁREAS	MUESTRAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Área 1	10YR4/2 Pardo amarillo grisáceo	10YR4/2 Pardo amarillo grisáceo	10YR5/2 Pardo grisáceo	10YR5/3 Pardo amarillento opaco	10YR5/3 Pardo amarillento Opaco	10YR5/3 Pardo amarillento opaco	10YR5/8 Pardo amarillento	10YR6/4 Amarillo anaranjado opaco
								
Área 2	2.5YR2/4 Rojo oscuro	2.5YR5/2 Rojo grisáceo	10YR6/3 Amarillo anaranjado opaco	10YR5/4 Pardo amarillento opaco	10YR5/4 Pardo amarillento Opaco	10YR5/6 Pardo amarillento	10YR5/6 Pardo Amarillento	10YR7/2 Naranja amarillo Opaco
								
Área 3	10YR3/1 Negro parduzco	10YR3/3 Oscuro	10YR4/1 Gris parduzco	10YR4/4 Pardo	10YR4/4 Pardo	10YR5/1 Gris parduzco	10YR5/3 Pardo amarillento opaco	10YR6/4 Amarillo anaranjado opaco
								
Área 4	10YR4/2 Pardo amarillo grisáceo	10YR4/2 Pardo amarillo grisáceo	10YR3/1 Negro parduzco	10YR3/1 Negro parduzco	10YR5/2 Pardo amarillo grisáceo	10YR6/1 Gris parduzco	10YR6/1 Gris parduzco	10YR6/2 Pardo amarillo grisáceo
								
Área 5	10YR2/1 Negro	10YR2/2 Negro parduzco	10YR2/2 Negro Parduzco	7.5YR3/1 Negro Parduzco	10YR3/2 Negro Parduzco	10YR3/2 Negro Parduzco	10YR3/1 Negro Parduzco	10YR4/2 Pardo amarillo grisáceo
								

Nota: Área 1: *C. lindleyi*, zanja trinchera, tepetate rojo; Área 2: *P. montezumae*, zanja trinchera, tepetate rojo; Área 3: *E. globulus*, terrazas, tepetate blanco; Área 4: *P. radiata*, terrazas, tepetate blanco; Área 5: Sitio de referencia con Vegetación nativa de *Q. rugosa* sin practica de conservación.

Cuadro 1.3. Color en húmedo con las cartas Munsell de los sitios de muestreo en las reforestaciones y sitio de referencia.

ÁREAS	MUESTRAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Área 1	7.5YR2.5/2 Negro parduzco	7.5YR2.5/2 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	7.5YR4/2 Pardo grisáceo	7.5YR4/4 Pardo	7.5YR4/6 Pardo
								
Área 2	7.5YR2.5/3 Pardo muy oscuro	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/3 Oscuro	7.5YR3/3 Oscuro
								
Área 3	10YR2/2 Negro parduzco	10YR2/2 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	10YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/3 Negro	7.5YR4/3 Pardo	7.5YR4/3 Pardo
								
Área 4	10YR2/1 Negro	10YR3/2 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/1 Negro parduzco	7.5YR3/2 Negro parduzco	2.5YR5/3 Pardo rojizo opaco	2.5Y4/2 Amarillo grisáceo oscuro
								
Área 5	10YR2/1 Negro	10YR2/1 Negro	10YR2/1 Negro	10YR3/1 Negro parduzco	10YR3/1 Negro parduzco	10YR3/1 Negro parduzco	10YR3/2 Negro parduzco	10YR3/2 Negro Parduzco
								

Nota: Área 1: *C. lindleyi*, zanja trinchera, tepetate rojo; Área 2: *P. montezumae*, zanja trinchera, tepetate rojo; Área 3: *E. globulus*, terrazas, tepetate blanco; Área 4: *P. radiata*, terrazas, tepetate blanco; Área 5: Sitio de referencia con Vegetación nativa de *Q. rugosa* sin practica de conservación.

1.6.2.2. Densidad aparente (Dap)

La densidad aparente es un parámetro importante para considerar en la clasificación de calidad de un suelo, valores altos determinan un ambiente pobre para el crecimiento de raíces debido a la poca aireación y una baja infiltración del agua en el suelo (FAO, 2009).

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas de densidad aparente entre las áreas ($F=3.35$, $df=4$, $p\text{ value}=0.0201$); la mayor diferencia se obtuvo entre el área 1 y el área 2 ($p\text{ value}=0.0412$). Los valores más altos de densidad aparente se presentaron en suelos de *C. lindleyi* (1.5 g/cm^3) y *E. globulus* (1.4 g/cm^3). Los suelos en *P. montezumae*, *P. radiata* y *Q. rugosa* presentaron valores de densidad aparente similares (1.3 g/cm^3).

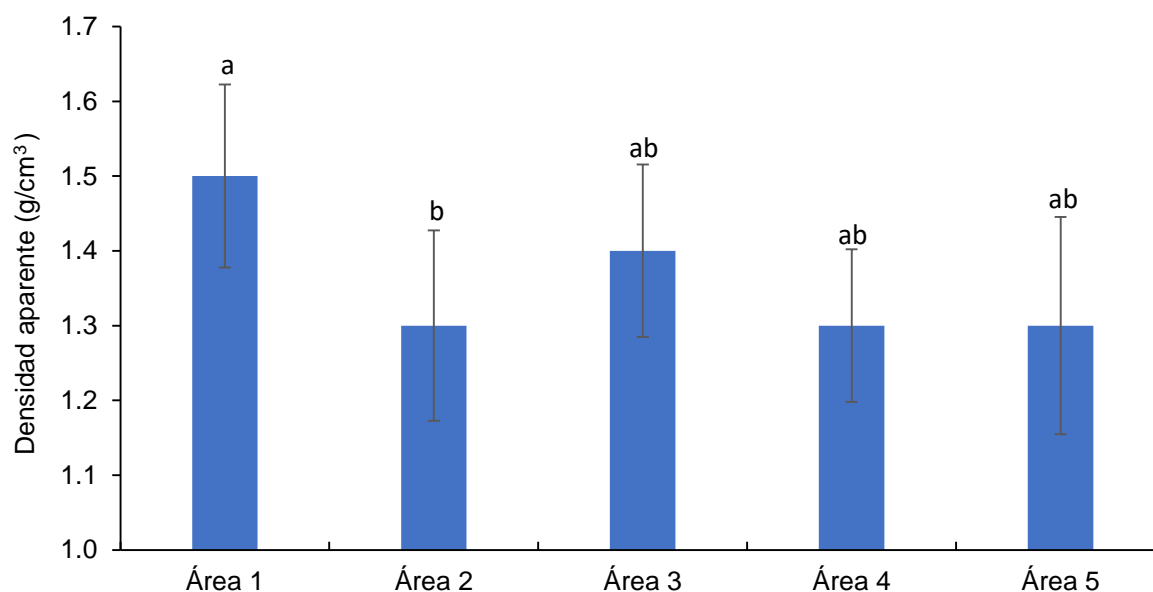


Figura 1. 19. Densidad aparente en los suelos de cuatro áreas rehabilitadas y un sitio con vegetación nativa en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

1.6.2.3. Textura

Con base al análisis con el triángulo de texturas, se encontraron diferentes clases texturales en los suelos de las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia. El porcentaje del tamaño de las partículas de arena, limo y arcilla determinaron su textura.

Los suelos rehabilitados con *E. glóbulus* en terrazas y *P. montezumae* en zanjas trinchera son muy parecidos, en estos dominaron texturas franco arcillosas, en los suelos de *C. lindeyi* las texturas dominantes fueron arcillo limosas, mientras que en los suelos de *P. radiata* y del sitio de referencia dominaron texturas franco limosas (Figura 1.20).

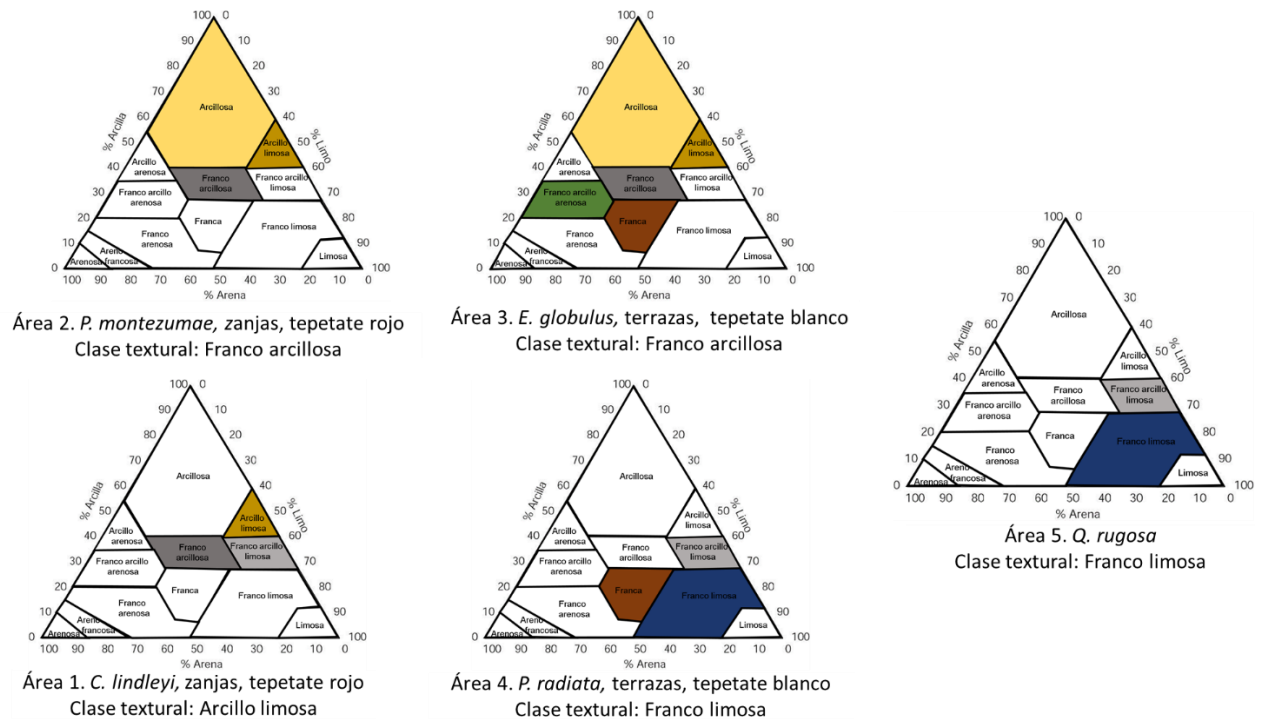


Figura 1.20. Clases texturales de acuerdo a las medias de los porcentajes de arena, limo y arcilla, en las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia.

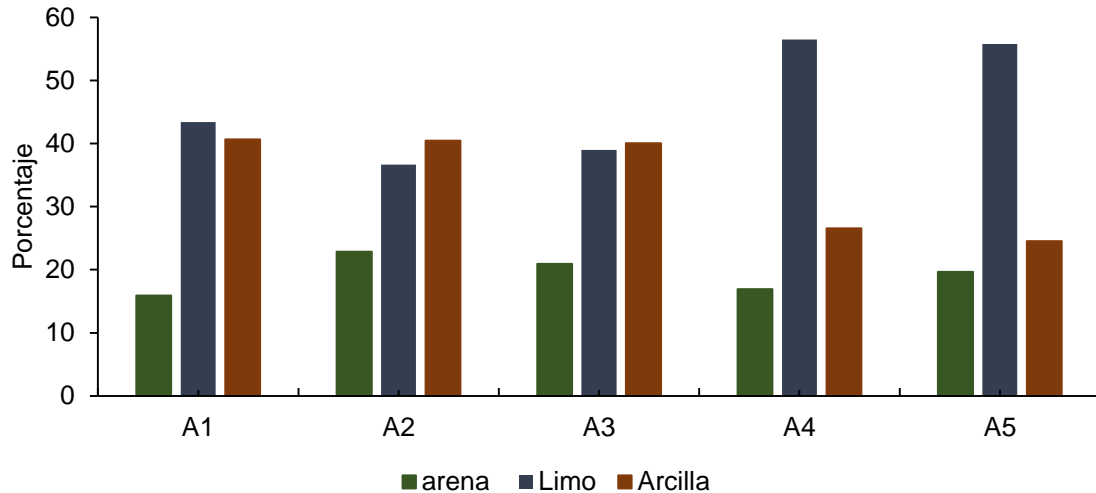


Figura 1.21. Promedio del porcentaje de arenas, limo y arcilla, en los suelos de cuatro áreas rehabilitadas y un sitio con vegetación nativa en la cuenca de río Chapingo.

El contenido de arenas fue de alrededor de 20% en todos los suelos. Los contenidos de arcilla fueron altos en las plantaciones de *C. lindleyi*, *P. montezumae* y *E. globulus* del área 1, 2 y 3 respectivamente, con contenidos de 40%, mientras que los suelos limosos se presentaron en áreas rehabilitadas con *P. radiata* y en el sitio de referencia de *Q. rugosa*, alcanzando valores de aproximadamente 56 % (Figura 1.21).

1.6.3. Propiedades químicas de los suelos en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia

Los suelos en las áreas rehabilitadas tienen su origen en materiales endurecidos (tepetates), los cuales presentan características como pH elevado o alcalino, alto contenido de bases intercambiables (Ca y K) y saturación de bases, deficiencia en nitrógeno, en fósforo disponible y carbono orgánico (Etchevers-Barra *et al.*, 1992; Quantin *et al.*, 1993). De acuerdo con los análisis estadísticos, existieron diferencias significativas en el pH, nitrógeno, sodio, potasio, calcio, magnesio y carbonatos. El contenido de MO, CIC y el PSB no presentaron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 1.4).

Cuadro 1.4. Diferencias en las propiedades químicas entre áreas estudiadas.

PROPIEDAD	P value	CV
pH	0.0002*	44.00346
MO	0.8870 ^{NS}	59.24657
N	0.0190*	51.03126
CIC	0.3132 ^{NS}	55.13837
PSB	0.6303 ^{NS}	58.0741
Na	0.0001*	42.50535
Ca	0.0018*	47.43976
K	0.0122*	50.32359
Mg	0.0549*	52.89607
CaCO ₃	0.0026*	47.10854

^{NS} = No significativo * = Significativo CV=Coeficiente de variación MO=Materia orgánica, N= Contenido de nitrógeno total, CIC=Capacidad de intercambio catiónico, PSB= Porcentaje de saturación de bases, Na=Sodio, Ca=Calcio, K=Potasio, Mg=Magnesio, CaCO₃=Carbonatos de calcio.

1.6.3.1. pH

Los valores de pH en los suelos estudiados presentaron diferencias estadísticamente significativas ($X^2=18.1115$, $df=4$, $p\ value=0.0002$), la prueba de Tukey mostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre el área 4 y las áreas 1 ($p\ value=0.0193$), 2 ($p\ value=0.0001$), 3 ($p\ value < 0.0005$) y 5 ($p\ value=0.0002$), así mismo entre el área 1 y área 2 ($p\ value=0.0153$). Sin embargo, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre el sitio de referencia y las áreas 1, 2 y 3 (Figura 1.22).

De acuerdo con la NOM-021 RECNAT- 2000 los valores de pH muestran una tendencia de moderadamente ácidos a neutros con valores que van de 5.8 a 6.9. El suelo con *P. radiata* presento un pH neutro de 6.9, mientras que los suelos moderadamente ácidos correspondieron a *C. lindleyi* (6.3), *E. globulus* (6.0), *P. montezumae* (5.8) y al sitio de referencia con *Q. rugosa* (5.9).

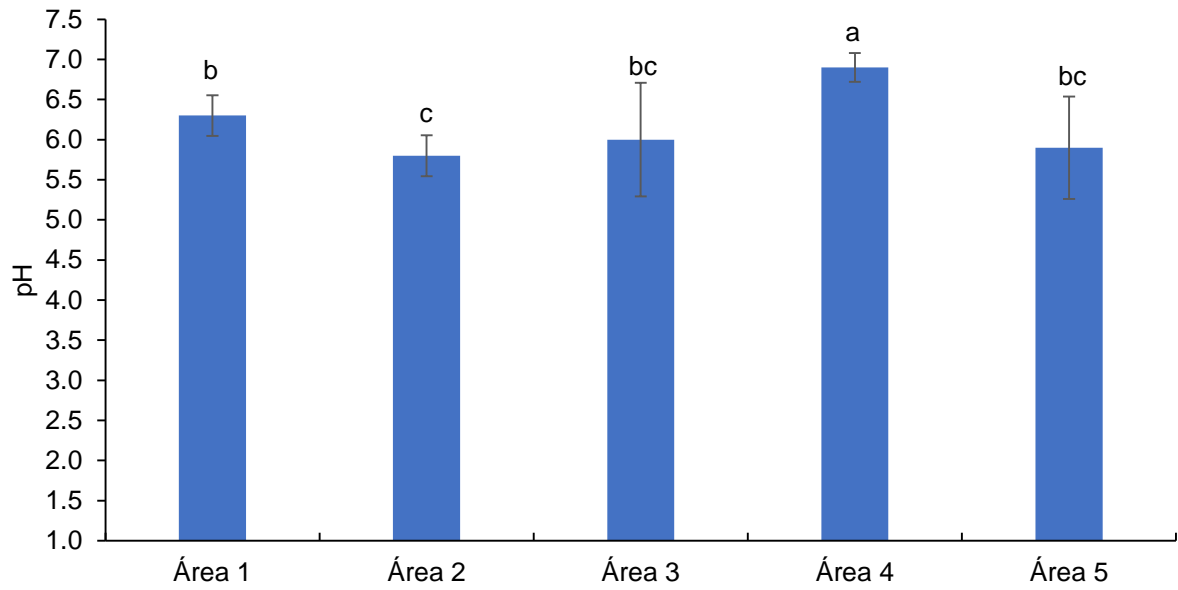


Figura 1.22. Valores de pH en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

1.6.3.2. Materia Orgánica (MO)

La cobertura forestal influyó en el contenido de MO mediante el aporte de hojarasca al suelo, los porcentajes de MO obtenidos son altos de acuerdo con la NOM-021 RECNAT- 2000 (11.0 -16.0), estos no presentaron diferencias estadísticamente significativas $X^2=1.2220$, $df=4$, $p\ value=0.8870$ entre las áreas (Figura 1.23).

El mayor contenido de MO se obtuvo en el área 1 rehabilitada con *C. lindleyi* en zanjas, sobre tepetate rojo (14.1 %) y en el sitio de referencia (12.9 %), mientras que los de menor contenido de MO fueron los suelos con *E. globulus* en terrazas y tepetate blanco (11.1 %) y los de *P. radiata* y *P. montezumae* con 12.3 y 11.8 %, respectivamente.

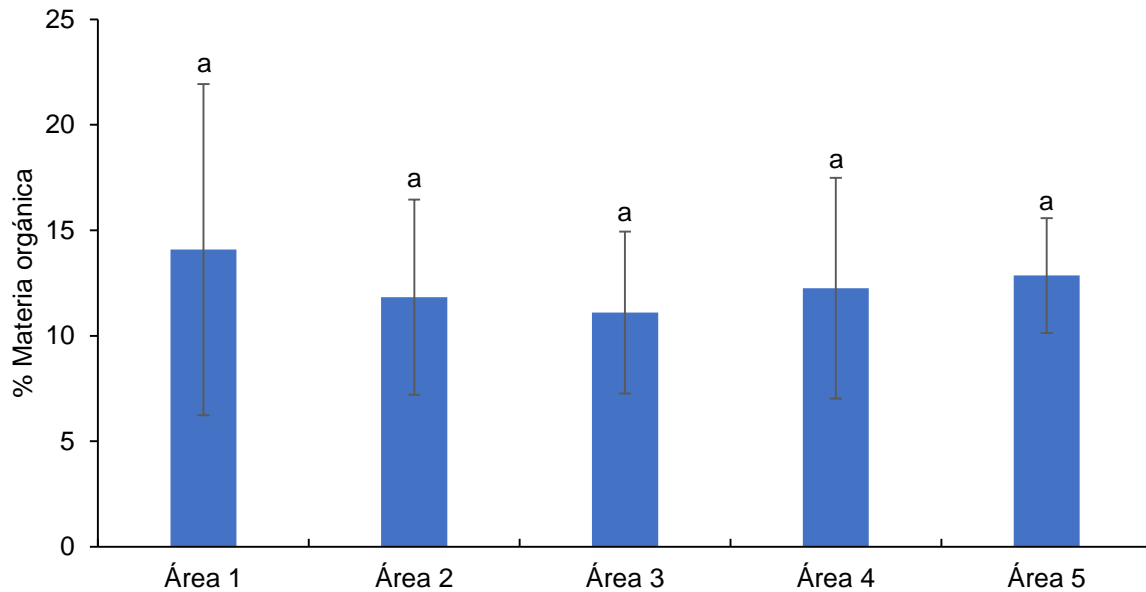


Figura 1.23. Porcentaje de materia orgánica en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

1.6.3.3. Contenido de nitrógeno total

El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas ($\chi^2=10.8960$, $df=4$, $p\ value=0.0190$), principalmente entre el sitio de referencia y las áreas rehabilitadas. El mayor contenido se obtuvo en el sitio de referencia y el menor en área 2 con *P. montezumae* los cuales mostraron diferencias significativas ($p\ value=0.0012$) (Figura 1.24).

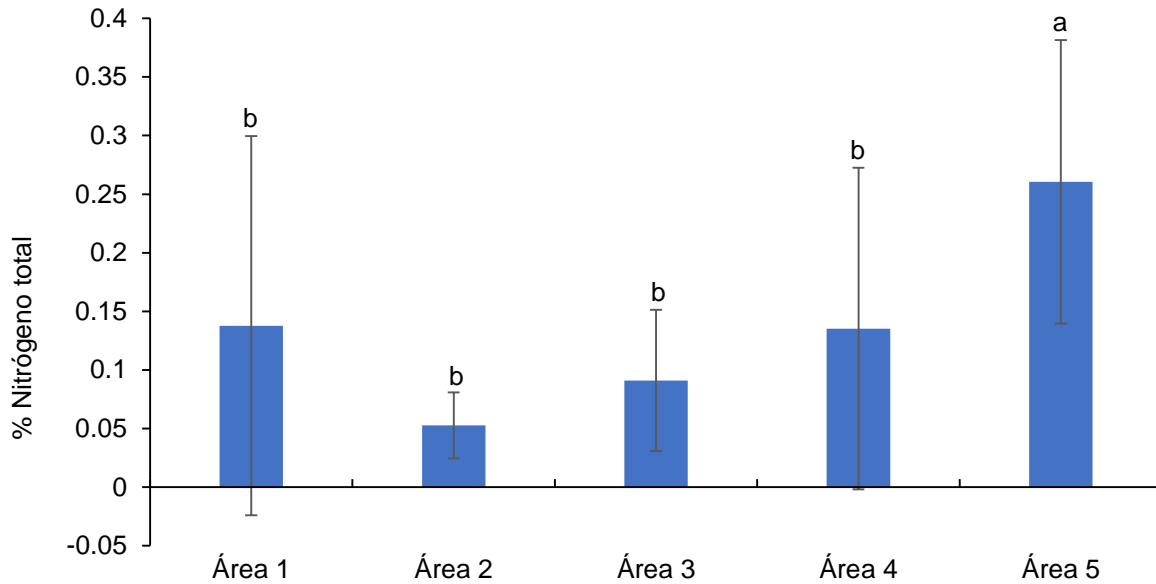


Figura 1.24. Porcentaje de nitrógeno en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Los promedios del porcentaje de nitrógeno total varían entre 0.05 % y 0.26 %, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, el contenido de nitrógeno en los suelos estudiados es bajo (<30%). Los valores más bajos se obtuvieron en plantaciones de *P. montezumae* (0.05 %) y *E. globulus* (0.09 %), en las plantaciones de *C. lindleyi* y *P. radiata* el contenido promedio de nitrógeno fue de 0.14 % y en el sitio de referencia se obtuvo un promedio de 0.26%.

1.6.3.4. Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico es influenciada principalmente por las características del material parental (tepetate), por la cantidad de arcillas, el contenido de materia orgánica y el grado de descomposición en que se encuentre (Porta *et al.*, 1999).

En la figura 1.25 se presentan los promedios de la CIC de los suelos estudiados. De acuerdo con el análisis de varianza no presento diferencias estadísticamente significativas entre las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia ($F=1.24$, $df=4$, p

value=0.3132). a pesar de que los valores de la CIC fueron altos (25-40 Cmol/kg) de acuerdo a la norma NOM021-RECNAT-2000.

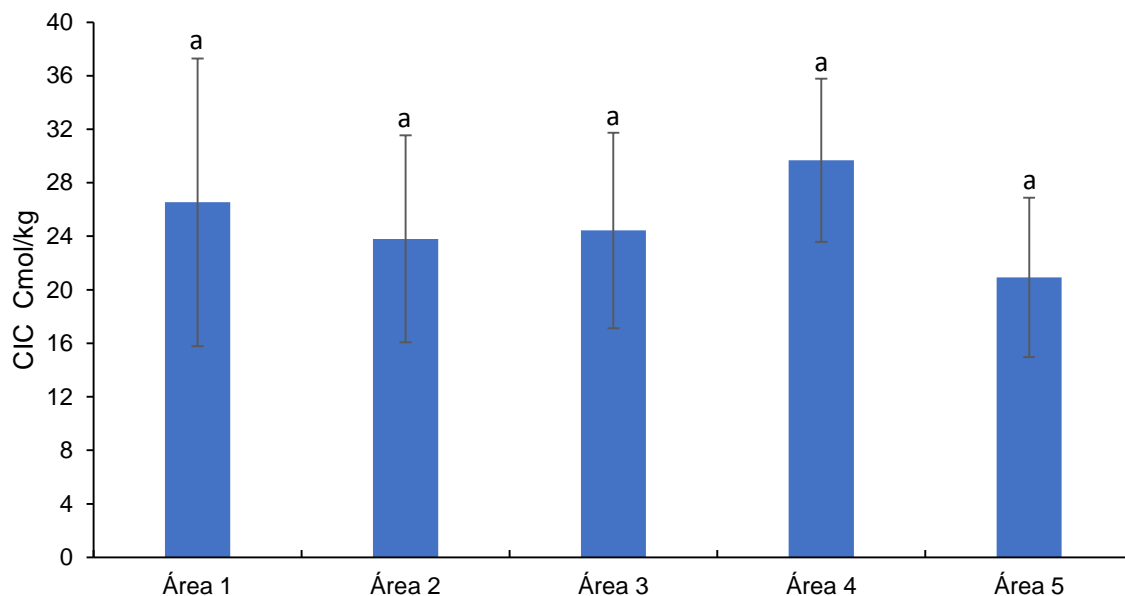


Figura 1.25. Valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

El promedio más bajo de CIC se obtuvo en el sitio de referencia (20.93 Cmol/kg). Los valores en áreas rehabilitadas van de 23.8 Cmol/kg en *P. montezumae* a 29.7 Cmol/kg en *P. radiata*, mientras que en *C. lindleyi* y *E. globulus* los valores de CIC obtenidos fueron de 26.5 Cmol/kg y 24.4 Cmol/kg, respectivamente.

1.6.3.5. Sodio (Na)

El sodio es el catión básico que se encontró entre un rango de 3.98 y 6.22 cmol/kg. Los contenidos de Na en las áreas estudiadas presentaron diferencias estadísticas significativas ($X^2=19.4968$, $df=4$, $p\ value<0.0001$), la principal diferencia se obtuvo entre el sitio de referencia y el área 1 de *C. lindleyi* ($p\ value<0.0001$) y con el área 2 rehabilitada con *P. montezumae* ($p\ value<0.0002$) sin embargo no presento diferencias con las áreas rehabilitadas con *E. globulus* y *P. radita* (Figura 1.26).

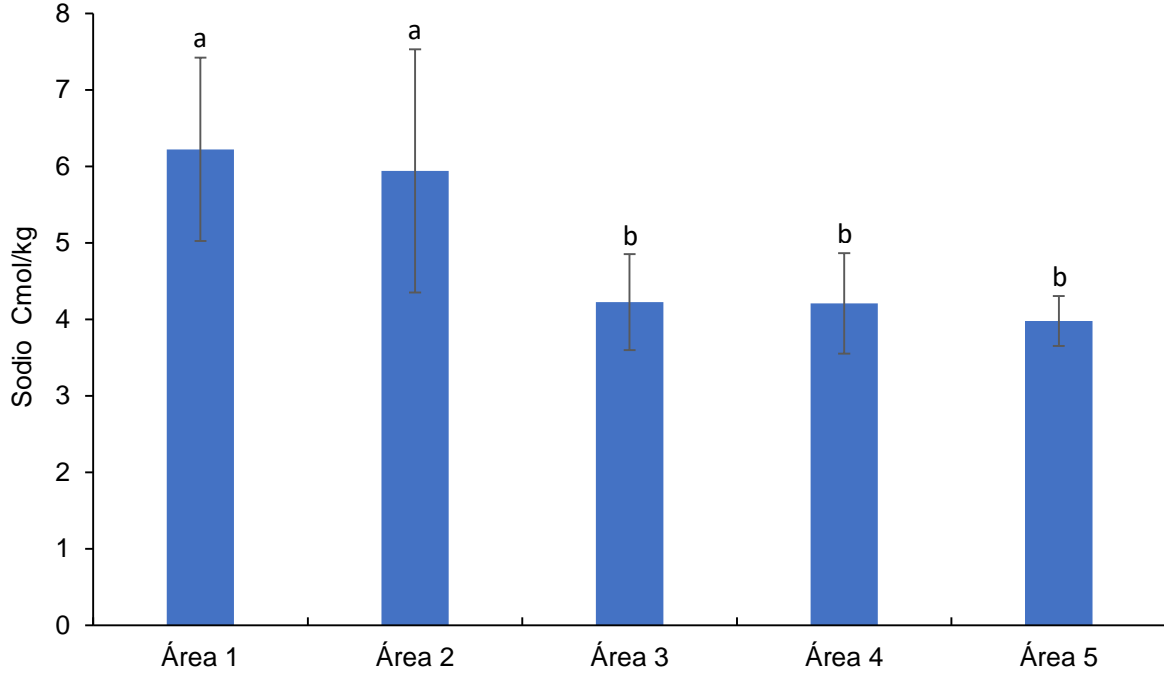


Figura 1.26. Contenido de sodio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Los contenidos más altos de Na se encontraron en suelos rehabilitados, en el área 1 con *C. lindeyi* (6.22 Cmól/kg) y área 2 de *P. montezumae* (5.94 Cmól/kg), mientras que los niveles más bajos de Na se presentaron en el área 5 del sitio de referencia con *Q. rugosa* (3.98 Cmól/kg). En *P. radiata* y *E. globulus* los valores obtenidos fueron similares (4.2 Cmól/kg). Las diferencias entre las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia pueden deberse a la desagregación de tepetate que posiblemente liberó sodio.

1.6.3.6. Calcio (Ca)

El Calcio es el catión que se presentó en mayor proporción y su concentración varía entre 16.9 y 22.4 Cmol/kg El análisis de Kruskal-Wallis mostro diferencias estadísticas en los contenidos de calcio entre las diferentes áreas ($X^2=14.7764$, $df=4$, $p\ value=0.0018$). La mayor diferencia significativa se obtuvo entre en el área 4 de *P. radiata* y el área 2 con *P. montezumae* ($p\ value <0.0001$), el sitio de referencia presento diferencias en contenido de Ca únicamente con el área 4 de *P. radiata* ($p\ value <0.0023$) y no se obtuvieron diferencias significativas con las áreas rehabilitadas con *C. lindleyi*, *P. montezumae* y *E. globulus* (Figura 1.27).

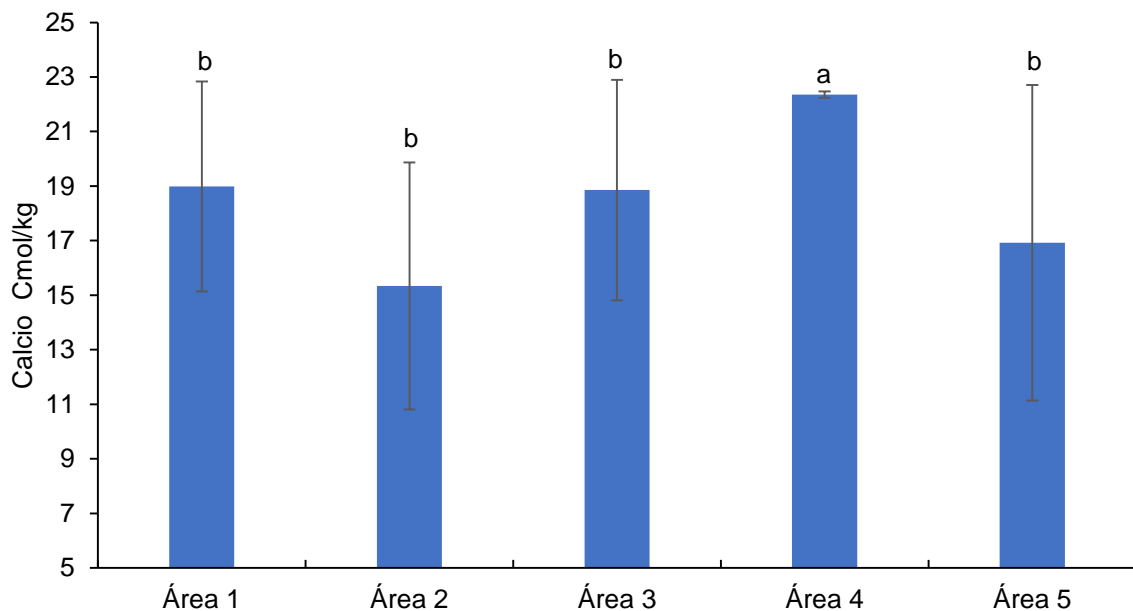


Figura 1.27. Contenido de calcio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

En los suelos de áreas rehabilitadas con *C. lindleyi* en zanjas trinchera y *E. globulus* en terrazas el contenido promedio de Ca fue de 18.9 Cmol/kg, el contenido más alto se obtuvo en el área rehabilitada con *P. radiata* en terrazas (22.4 Cmol/kg) y el menor contenido en el área 2 de *P. montezumae* en zanja trinchera (15.34 Cmol/kg), así como el sitio de referencia con un contenido de Ca de 16.92 Cmol/kg.

1.6.3.7. Potasio (K)

El mayor o menor contenido de potasio depende principalmente del material parental y el grado de meteorización de este (López-Mateo *et al.*, 2002). En los suelos estudiados el contenido de K presentó diferencias estadísticas significativas ($\chi^2=11.6983$, $df=4$, $p\text{ value}=0.0122$) entre las áreas estudiadas, el mayor contenido de potasio se obtuvo en suelos del área 1 de *C. lindleyi* y presentó diferencias significativas con los suelos del sitio de referencia y *P. radiata* ($p\text{ value}=0.0036$, $p\text{ value}=0.0142$ respectivamente) (Figura 1.28).

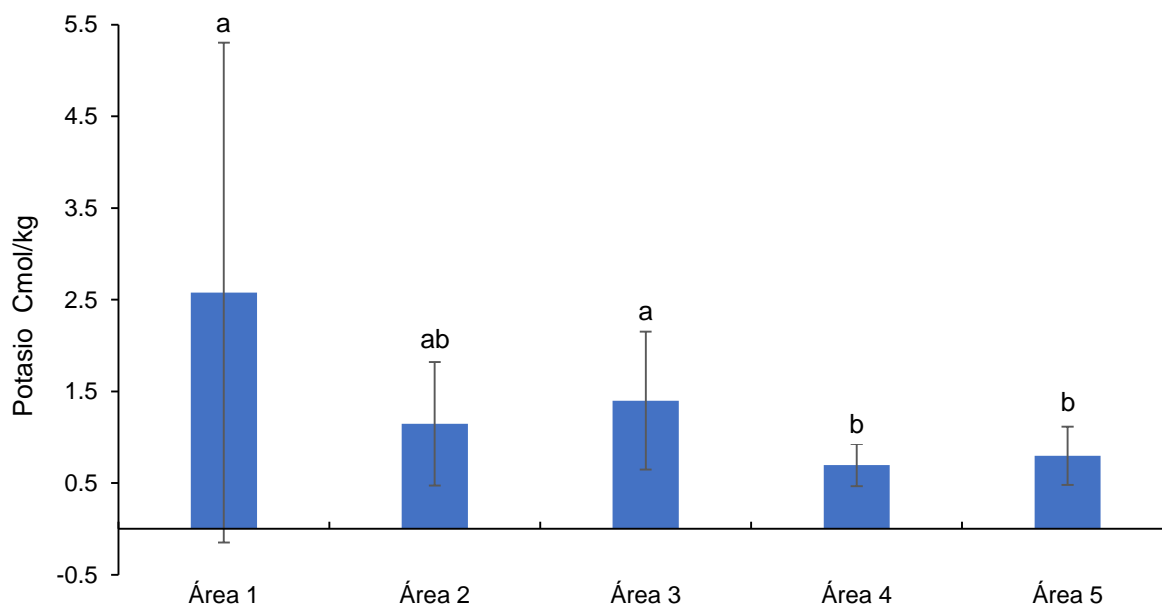


Figura 1.28. Contenido de potasio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$)

El contenido de K más alto se encontró en el área 1 de *C. lindleyi* en zanjas y tepetate rojo (2.6 Cmol/kg). En las áreas 2 con *P. montezumae* y el área 3 de *E. globulus* el contenido de K fue de 1.1 y 1.4 Cmol/kg respectivamente, mientras que los contenidos más bajos se encontraron en el área 4 de *P. radiata* y el sitio de referencia con valores de 0.7 Cmol/kg y 0.8 Cmol/kg respectivamente.

1.6.3.8. Magnesio (Mg)

El mayor contenido de Mg se encontró en los suelos rehabilitados con *P. radiata* y terrazas (área 4) con una concentración de 4.93 Cmol/kg y en menor cantidad en los suelos de *Q. rugosa* (área 5) con una concentración de 3.09 Cmol/kg. Los suelos en *C. lindleyi* con zanjas trinchera del área 1, presentaron contenidos promedio de 3.81 Cmol/kg, en el área 2 de *P. montezumae* y zanjas trinchera de 3.41 Cmol/kg, mientras que en el área rehabilitada con *E. globulus* y terrazas el contenido promedio fue de 3.13 Cmol/kg. El análisis de Kruskal-Wallis mostro diferencias significativas en el contenido de magnesio entre las diferentes áreas de estudio ($X^2=8.8555$, $df=4$, $p\ value=0.0549$) Las mayores diferencias se obtuvieron entre el área 4 (*P. radiata*) y las áreas áreas 3 (*E. globulus*) y 5 (*Q. rugosa*) ($p\ value=0.0158$, $p\ value=0.0113$ respectivamente) (Figura 1.29).

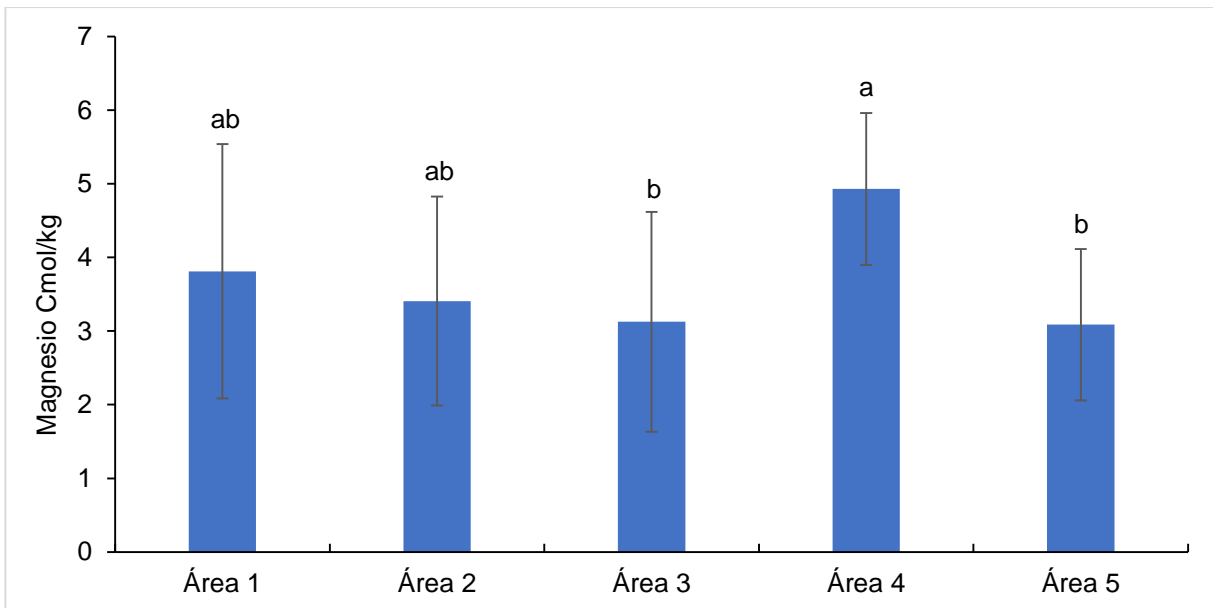


Figura 1.29. Contenido de magnesio en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

1.6.3.9. Porcentaje de saturación de bases (PSB)

La saturación de bases se relaciona con el pH del suelo valores altos indican que los sitios de intercambio de una partícula de suelo están dominados por iones no ácidos (Na, Ca, Mg y K). La saturación de bases proporciona información de la acidez, la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad de los suelos en general. También le permite determinar la capacidad del suelo para actuar como un amortiguador frente al pH ácido.

Los porcentajes de saturación de bases en las áreas estudiadas no presentaron diferencias estadísticas significativas ($\chi^2=2.6989$, $df=4$, $p\ value=0.6303$), se obtuvieron valores más bajos en las áreas rehabilitadas en comparación con los valores obtenidos en el sitio de referencia (Figura 1.30).

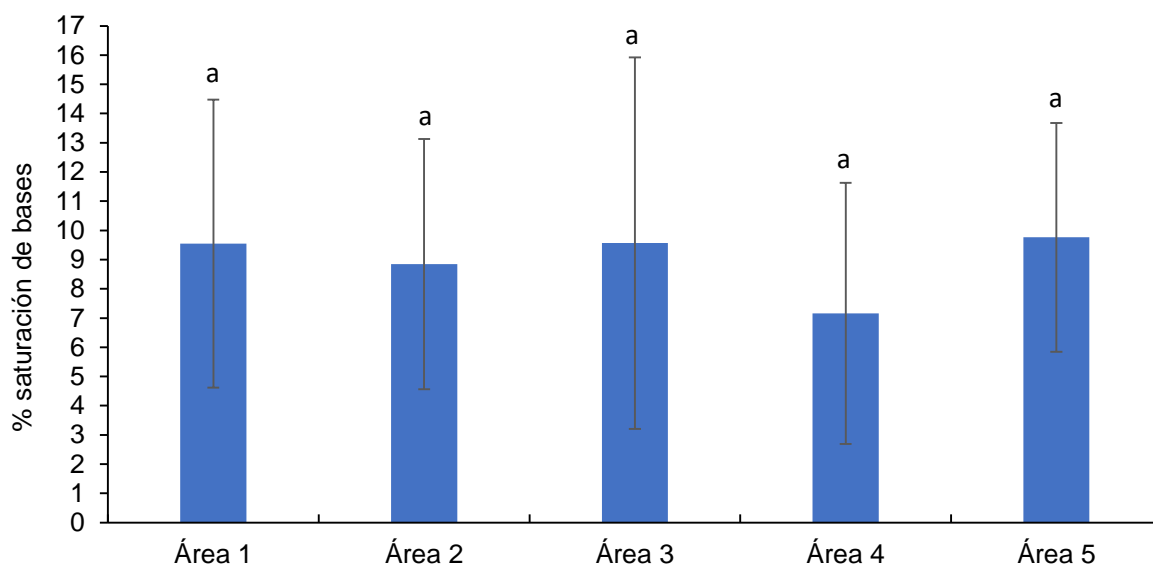


Figura 1.30. Porcentaje de saturación de bases de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

El promedio de los porcentajes de saturación de bases en las áreas rehabilitadas varió de 7.2 a 9.6%, mientras que en el sitio de referencia este valor fue ligeramente mayor de 9.8% cuando es comparado con los de las áreas rehabilitadas.

1.6.3.10. Contenido de carbonatos

El contenido de carbonatos en los suelos estudiados varió de 0.46 a 1.14 %. El análisis estadístico mostró diferencias significativas en el porcentaje de carbonatos entre las áreas estudiadas ($F=5.05$, $df=4$, $p\text{ value}=0.0026$). Se presentaron diferencias significativas entre las áreas 1 y el área 5 ($P\text{ value}=0.0081$) y el área 2 ($P\text{ value}=0.0379$) (Figura 1.31).

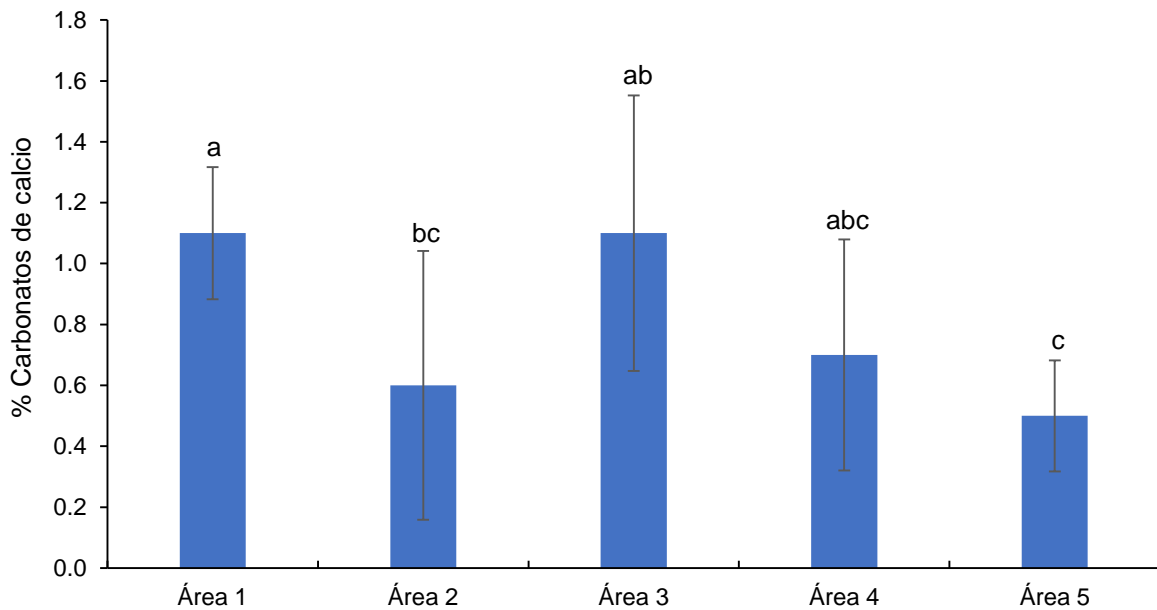


Figura 1.31. Contenido de carbonatos en los suelos de las cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia en la cuenca de río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Los valores más altos se obtuvieron en las áreas 1 de *C. lindleyi* en zanjas trinchera y área 3 de *E. globulus* en terrazas, sin diferencias entre ellos, los valores más bajos se presentaron en el sitio de referencia, el área 2 de *P. montezumae* en zanjas trinchera, y área 4 de *P. radiata* en terrazas con valores de 0.5, 0.6 y 0.7 % respectivamente.

1.7. DISCUSIÓN

1.7.1. Desarrollo de perfiles de suelos en las áreas rehabilitadas

El material parental original de los suelos fueron tepetates rojo y blanco roturados con maquinaria pesada y se realizaron obras de conservación de suelo como terrazas y zanjas trinchera con reforestaciones de *C. lindleyi*, *P. montezumae*, *E. globulus* y *P. radiata*.

Los procesos pedogenéticos de migraciones, transformaciones, remociones y adiciones son los responsables de la diferenciación de los horizontes en un perfil de suelo, ocurren desde el origen de la formación del suelo y van cambiando sus propiedades para constituirse en los horizontes del suelo (Petre *et al.*, 2012). De acuerdo con las características de los perfiles estudiados y considerando las prácticas realizadas previo a las reforestaciones se puede inferir el proceso de transformación de los tepetates para llegar a la formación de los horizontes, este proceso se explica a continuación:

I.- El tepetate comienza a desintegrarse por acción de la precipitación, debido a que la superficie esta descubierta, los materiales son erosionados hacia las partes más bajas.

II.- La reforestación y las obras de conservación de suelo producen la acumulación de materia orgánica, una mayor disgregación del tepetate y acumulación de fragmentos de tepetate.

III.- Por la agregación del tepetate, se forma un perfil con horizonte A y un horizonte C.

IV.- En el horizonte A se acumula mayor cantidad de materia orgánica, se forma un horizonte B de acumulación de materiales finos y un horizonte C de tepetate menos alterado.

Este proceso se ilustra en la Figura 1.32.

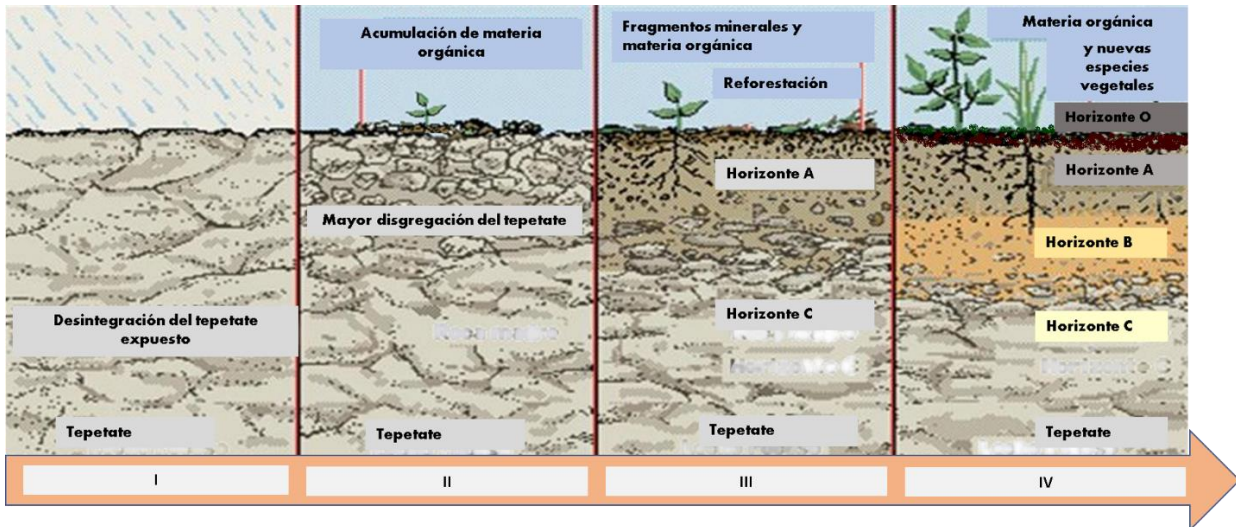


Figura 1.32. Esquemización del proceso de intemperismo del tepetate posterior a la roturación con maquinaria pesada (INTAGRI, 2017).

Los principales horizontes del perfil de suelo que se formaron a través del tiempo en las áreas rehabilitadas son:

Horizonte O. Por acumulación de materia orgánica producto de restos vegetales que forman humus al descomponerse.

Horizonte A. De color oscuro, material mineral mezclado con materia orgánica, compuestos solubles que son arrastrados a capas inferiores (lixiviación), con abundancia de raíces.

Horizonte Bw. Bajo contenido de materia orgánica, colores claros, acumulación de arcillas y menor cantidad de raíces que el horizonte superior.

Un suelo bien desarrollado se caracteriza por presentar una secuencia de horizontes pedogenéticos donde puede o no existir un horizonte orgánico O, un horizonte A con presencia de materia orgánica donde se desarrollan la mayoría de las raíces y contiene una gran parte de los nutrimentos y el agua disponible para el desarrollo de las plantas, este horizonte es único e indispensable para que un suelo se considere desarrollado, un horizonte Bw el cual indica un proceso avanzando de transformación del material original y finalmente un horizonte C poco alterado. De acuerdo con los perfiles de suelo estudiados en las áreas rehabilitadas se puede observar que los

suelos más desarrollados son el área 1 de *C. lindleyi* con zanjas trinchera sobre tepetate rojo y en el área 4 reforestada con *E. globulus* en terrazas sobre tepetate blanco.

El perfil de suelo en el área 1 rehabilitada con reforestación de *C. lindleyi* con zanjas trinchera, presenta una secuencia de horizontes; O, A, Bw y C, con una profundidad total de 32.5 cm. La secuencia de horizontes el área 3 de *E. globulus*, en terrazas, presentan una secuencia de horizontes muy similar (O, A, Bw y C), con profundidades de 32.5 y 46 cm, respectivamente, sin embargo, este último presenta un horizonte orgánico muy delgado.

Los suelos del área 2 rehabilitada con *P. montezumae* y zanjas trincheras en tepetate rojo, se consideran poco desarrollados ya que el perfil está constituido únicamente por un horizonte orgánico, seguido del material parental poco intemperizado, de la misma forma el perfil del área 4 con *P. radiata* y terrazas, donde también se presenta un horizonte orgánico delgado y se tiene un horizonte AC, sin embargo, no se observa la presencia de un horizonte Bw.

Las obras de conservación no son determinantes en el desarrollo del suelo, sin embargo, si ejercen cierta influencia al igual que otros factores como la vegetación. En este estudio las prácticas de conservación de suelos que mostraron mayor influencia sobre el desarrollo del suelo fueron las terrazas, ya que al haber mayor movimiento se favorece el rompimiento del material y de esta forma se produce mayor superficie expuesta a los factores de intemperismo, se favorece la creación de micro poros que facilitan la entrada tanto de agua, raíces y microorganismos. Contrario a las zanjas trincheras donde el movimiento del suelo se realiza sobre un área pequeña, la cantidad de material expuesto es poco y no ejerce mayor influencia que en el área donde se ubica.

1.7.2. Propiedades físicas

El material parental (tepetate) es un factor pasivo que ha sido alterado por diferentes factores tanto climáticos, como por actividades como la reforestación y prácticas de conservación de suelo y agua, a través de aproximadamente 50 años, dándole propiedades y morfología definidas a los suelos actuales.

El establecimiento de la vegetación y las obras de conservación de suelo y agua, fragmentaron el tepetate a partículas más pequeñas produciendo mayor superficie específica de exposición y el movimiento de estos materiales, provocando cambio en la distribución superficial de las mismas, lo cual modificó las propiedades físicas y químicas del tepetate y han definido las propiedades morfológicas del suelo.

El color permite identificar diferentes grupos de suelos, procesos pedológicos para diferenciar horizontes del suelo y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos como la MO, textura, composición mineralógica y su morfología (Soil Survey Division Staff, 1999; Domínguez *et al.*, 2012). Los matices más oscuros indican mayor contenido de materia orgánica que los matices más claros. El color negro o gris oscuro presente en las áreas con vegetación natural de *Q. rugosa* es el resultado de la acumulación de materia orgánica. El color del suelo tiene también una estrecha relación con el proceso de humificación de la materia orgánica y los minerales presentes (Ruck *et al.*, 2004), los colores más claros en seco en las áreas 3 y 4 rehabilitadas con *E. globulus* y *P. radiata* sobre terrazas, indican un proceso lento de humificación de la materia orgánica o poca presencia de ella y la presencia de minerales del material original en el suelo en un estado de poca transformación para el caso de eucalipto. El color del suelo también es un indicador de los procesos pedogenéticos que ha sufrido el material parental; en este caso los tepetates originales. Al respecto, Peña y Zebrowski (1991) determinaron el color de dos tipos de tepetate uno de ellos se caracterizó por presentar colores amarillentos en seco y pardo en húmedo, mientras que los otros presentaron colores más claros, variando de seco

a húmedo entre gris claro y blanco, la influencia de la vegetación al aportar materia orgánica ha conferido colores oscuros al material original en las áreas rehabilitadas.

Respecto a la densidad aparente y la textura del suelo, este se relaciona directamente con el material de origen del suelo, el desarrollo de estructura y la compactación. Los valores de densidad aparente están relacionados con el tamaño de partículas que conforman el suelo, según Ingaramo (2003) los suelos limosos presentan valores de densidad aparente de 1.15 a 1.4 g/cm³, mientras que donde dominan las arenas los valores de densidad aparentes se encuentran entre 1.5 y 1.8 g/cm³, estos coinciden con los valores de densidad aparente reportados por la FAO, en suelos arenosos la DA es de 1.65 g/cm³; para suelos franco arenosos es de 1.5 g/cm³; en suelos de textura franca de 1.4 g/cm³; en franco arcilloso de 1.33 g/cm³; suelos arcillo arenosos de 1.3 g/cm³ y los suelos arcillosos de 1.25 g/cm³ (FAO 2009).

En las áreas estudiadas los valores de densidad aparente fueron de 1.3 a 1.5 g/cm³, en los suelos endurecidos estos valores tienden a ser mayores debido principalmente al tipo de material que les da origen y el estado de compactación en que se encuentren. Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) obtuvieron valores de densidad aparente que van de 1.46 a 2.08 g/ m³ con una tendencia a incrementarse a mayor profundidad, de la misma forma, Peña y Zebrowski (1991), obtuvieron valores de densidad de tepetates que van de 1.23 a 1.55 g/cm³, mientras que Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) y Ávila-Campuzano *et al.* (2011) obtuvieron valores menores a 1 hasta 1.7 g/cm³ este último en tepetates completamente cementados e inalterados.

Los valores de densidad aparente obtenidos en este estudio, indican una disminución respecto a los valores de los materiales cementados, ya que los tepetates han sufrido cambios debido principalmente a la implementación de prácticas de conservación de suelo donde se realizaron roturaciones del material cementado y movimiento de este, así como por la acción de la vegetación.

1.7.3. Propiedades químicas

Las actividades de rehabilitación generaron cambios en las propiedades químicas del suelo principalmente, comparadas con el tepetate original (Peña y Zebrowski, 1992), en el cuadro 1.5 se muestran los cambios comparando las propiedades químicas encontradas con las del tepetate original.

Cuadro 1. 5. Comparación de valores de propiedades químicas del tepetate en 1992 y después de la rehabilitación en 2019.

Año	pH	MO %	N %	CIC Cmol/kg	Na Cmol/kg	Ca Cmol/kg	K Cmol/kg	Mg Cmol/kg	Bases %	CaCO ₃ %
1992	7.8	0.1	0.3	25.0	1.3	10.0	1.6	7.3	80.0	1.9
2019	6.2	12.3	0.1	26.1	5.2	18.9	1.5	3.8	8.8	0.9

Comparando los resultados de los análisis químicos de las muestras de tepetate molido analizados por Peña y Zebrowski en 1992 se observan los siguientes cambios en las propiedades químicas: pH cambió de medianamente alcalino a moderadamente ácido, el % de materia orgánica se incrementó considerablemente, pasando de inexistente a alta, el nitrógeno disminuyó y la capacidad de intercambio catiónico se mantuvo constante. El porcentaje de saturación de bases disminuyó considerablemente, incrementándose los contenidos de Ca y Na, disminuyendo el contenido de Mg y carbonatos y manteniéndose similares los contenidos de K. Los cambios observados en este periodo indican que después de 27 años se han dado procesos de acidificación del suelo, incremento en el % de materia orgánica, disminución del porcentaje de saturación de bases Mg e incrementándose el Ca y Na. También se disminuyó el porcentaje de carbonatos y el % de N y la CIC no cambiaron significativamente.

En los suelos estudiados los valores de pH se encontraron en un rango de 5.75 a 6.85, los cuales se encuentran dentro de los valores obtenidos por Ávila-Campuzano *et al.* (2011) en tepetates con reforestación de eucalipto con valores de 4.6 a 6.2 y en *P. montezumae* de 5 a 7.7. La presencia de carbonatos también influye en la acidez o alcalinidad de los suelos. Etchevers-Barra *et al.* (1992), obtuvo valores de pH cercanos

a neutros (7.5 - 7.8) en tepetates con contenido bajo de carbonatos y valores más altos de pH (8.2 - 8.8) en tepetates muy cementados con encostramiento calcáreo. Similarmente, Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) y Acevedo-Sandoval *et al.* (2003), quienes obtuvieron valores de pH ligeramente ácidos en los horizontes superficiales con valores de 4 a 6 que tienden a ser neutros y alcalinos (6 a 8) a mayor profundidad, siendo los valores más altos en horizontes completamente cementados.

La acidez y alcalinidad del suelo son dos propiedades de gran importancia en el suelo ya que tienen influencia en diversos procesos químicos y biológicos, algunos de los cuales son dependientes de un rango específico de acidez o alcalinidad, de la misma forma la presencia de ciertos microorganismos está determinada por el grado de acidez o alcalinidad del suelo (Thiers *et al.*, 2014). La vegetación juega un papel importante en la modificación de la acidez del suelo, principalmente en los horizontes superficiales (Zalba y Peinemann, 1987). La acidez es más alta en el primer horizonte del suelo (horizonte A) y disminuye en las capas más profundas (horizonte B). La causa principal de dicha acidificación en plantaciones de eucalipto es que extrae grandes cantidades de calcio del suelo, contribuyendo así a que el pH descienda (Delgado *et al.*, 2006).

La acumulación de materia orgánica se debe a que la mineralización de la misma es lenta. La cantidad de materia orgánica en el suelo es diferente en función de la especie de reforestación, el mayor contenido se obtuvo en el área de *C. lindleyi* (14.1%) y un menor porcentaje en *E. globulus* (11.8%), sin embargo, ambos valores se consideran altos. Estos valores son similares a los reportados por Ávila *et al.* (2011) quienes obtuvieron valores altos de carbono orgánico en tepetates reforestados con *Cupressus* sp. y *P. montezumae* y valores más bajos en reforestaciones de eucalipto. El mayor contenido de materia orgánica se encuentra en los horizontes superficiales (orgánicos) mientras que en los horizontes minerales los porcentajes de carbono orgánico disminuyen a medida que aumenta la profundidad. En sitios con tepetates el contenido de MO tiende a ser muy bajo, Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) obtuvieron contenidos de MO de 4.6 y 2.99% en los horizontes superficiales y se observó que el

contenido disminuye cuando aumenta la profundidad del perfil. Resultados similares fueron obtenidos por Rodríguez-Tapia *et al.* (1999) quienes obtuvieron contenidos de carbono orgánico en tepetates que van de 0.4% a 8% teniendo valores altos en los horizontes más superficiales, así mismo, Etchevers-Barra *et al.* (1992) obtuvo valores de 0.1 y 0.2% de contenido de materia orgánica en tepetates sin vegetación.

Los cambios en la vegetación y el uso del suelo modifican la dinámica del C y N edáficos. Su ciclo es altamente móvil en los ecosistemas tanto forestales como agrícolas y se ve altamente afectado por el movimiento del agua y la actividad de microorganismos. Respecto a la disponibilidad de N, los suelos rehabilitados presentaron contenidos de N bajos como fue el caso en el suelo con *P. montezumae* (0.05%) con respecto al área con vegetación nativa con *Q. rugosa* (0.26%), esto se debe principalmente a las características del material parental. Etchevers *et al.* (1992), reportan bajos contenidos de N (0.02 a 0.04%) en tepetates desprovistos de vegetación. El tiempo de formación del suelo y la incorporación de cubierta vegetal que provee de materia orgánica al suelo han dado lugar a la presencia de N en el suelo.

El rango de valores de la CIC en las áreas rehabilitadas fue de 23.8 a 29.7 Cmol/kg, sin embargo, los valores que fueron obtenidos por Ávila *et al.* (2011) en tepetates bajo reforestaciones, el suelo bajo reforestación de *E. globulus* presentaron valores más altos de hasta 82 Cmol/kg, mientras que los suelos con reforestación de *P. montezumae*, los valores fueron de 55 Cmol/kg en el horizonte superficial y tendieron a disminuir en función de la profundidad del perfil. En tepetates sin cobertura vegetal los valores tienden a ser más bajos; Etchevers *et al.* (1992) obtuvieron valores de CIC que van de 16.9 meq/100 g en tepetates con bajo contenido de carbonatos, mientras que los valores más altos (25.9 a 32.0 meq/100 g) se dieron en los tepetates con alto contenido de carbonatos de calcio; esto se relacionó con el tipo de arcilla presente en cada tipo de tepetate. Así mismo Acevedo *et al.* (2003) obtuvieron valores de CIC en tepetates de 16.5 a 33.3 meq/100 g y Rodríguez *et al.* (1999) valores que van de 48.1

Cmol/kg en la superficie y disminuyen hasta 30 Cmol/kg a medida que aumenta la profundidad.

Respecto al contenido de Na en los tepetates rehabilitados se obtuvieron valores que van de 4.21 a 6.22 Cmol/kg. Al contrario, Etchevers *et al.* (1992) obtuvo niveles de Na intercambiable que van de 0.4 a 3.9 meq/100 g.

Los valores de Ca obtenidos en este estudio van de 15.34 a 18.99, los cuales se consideran bajos, en contraste, Ávila *et al.* (2011) obtuvo valores de Ca que van de 1.48 a 24.73 Cmol/kg⁻¹ en tepetates con reforestaciones de Eucalipto, valores de 25.69 a 38.48 Cmol/kg⁻¹ en reforestaciones con *P. montezumae* y de 9.21 a 31.62 Cmol/kg⁻¹ reforestaciones de Cupressus, mientras que Etchevers *et al.* (1992) obtuvo concentraciones de Ca que varían de 6.7 a 15.7 meq/100 g en tepetates con bajo contenido de carbonatos de calcio y valores que varían de 11.4 a 45.5 meq/100 g en tepetates con alto contenido de CaCO₃.

Según Thompson y Troeh (2002), el contenido de K en los suelos es de 0.5 y 4%. Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de este rango y son similares a los obtenidos por Ávila *et al.* (2011), quienes obtuvieron concentraciones de K de 0.47 a 2.54 Cmol/kg en reforestaciones de Cupressus, de 0.11 a 0.41 Cmol/kg en reforestaciones de *E. globulus* y 0.78 a 1.21 Cmol/kg en *P. montezumae*. Etchevers *et al.* (1992) obtuvo en tepetates contenidos de potasio bajos que van de 0.6 a 3.4 meq/100 g.

El contenido de Mg y K en los suelos está directamente relacionado con el material parental y su grado de meteorización, algunas rocas ígneas son la principal fuente de Mg en los suelos. Contenidos altos de Mg suelen estar relacionados con suelos alcalinos o ligeramente ácidos (Mikkelsen, 2010). La meteorización de los tepetates por la ruptura del material endurecido y seguido de la acción biológica de la vegetación y microorganismos, así como por procesos químicos dentro del material ha dado lugar la liberación del Mg.

El contenido de carbonatos en los suelos estudiados está en función del material parental que les dio origen, así como de los procesos pedogenéticos que han ocurrido en él. El menor contenido de CaCO_3 se obtuvo en el área con vegetación nativa de *Q. rugosa* (0.46%), mientras que las áreas rehabilitadas presentaron valores mayores que van de 0.57 a 1.14%. Estos valores son más bajos que los obtenidos por Etchevers *et al.* (1992) en tepetates donde el valor más bajo es de 1.4 y el valor más alto de 14.2 %.

El grado de meteorización del material parental es clave en la disponibilidad de elementos como el Ca, Mg, Na y K, estos elementos son liberados paulatinamente con la modificación del tepetate por acción de prácticas mecánicas, acción de microorganismos y vegetación, así como los procesos biogeoquímicos que ocurren en él.

1.8. CONCLUSIONES

Las actividades de rehabilitación de los tepetates, mediante la roturación, obras de conservación de suelos y reforestación con diferentes especies forestales han favorecido la formación de perfiles de suelo diferentes. Se han producido cambios en las propiedades físicas, el color se modificó por la incorporación de materia orgánica y drenaje deficiente, la presencia de un horizonte orgánico producto de la hojarasca generada por los árboles, el cual sirve como reservorio de nutrientes y como hábitat para microorganismos del suelo, se han modificado propiedades del tepetate como la densidad aparente, porosidad, textura. Respecto a las propiedades químicas el mayor cambio se produjo un proceso de acidificación de pH moderadamente ácido en el sitio de referencia a pH neutros en los sitios rehabilitados, el porcentaje de saturación de bases se redujo considerablemente de 80% en el material original a valores cercanos al 10 % en las áreas rehabilitadas y se modificó la disponibilidad de nutrientes lo cual lleva a propiciar condiciones favorables para el establecimiento de otras especies vegetales incluidas herbáceas, pastos y arbustos.

El tipo de tepetate, obra de conservación y especies usadas para la reforestación, influyeron en el desarrollo del perfil de suelo y sus propiedades físicas y químicas. El perfil con mayor desarrollo fue en el área 5 con vegetación nativa de *Q. rugosa* (O, A, Bw, Bw2) y en áreas rehabilitadas los perfiles más desarrollados y profundos fueron área 3 de *E. globulus* con terrazas (O, A, Bw, C) y área 1 de *C. lindleyi* con zanjas trinchera (O, A, Bw, C). Los suelos con menor desarrollo del perfil fueron los suelos con *P. montezumae* con zanja trinchera (O, C) y *P. radiata* con terraza (O, A, AC, C). La rehabilitación de tepetates ha mejorado las propiedades físico-químicas del tepetate permitiendo el establecimiento tanto de las especies reforestadas como de vegetación arbustiva y herbácea.

1.9. LITERATURA CITADA

- Adame-Martínez, S. y A. Gómez-Guerrero. 1999. Cartografía y evaluación de reforestaciones en la zona oriente de la cuenca de México. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.
- Adame-Martínez, S. 2003. La biodiversidad en Tepetates en la zona oriente de la cuenca de México. pp. 406-418. *In*: P. E. Olivera (ed.). Espacio geográfico epistemología y diversidad. Facultad de Filosofía y Letras. México, D. F.
- Acevedo-Sandoval, O., L. E. Ortiz-Hernández, D. Flores-Román, S. Velásquez Rodríguez y K. Flores-Castro. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del estado de México. *Agrociencia* 37: 435-449.
- Arias, R. H. 1992. Rehabilitación de tepetates una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra* 10: 309-317.
- Arizaga, S., J. Martínez-Cruz, M. Salcedo-Cabrales y M. A. Bello-González. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos Michoacanos. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- Ávila-Campuzano, G. R., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, E. Ángeles-Cervantes y P. Sánchez-Guzmán. 2011. Evaluación de las reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 303-312.
- Báez-Pérez, A., J. D. Etchevers-Barra, C. Prat, A. Márquez-Ramos y E. Ascencio-Zapata. 2007. Manejo agronómico de suelos endurecidos (tepetates) del Eje Neovolcánico de México. 69-84. *In*: J. Gallardo L. (ed.). La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos. Red Pocaiba. Salamanca, España.

- Becerra Luna, F. 1998. Inventarios integrados y monitoreo en ecosistemas forestales. Caso de estudio: Ex lago de Texcoco. pp 111-117. *In*: C. Aguirre B. y C. Rodríguez F. (eds). Simposio Científico Norteamericano. INIFAP. Guadalajara Jalisco, México.
- Blum, W. H. 1998. Basic concepts: degradation, resilience, and rehabilitation. 1-16 *In*: R. López, F. Degradación de suelos causas, procesos, evaluación e Investigación. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Bradshaw, H. W. R. and T. Sykes. 2014. Ecosystem dynamics: From the past to the future. Wiley-Blackwell. Oxford, England.
- Carabias, J., V. Arriaga, V. Cervantes Gutiérrez. 2007. Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 80: 85-100.
- Cardoza-Vázquez, R., L. Cuevas-Flores, J. S. García-Carreón, J. A. Guerrero-Herrera, J. C. González-Olarte, H. Hernández-Méndez, M. L. Lira-Quintero, J. L. Nieves-Frausto, D. Tejeda-Sartourios y C. M. Vázquez-Martínez. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. CONAFOR-SEMARNAT. México, D. F.
- Chazdon, R. L. 2008. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science* 320:1458-1460.
- Coleman, D. C., D. A. Crossley and P. F. Hendrix. 2004. Fundamentals of soil ecology. 2nd ed. Academic Press. San Diego, California.
- Coleman, D. C. and D. A. Crossley. 1996. Fundamentals of soil ecology. Academic Press. San Diego, California.

- Cruickshank, G. G. 1995. Proyecto Lago de Texcoco: Rescate Hidrológico: memoria de la evolución del proyecto que mejora en forma importante las condiciones ambientales de la zona metropolitana de la ciudad de México. PAOT. México, D.F.
- Cruickshank, G. G. 1998. Proyecto lago de Texcoco: Rescate hidrológico. Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA). México, D.F.
- Cruickshank, G. G. 2003. La cosecha del agua, Proyecto Lago de Texcoco. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México, D.F.
- Cuanalo de la Cerda, H. E. 1975. Manual de descripción de perfiles en el campo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Delgado, S., F. Alliaume, F. García-Préchac y J. Hernández. 2006. Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. sobre el recurso suelo en Uruguay. *Agrociencia*. 10: 95-107.
- Domínguez-Soto, J. M., A. D. Román-Gutiérrez, F. Prieto-García y O. Acevedo-Sandoval. 2012. Sistema de notación Munsell y Cielab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:141-155.
- Donoso-Zegers, C. 1992. Ecología forestal. El bosque y su medio ambiente. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Etchevers-Barra, J. D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. 1745-1748. *In*: R. Lal (ed.). *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker. Nueva York.

- Etchevers-Barra, J. D., R. M. López R., C. Zebrowsky y D. Peña H. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra* 10:171-177.
- FAO, 2009. Guía para la descripción de los suelos. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- FAO y GTIS. 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico. FAO. Roma, Italia.
- FAO, 2019. Soil degradation. FAO Soils Portal. Disponible en: www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/fr/. Fecha de consulta enero del 2020.
- Gama-Castro, J., E. Solleiro-Rebolledo, D. Flores-Román, S. Sedov, H. Cabadas-Báez y J. Díaz-Ortega. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*: 133-145.
- Gómez-Romero, M., J. C. Soto-Correa, J. A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas y R. Lindig-Cisneros. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* 46: 795-807.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., C. A. Ortiz-Solorio, K. Oleschko, H. Cuanalo de la Cerda. 1990. Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. *Agrociencia* 2: 91-105.
- Gutiérrez-Castorena, M. C. y C. A. Ortiz-Solorio. 1992. Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México. *Terra* 10: 202-209.

- Hernández, A. J. y J. Pastor-Piñeiro. 2008. La restauración ecológica de ecosistemas degradados: marcos conceptuales y metodologías para la acción. CIEMAT. Madrid, España.
- Ingaramo-Enrique, O. 2003. Indicadores físicos de la degradación de suelo. Tesis doctoral. Universidad de Coruña. Coruña, España.
- INTAGRI. 2017. Los Factores de Formación del Suelo. Serie Suelos.27:1-4.
- Lal, R., G. F. Hall and F. P. Miller. 1989. Soil degradation: I basic processes. Land Degradation and Rehabilitation 1: 51-69.
- Lal, R. and B. A. Stewart. 1990. Advances in soil science: soil degradation. Springer-Verlag. Nueva York, N. Y.
- Llerena-Villalpando, F. A. y B. Sánchez-Bernal. 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del valle de México. Terra 10: 302-308.
- López-Camacho, R. y M. I. Montero-González. 2005. Manual de identificación de especies forestales con manejo certificable por comunidades. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas. Bogotá, Colombia.
- López-Mateo, C., E. Álvarez M. y L. Fernández-Marcos. 2002. Potasio en suelos de Galicia y su relación con la mineralogía. Edafología 9:305-312.
- Márquez-Zarate J. C. 2013. Impacto de prácticas y obras de conservación sobre los servicios ambientales hidrológicos de la cuenca del Rio Chapingo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Edafología. Texcoco, Estado de México.
- Mikkelsen, R. 2010. Soil and fertilizer magnesium. Better crops 94:26-28.

- Montoya-Greenheck, F. 2005. Degradación y rehabilitación de ecosistemas terrestres: estado de la cuestión. *Biocenosis* 19: 24-30.
- Ortiz-Torres, C., J. D. Gómez-Díaz, F. A. Domínguez-Álvarez and A. Villanueva-Morales. 2018. Influence of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh and *Opuntia ficus-indica* L. Mill in physical and chemical soil properties. *Terra Latinoamericana* 36:275-285.
- Ojeda-Trejo, E., J. M. León-Villalobos, A. Michael, C. Dunn, y L. Cajuste-Bontemps. 2015. Cartografía Participativa para el Ordenamiento Territorial Comunitario: el caso del ejido de Santa María Nativitas, Texcoco, Estado de México. Pp. 213-237. *In: V. Sorani y M. L. Alquicira A. (eds.). Perspectivas del ordenamiento territorial ecológico en América y en Europa.* Islpep. Ciudad de México, México.
- Pedraza, L. 1987. Síntesis del proceso de establecimiento y construcción de los trabajos de conservación de suelos, agua y reforestación en áreas erosionadas de la cuenca oriental del ex lago de Texcoco. Primer Simposio Nacional Sobre Uso y Manejo de Tepetates para el Desarrollo Rural. Chapingo, México.
- Pedraza-Cerón, E., F. C. Rodríguez y G. Fierros. 1987. Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetates de la zona de Tequexquahuac a Coatepec, Estado de México. pp.128-140. *In: Ruiz Figueroa, J. F. (ed). Uso y manejo de tepetates para el desarrollo rural.* Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Pensado-Fernández, J. A., L. R. Sánchez-Velásquez, M. R. Pineda-López y F. Díaz-Fleischer. 2014. Plantaciones forestales vs. regeneración natural *in situ*: El caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences* 92: 617-622.

- Peña, D. y C. Zebrowski. 1991. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Primer Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Peña, D. y C. Zebrowski. 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra* 10: 151-155.
- Peña, D., M. E. Miranda M., C. Zebrowski y H. M. Arias R. 1992. Resistencia de tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada. *Terra* 10:164-170.
- Petre A. A., J. L. Panigatti y J. A. Ferrer. 2012. Diccionario de términos edafológicos y otras voces asociadas. AACCS – UNER. Buenos Aires, Argentina.
- Pimentel-Bribiesca, L.1992. Como hacer productivos a los tepetates en México. *Terra* 10: 293-301.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, O. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura. *Terra* 11:1-68.
- Rodríguez-Tapia, S., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. Hidalgo-Moreno y C. A. Ortiz-Solorio.1999. Intemperismo en tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles. *Terra* 17: 97-108.
- Rovere, A. E. 2010. Conceptos de restauración y rehabilitación. pp. 21-23. *In*: R. Pérez, D., E. Rovere, A. y M. Farinaccio, F. (eds.). Rehabilitación en el desierto. Ensayos con plantas nativas en Aguada Pichana, Neuquén, Argentina. Vázquez Mazzini. Buenos Aires, Argentina.

- Rucks, L., F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la Republica. Monte Video, Uruguay.
- SARH. 1990. Proyecto lago de Texcoco. Evaluación del programa de reforestación del proyecto Lago de Texcoco. Instituto de estudios, investigaciones y servicios AGRIFEFOR. Chapingo. México.
- Socarrás, A. A. y M. E. Rodríguez. 2007. Evaluación de la mesofauna del suelo en áreas rehabilitadas con casuarina y marañón de la zona minera de Moa. Centro Agrícola 34: 69-74.
- Socarrás, A. A. 2013. Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. Pastos y forrajes 36: 5-13.
- Socarrás, A. A. y I. Izquierdo. 2014. Evaluación de sistemas agroecológicos mediante indicadores biológicos de la calidad del suelo: mesofauna edáfica. Pastos y forrajes 37: 47-54.
- SER International. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Schlatter, J. E. 1993. Fertilidad del suelo, conceptos y su aplicación en la actividad forestal. Charlas y conferencias. Facultad de ciencias forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Natural resources conservation service. U.S. Department of agriculture. Washington, D. C.

- Thiers O., J. Reyes, V. Gerding y J. E. Schlatter. 2014. Suelos en ecosistemas forestales. pp. 133-178. *In*: Donoso C, M. E. González y A. Lara. (eds.). Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile. UACH. Valdivia, Chile.
- Thompson, M. L. y F. R. Troeh. 2002. Los suelos y su fertilidad. Reverté. 4ta ed. Barcelona, España.
- Valentin, C. 2018. The state and future of soils. pp. 1-20. *In*: Valentin, C. (ed.). Soils as a key component of the critical zone 5. Degradation and rehabilitation. Hoboken: John Wiley & Sons. London, England.
- Van-Reeuwijk, L. P. 2003. Procedimientos para análisis de suelos. Traducción al español por Gutiérrez Castorena, M. C., C. A. Tavares Espinoza y C. A. Ortiz Solorio. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.
- Vargas-Ríos, O. 2011. Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. Acta Biológica Colombiana 16: 221-246.
- Ventura-Ríos, A., F. O. Plascencia-Escalante, P. Hernández-De la Rosa, G. Ángeles-Pérez y A. Aldrete. 2017. ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino? Una experiencia en el centro de México. Bosque 38: 55-66.
- Zalba, P. y N. Peinemann. 1987. Efecto de algunas especies forestales sobre ciertas propiedades físicoquímicas del suelo. Ciencia del Suelo 5: 71-76.

CAPITULO II. EFECTO DE LAS REFORESTACIONES SOBRE LA MESOFAUNA EDÁFICA EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

2.1. RESUMEN

La mesofauna edáfica está fuertemente influenciada en su abundancia y diversidad por el componente arbóreo de un ecosistema forestal. Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de la vegetación en la diversidad de la fauna edáfica. Sin embargo, aún falta analizar el impacto que tienen las actividades de reforestación en suelos altamente degradados, con tepetates, sobre la mesofauna edáfica. En este estudio se evaluó la abundancia y diversidad de la mesofauna que habita en la hojarasca de cuatro áreas reforestadas en la Cuenca del río Chapingo. Las reforestaciones con *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, y un sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa* fueron estudiadas. Se observaron diferencias en abundancia, riqueza y dominancia de órdenes y subórdenes de ácaros y colémbolos entre las diferentes reforestaciones. Los ácaros oribátidos fueron los más abundantes en todas las reforestaciones, excepto que en *P. radiata* también abundaron los Prostigmata. La mayor riqueza de órdenes y subórdenes se observó en el sitio de referencia, *P. montezumae* y *E. globulus*. Los ácaros oribátidos también fueron dominantes en todos los sitios estudiados y los colémbolos dominantes fueron los Entomobryomorpha en el sitio de referencia y los Poduromorpha en *P. montezumae*. El sitio de referencia presentó una abundancia y diversidad de mesofauna muy diferente a la de las reforestaciones. Las diferencias entre las especies arbóreas confirieron diferentes características a la hojarasca del mantillo forestal las cuales se relacionan con la abundancia, riqueza de órdenes y subórdenes y dominancia relativa de colémbolos y ácaros, lo que resalta la importancia de la especie forestal utilizada en las reforestaciones sobre la diversidad de la mesofauna edáfica.

Palabras clave: mesofauna edáfica, rehabilitación, dominancia, ácaros, colémbolos.

2.2. ABSTRACT

The edaphic mesofauna is strongly influenced on its abundance and diversity by the arboreal component of a forest ecosystem. Various studies have been carried out on the effect of vegetation on the diversity of the edaphic fauna. However, the impact of reforestation activities in highly degraded soils, with tepetates, on the edaphic mesofauna has yet to be analyzed. In this study, the abundance and diversity of the mesofauna that inhabit the litter of four reforested areas in the Chapingo River Basin were evaluated. The reforestations with *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata*, and a reference site with native vegetation of *Quercus rugosa* were studied. Differences were observed in abundance, richness and dominance of orders and suborders of mites and collembolans among the different reforestations. The oribatid mites were the most abundant in all the reforestations, except that in *P. radiata* the Prostigmata were also abundant. The highest richness of orders and suborders was observed in the reference site, *P. montezumae* and *E. globulus*. Oribatid mites were also dominant in all the sites studied and the dominant collembolans were Entomobryomorpha in the reference site and Poduromorpha in *P. montezumae*. The reference site presented an abundance and diversity of mesofauna very different from that of the reforestations. The differences among the tree species conferred different characteristics in the leaf litter of the forest floor, which are related to the abundance, richness of orders and suborders and relative dominance of collembolans and mites, which highlights the importance of the forest species used in reforestations on the diversity of the edaphic mesofauna.

Keywords: Edaphic mesofauna, rehabilitation, dominance, mites, collembolans.

2.3. INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo surge de una serie de procesos que ocasionan el deterioro del suelo y provocan una disminución en su productividad biológica y de su biodiversidad. Existen dos categorías de degradación, la primera se da por el desplazamiento del material resultado de procesos de erosión hídrica o eólica y la otra se refiere al deterioro interno de sus características físicas químicas y biológicas (CONAFOR, 2015). Existen diversas técnicas de restauración o rehabilitación de suelos degradados, las cuales deben considerar los procesos de degradación, para proponer alternativas eficientes en el manejo de los suelos y que estas estén de acuerdo con el nivel de degradación en que los suelos se encuentren (SER, 2004).

En sitios altamente degradados la estrategia aplicada es la rehabilitación, cuyo objetivo es revertir la tendencia, pero no tiene la finalidad de devolver al suelo a su estado inicial, de tal modo que se puedan evitar o atenuar los efectos adversos de la degradación del suelo (Valentin, 2018). Por tanto, la vegetación es el componente que más rápidamente evidencia los impactos y las acciones de recuperación del suelo en áreas altamente degradadas.

Una de las técnicas de rehabilitación es la reforestación, las plantaciones forestales son una opción viable para la forestación de áreas con suelos altamente degradados, con presencia de capas endurecidas de tepetate (Ortiz *et al.*, 2018), debido a que son la principal fuente de materia orgánica del suelo, a través de la hojarasca, la cual se deposita en la superficie del suelo formando el mantillo forestal y este se descompone e incorpora al suelo en formación, mediante la actividad biológica.

En la cuenca del Rio Chapingo, se realizaron actividades de rehabilitación de áreas altamente degradadas por medio del Plan Lago de Texcoco en 1973, debido a que afloraban distintos tipos de tepetate, por la pérdida de la capa superficial del suelo (Quantin *et al.*, 1993) debida principalmente a la erosión extrema resultado de la eliminación de la cubierta vegetal (Etchevers *et al.*, 2006).

Las actividades de rehabilitación se realizaron con reforestaciones con diferentes especies forestales, no nativas, con características de rápido crecimiento y fácil adaptabilidad que restablecieran la cubierta vegetal de manera rápida y eficiente y a la vez que retuvieran el suelo (Valentín, 2018), así como, la construcción de obras de conservación de suelo y agua como terrazas, subsoleo, zanjas trinchera y cepas (Adame, 1991), además, se construyeron presas de mampostería y gaviones (Cruickshank, 2003). Se tienen registros que de 1973 a 1976 se plantaron diferentes especies forestales exóticas como *Cupressus lindleyi*, *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus spp.*, *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus oaxacana* y *Pinus michoacana*, entre otras especies (Cruickshank, 1998 y 2003). De acuerdo con Ávila *et al.* (2011), se estimó que las edades de las plantaciones eran de entre 25 a 33 años, por medio del conteo de sus anillos de crecimiento.

En el área rehabilitada que comprende la cuenca del río Chapingo existen pocos estudios que evalúen el impacto de las actividades de rehabilitación y la influencia de las especies forestales sobre la diversidad de la fauna del suelo que habita en el mantillo forestal, que fue formado a través de los años. El suelo existente es producto entre otros factores, del establecimiento de la vegetación a través de las reforestaciones y la realización de obras de conservación de suelo, las cuales permitieron modificar las condiciones originales del material parental y acelerar los procesos de formación de suelo, así como los procesos que se llevan a cabo en él.

La mesofauna edáfica es una categoría de la fauna del suelo que representa una gran parte de la diversidad y está compuesta principalmente por ácaros y colémbolos (Coleman *et al.*, 2004); donde cada uno desempeña un papel importante en las funciones del suelo, a través de sus relaciones en la cadena alimenticia (Scheu, 2002). De acuerdo con sus hábitos alimenticios, ácaros y colémbolos se clasifican en detritívoros, herbívoros, fungívoros, omnívoros, coprófagos, depredadores y necrófagos o carroñeros (Krantz, 2009; Baquero y Jordana, 2015). Esta gran diversidad de hábitos alimenticios da lugar a que participen en diversos procesos del suelo, como la descomposición de la materia orgánica llevando a cabo la

fragmentación inicial y trituración de la hojarasca, incrementando el área superficial para la acción de los microorganismos y, por tanto, participando de esta forma en el reciclaje y mineralización de nutrientes (Coleman *et al.*, 2004). Además, transforman los residuos vegetales ingeridos en sustancias húmicas y forman con sus heces fecales “pellets” que contribuyen a la formación de la estructura del suelo (Maaß, *et al.*, 2015).

Otros ácaros, como los Mesostigmata y Prostigmata tienen hábitos principalmente depredadores y al alimentarse de otros ácaros, colémbolos, nematodos, enquitreidos, proturos, pauropodos y synfilas además de ninfas, larvas y huevecillos, regulan sus poblaciones (Anderson, 1975; Krantz, 2009); es decir, mantienen a las poblaciones de estos organismos en un nivel de equilibrio en el suelo. Debido a que los ácaros y colémbolos pasan su vida en el suelo, en la superficie de este, o en el mantillo forestal, suelen ser sensibles a cambios en el ambiente del suelo, modificando la diversidad y abundancia de sus comunidades (Anderson, 1978; Wallwork, 1983).

Los sitios rehabilitados generalmente modifican el ambiente y generan condiciones ambientales en las que se albergan comunidades de ácaros y colémbolos que se adapten a esas condiciones, que en comparación con los bosques nativos estos tienen diferentes comunidades de mesofauna debido a que se originaron en distintos nichos que dan lugar a una diferente diversidad y abundancia de microartrópodos (Serralheiro y Madeira, 1990; Serralheiro y Madeira, 1991; Martínez y Casanueva, 1995; Adolphson y Kinnear, 2008; Allouche *et al.*, 2012; Calugar y Ivan, 2013; Hasegawa *et al.*, 2013).

La reforestación ha sido una práctica muy común que se ha utilizado con la finalidad de recuperar suelos muy degradados y reparar en el menor tiempo posible procesos ecológicos del suelo (Valentin, 2018), en la cual se han utilizado tanto especies nativas como exóticas, estas últimas por su fácil adaptabilidad a diferentes tipos de climas, suelos y por su rápido desarrollo (Vázquez-Yanez y Batis, 1996; Niembro-Rocas 2001). A pesar de que las reforestaciones contribuyen a la recuperación de la

cobertura forestal en sitios con suelos altamente degradados, muy pocos estudios se han enfocado en evaluar la recuperación de los procesos ecológicos, entre ellos recobrar la biodiversidad del suelo. El estado de los suelos recuperados sigue actualmente estando muy poco caracterizado a una escala global, debido a la falta de comprensión de indicadores relevantes, que indiquen el impacto de la reforestación en la recuperación de suelos altamente degradados (Valentin, 2018).

En la cuenca del Rio Chapingo, desde los años 70's se han realizado reforestaciones con diversas especies forestales y obras de conservación de suelos, estas se llevaron a cabo sobre el tepetate en el cual no existía una cobertura vegetal. Si bien, se logró el establecimiento de cobertura vegetal y la formación de mantillo forestal de diferentes profundidades, como resultado de la especie arbórea, en este estudio se evaluó el efecto de diferentes especies arbóreas sobre la mesofauna edáfica que habita en la hojarasca, ya que estos organismos influyen en los procesos del suelo y pueden ser indicadores del impacto de las actividades de rehabilitación en la recuperación de suelos altamente degradados, originados a partir de tepetates.

2.4. OBJETIVOS

2.4.1. Objetivo general

- Comparar el efecto de la reforestación, como una estrategia de rehabilitación, con diferentes especies forestales como son *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* y un área con vegetación arbórea nativa con *Quercus rugosa*, en la abundancia y diversidad de la mesofauna edáfica que habita en la hojarasca.

Bajo la hipótesis que las propiedades de la hojarasca de las diferentes especies arbóreas influyen la abundancia y diversidad de la mesofauna.

2.4.2. Objetivo específico

- Evaluar la abundancia, riqueza y dominancia de ácaros y colémbolos, a nivel de órdenes o subórdenes, de la hojarasca en cuatro áreas reforestadas con diferentes especies arbóreas y un sitio de referencia, para comprender los procesos subyacentes que causan un cambio en la composición de la mesofauna edáfica.

2.5. MATERIALES Y MÉTODOS

2.5.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la Cuenca del río Chapingo, en la ladera oriental de la sierra del Tláloc en Tequesquináhuac, municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 2.1). Se localiza entre las coordenadas 19.4929° N, 98.8855° W y 19.4228° N, 98.7615° W, a una altitud que va de los 2250 a 3580 msnm. Se encuentra en la región fisiográfica del eje Neovolcánico y se caracteriza porque su origen es de material ígneo, con presencia principalmente de andesitas y brechas sedimentarias (Ojeda, 2001).

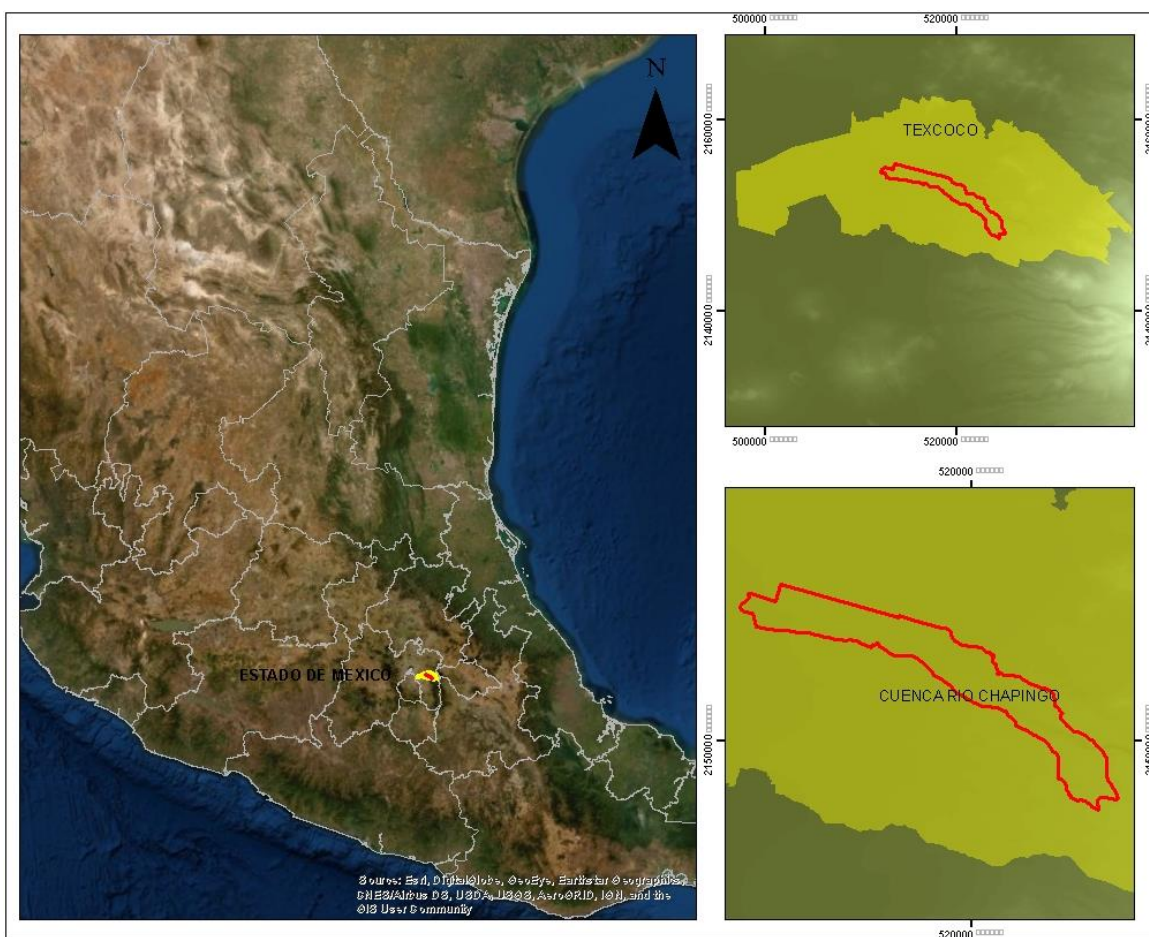


Figura 2.1. Localización de la Cuenca del río Chapingo, en el municipio de Texcoco, Estado de México.

En el área predomina un clima templado subhúmedo con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, este clima se caracteriza por tener una precipitación media anual de 600 a 2000 mm, donde la precipitación en el mes más seco llega a ser de 40 mm y presenta lluvias en verano (INEGI 2000). Los principales grupos de suelos de acuerdo con FAO-UNESCO, utilizada por INEGI 2001 son Feozem háplico y Cambisol éutrico de profundidad muy variable. En el área de estudio se encuentran suelos muy someros que han estado sometidos a procesos erosivos, en donde afloran tepetates, depósitos de cenizas volcánicas endurecidas (Quantin *et al.*, 1993; Vanegas-López, 2009; Ávila-Campuzano *et al.*, 2011); el tipo de tepetate que predomina es el de color blanco (Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio, 1992), sin embargo, hay áreas con tepetate rojo (Peña y Zebrowski, 1992).

Los tipos de vegetación que se encuentran en el área de estudio de acuerdo con INEGI (2017) son vegetación secundaria arbustiva, agricultura de temporal, con cultivos anuales, y áreas con bosques como consecuencia de actividades de reforestación. En las reforestaciones se utilizaron principalmente especies exóticas, de los géneros *Pinus*, *Eucalyptus*, *Cupressus*, *Araucaria*, entre otros. Los bosques naturales están dominados por la especie *Quercus rugosa*.

2.5.2. Áreas seleccionadas

Mediante recorridos de campo se ubicaron las reforestaciones considerando características relevantes como presencia de reforestación, el arreglo utilizado, la homogeneidad del arbolado en cuanto a estatura (edades) y especie. Posteriormente, mediante fotografías aéreas, imágenes satelitales y el programa ArcMap versión 10.3 se delimitaron cinco áreas de estudio (Figura 2.2). Se seleccionaron cuatro áreas reforestadas con plantaciones de aproximadamente 47 años de edad y un sitio de referencia y las áreas seleccionadas se nombraron como:

Área 1. Reforestada con *Cupressus lindleyi*.

Área 2. Reforestada con *Pinus montezumae*.

Área 3. Reforestada con *Eucalyptus globulus*.

Área 4. Reforestada con *Pinus radiata*.

Área 5: Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

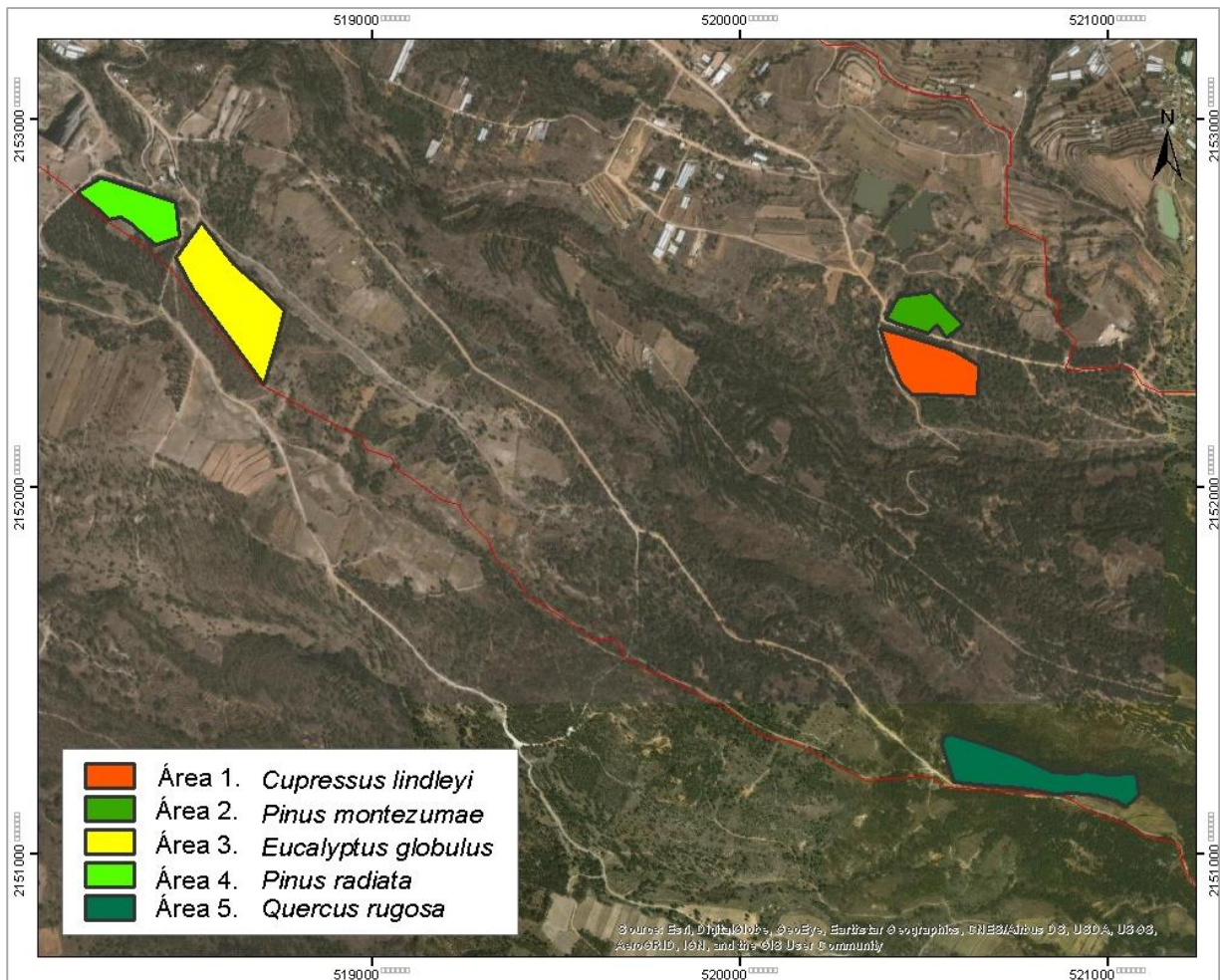


Figura 2.2. Áreas reforestadas y sitio de referencia dentro de la cuenca del río Chapingo.

2.5.3. Sitios de muestreo

Dentro de cada polígono, se ubicaron al azar 8 puntos de muestreo utilizando la herramienta ArcToolbox, en ArcMap versión 10.3, y la función “*Random Points*” para crear puntos aleatorios como se muestra en la Figura 2.3.

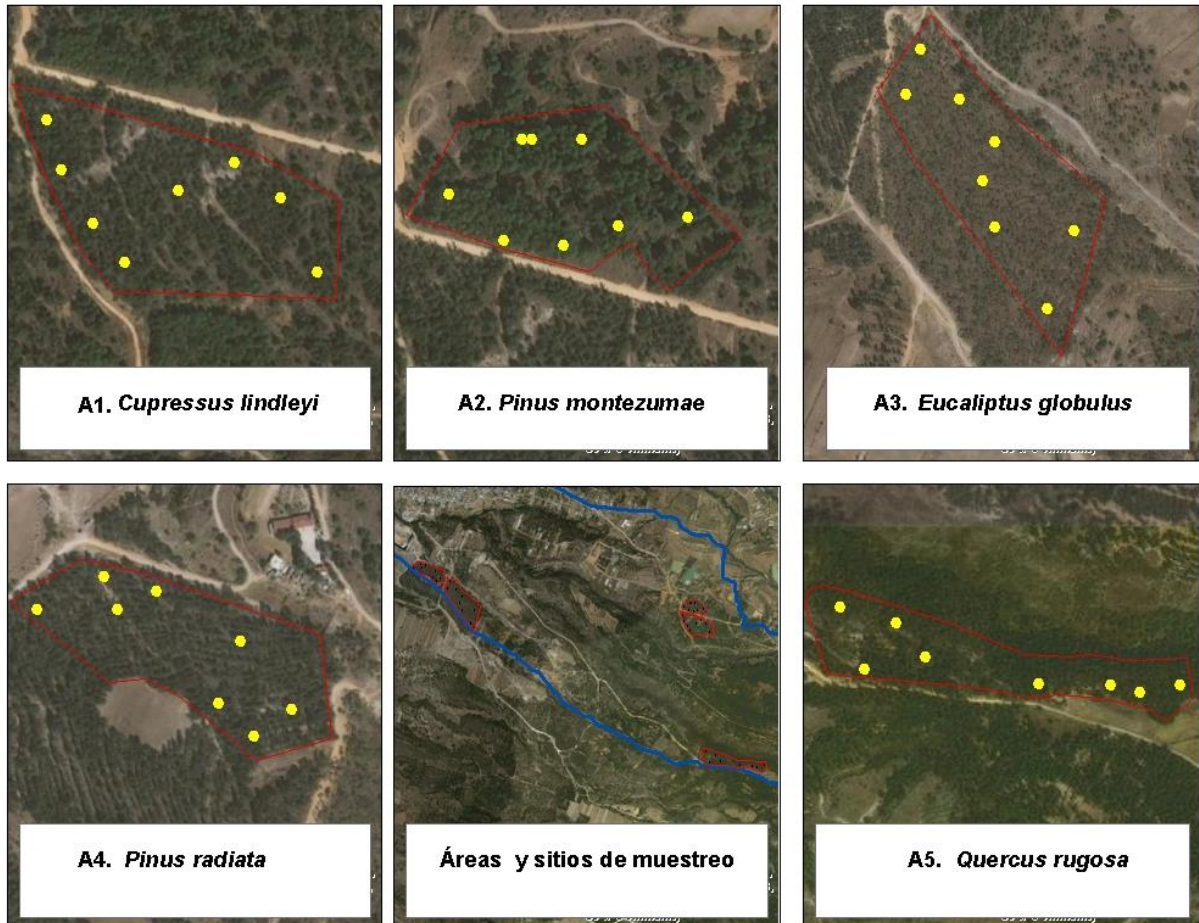


Figura 2.3. Ubicación de los sitios de muestreo en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.

2.5.4. Muestreo de la mesofauna

El muestreo de la hojarasca para el estudio de la mesofauna, ácaros y colémbolos, se llevó a cabo en el mes de noviembre de 2018. El día 23 se colectaron las muestras de las áreas 1 y 2 reforestadas con *C. lindleyi* y *P. montezumae* y el día 24 se muestreo

en las áreas 3 y 4 de *P. radiata*, *E. globulus* y el área 5 del sitio de referencia con vegetación nativa de *Q. rugosa*. En cada sitio de muestreo se tomaron dos muestras adyacentes entre sí, en la primera se obtuvieron muestras inalteradas del mantillo forestal con cilindros de PVC de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura para la extracción de la mesofauna. Una vez obtenida la muestra, los cilindros fueron cerrados con tapas herméticas en la parte superior e inferior del mismo y se mantuvieron en un lugar fresco. Alrededor de cada cavidad se tomaron tres mediciones de la temperatura y de la profundidad de la hojarasca. La segunda muestra se extrajo, adyacente a la primera, con la ayuda de un cuchillo y fueron almacenadas en bolsas ziploc resellables, debidamente etiquetadas, estas muestras se utilizaron para la medición de las variables ambientales de la hojarasca.

2.5.5. Variables ambientales

Se colectaron aproximadamente 200 gr del horizonte orgánico por cada punto de muestreo y estas muestras se secaron al aire para la determinación de la humedad, pH y materia orgánica. El contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico, la mediación de pH se realizó en agua con una relación 4:1, utilizando un medidor de pH digital, y el contenido de materia orgánica se determinó mediante el método de calcinación (Van Reeuwijk, 2003).

Cuadro 2.1. Medias de las variables ambientales del mantillo forestal de las áreas rehabilitadas y el sitio de referencia.

Variables ambientales	A1	A2	A3	A4	A5
Profundidad (cm)	2.4 (0.3)	3.3 (0.5)	1.3 (0.2)	1.8 (0.1)	3.6 (0.3)
Temperatura (°C)	10.2 (0.4)	10.3 (0.3)	12.1 (0.3)	8.9 (0.4)	9.3 (0.2)
Humedad (%)	35.2 (3.5)	52.9 (3.0)	17.6 (1.9)	31.2 (4.0)	41.6 (1.2)
pH	6.4 (0.1)	4.7 (0.1)	6.5 (0.2)	6.3 (0.1)	6.5 (0.2)
MO (%)	52.6 (4.8)	50.0 (3.4)	34.3 (4.8)	45.2 (3.9)	29.3 (2.3)

Nota: los valores son medias de n=8 y el valor entre paréntesis es el error estándar

A1. Reforestada con *Cupressus lindleyi*. A2. Reforestada con *Pinus montezumae*.

A3. Reforestada con *Eucalyptus globulus*. A4. Reforestada con *Pinus radiata*.

A5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

2.5.6. Extracción e identificación taxonómica de mesofauna

La extracción de la mesofauna edáfica, ácaros y colémbolos, se realizó mediante el método de los embudos Berlese-Tullgren (Walter y Proctor, 2013; Moreira *et al.*, 2012) esta metodología se emplea generalmente para aislar los microartrópodos de las muestras de suelo u hojarasca (Edwards, 1991). El sistema de extracción consta de un contenedor con una malla, de 5x5 cm, en el fondo sobre el cual se coloca la muestra y un embudo con un frasco con alcohol al 70%, colocado al final del embudo, y un foco como fuente de luz (Figura 2.4). La extracción de los organismos se realizó inmediatamente después de colectadas las muestras; las que no se procesaron el mismo día, fueron almacenadas y refrigeradas a 5°C (Edwards, 1991), para su posterior extracción.

La extracción de la mesofauna de cada muestra se llevó a cabo durante siete días y posteriormente se separaron e identificaron los ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden, utilizando un microscopio estereoscópico marca Zeiss Stemi 200-C (Figura 2.5). Para su correcta identificación diferentes morfotipos fueron montados en laminillas con líquido de montaje Hoyer (a base de tricloroacetaldehído al 60% de la compañía Hempstead Halide) y se secaron en una estufa a 45 °C. Las laminillas fueron observadas en un microscopio óptico marca Leica, modelo DM1000 y los colémbolos se identificaron utilizando las claves de Christiansen y Bellinger (1998), Bellinger *et al.* (1996-2019) y Baquero y Jordana (2015) y ácaros de acuerdo con el Manual de Acarología (Krantz y Walter, 2009); una vez realizada la identificación, los especímenes que no fueron montados se almacenaron en alcohol al 70%.

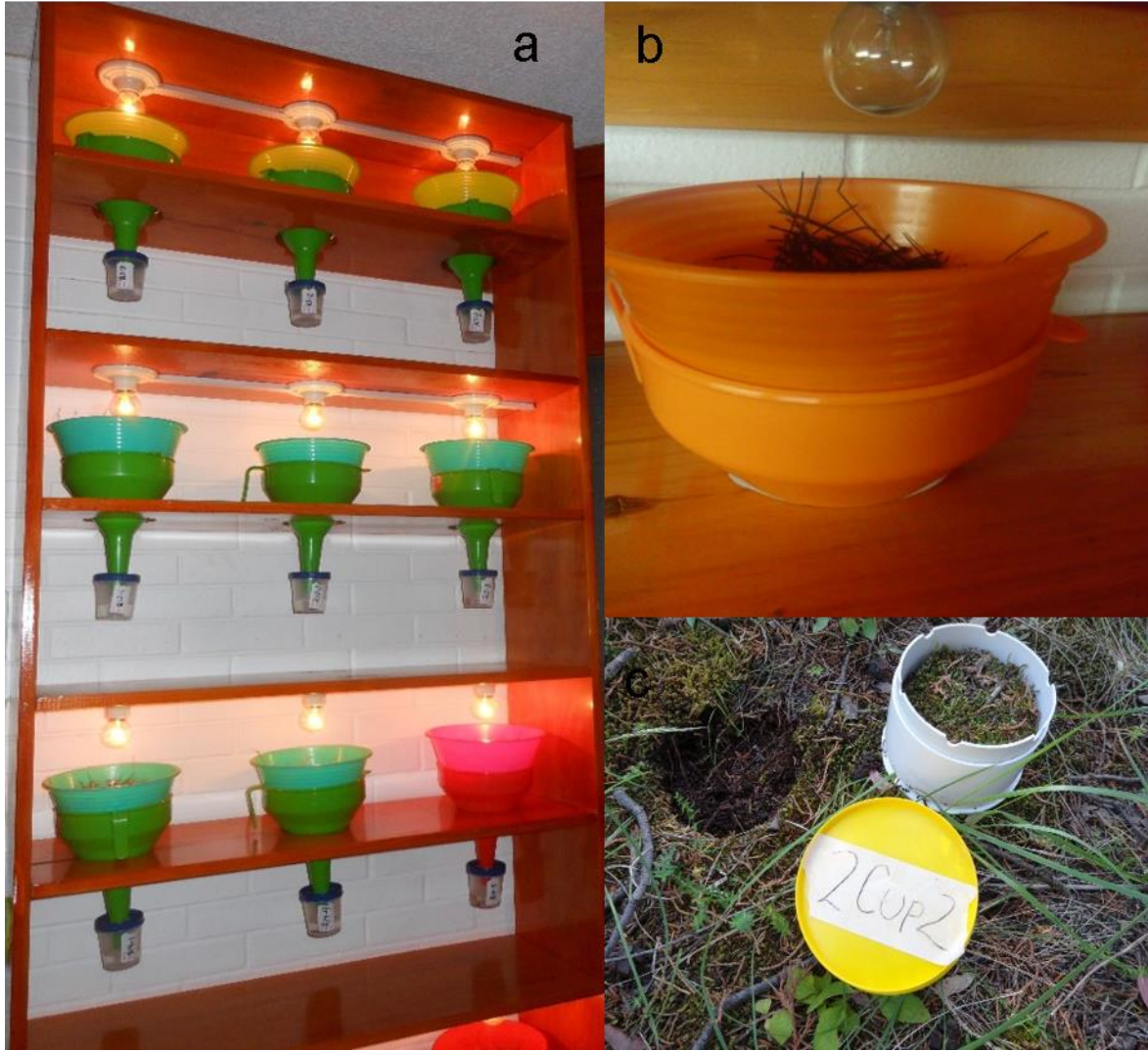


Figura 2.4. Proceso de extracción de mesofauna edáfica. a) Vista de los embudos Berlese-Tullgren b) Canastilla con hojarasca. c) Muestra de hojarasca tomada en campo.



Figura 2.5. Diversidad y abundancia de mesofauna observada en el microscopio estereoscópico en una muestra de hojarasca en el área 2 reforestada con *Pinus montezumae*.

2.5.7. Análisis estadístico

Se usaron las abundancias de mesofauna, expresadas como el número de individuos por orden y suborden en cada muestra, para estimar la abundancia total de ácaros y colémbolos que habitaban en la hojarasca de las áreas reforestadas y el sitio de referencia. Debido a que las abundancias de ácaros y colémbolos no presentaron una distribución normal, se analizaron los datos con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con $n=8$ y un nivel de significancia de 95%, bajo la hipótesis nula (H_0): no hay diferencias en la abundancia de ácaros y colémbolos entre las diferentes áreas. Comparaciones *post hoc* se realizaron a los valores de las medias de las abundancias, utilizando la prueba de Tukey. El procesamiento de los datos se realizó con el software de análisis estadístico SAS versión 9.3.

Se utilizaron curvas de rarefacción basadas en el número de individuos para comparar la riqueza a nivel de orden y suborden de la mesofauna que habita en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia. Debido a que la riqueza aumenta con el tamaño de la muestra, las curvas de rarefacción generan valores comparables de riqueza, debido a que se ajusta la estimación a un mismo número de individuos colectados; esto se conoce como esfuerzo de muestreo o niveles comparables de abundancias (Colwell *et al.*, 2004; Buddle *et al.*, 2005). Adicionalmente, se determinó si el muestreo fue suficiente para hacer las comparaciones de riqueza entre la mesofauna, lo cual es indicado cuando las curvas de rarefacción comienzan a estabilizarse (Buddle *et al.*, 2005). La estimación de las curvas de rarefacción se hizo utilizando el paquete "vegan" en el software estadístico R versión 3.6.1 (R Development Core Team, 2019).

Se realizó un análisis del valor de dominancia (VD) propuesto por Pinzón y Spence (2010) para comparar cambios en dominancia de ácaros y colémbolos, debido al efecto asociado a las características de la hojarasca debido a la especie arbórea utilizada en las reforestaciones y la encontrada en el sitio de referencia. El VD se calculó para cada orden o suborden como el producto de la abundancia proporcional relativa (w) y la presencia proporcional (AP), los valores obtenidos se relativizaron por el total de los DV y el resultado es un valor de dominancia relativo (VD'); cuando VD' es cercano al 100% indica que el organismo es más abundante y frecuente en relación con los otros organismos del conjunto. De acuerdo con la gráfica de dominancia (ver graficas de Anexo 1) se definen los umbrales para clasificarlos en orden de importancia como dominante (D), cuadrante superior derecho, subdominante (S), cuadrante inferior derecho, común (C), cuadrante inferior izquierdo-derecha, y poco común (U), cuadrante inferior izquierdo-izquierda.

2.6. RESULTADOS

2.6.1. Abundancia de colémbolos y ácaros en las áreas rehabilitadas y sitio de referencia

Se obtuvieron un total de 3,536 individuos de colémbolos distribuidos en los cuatro órdenes, la mayor abundancia se colectó en *P. montezumae* (A2) con 1,117 individuos (31.6% del total), siendo los más representativos los del orden Poduromorpha (20.1%), seguido del sitio de referencia (A5) con 785 individuos (27.8%) y los más abundantes fueron Entomobryomorpha (22.24%) y Neelipleona (13.8%). En *C. lindleyi* (A1) se obtuvieron 603 (17.1%) individuos siendo los más abundantes Entomobryomorpha (12.4%), en A3 reforestada con *E. globulus* se encontraron 523 especímenes (14.8%) y en A4 con *P. radiata* se encontraron 508 (14.4%), en ambos el orden más dominante fue el de los Entomobryomorpha (14.4% y 18.2%, respectivamente) y no se encontraron morfotipos del orden Neelipleona (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Porcentajes de las abundancias de ácaros y colémbolos colectados en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia en la cuenca del río Chapingo.

Orden o Suborden	A1	A2	A3	A4	A5
Collembola					
Poduromorpha	8.11 (10.0)	20.14 (9.7)	6.89 (16.2)	1.17 (1.2)	5.18 (7.5)
Entomobryomorpha	12.42 (14.2)	6.53 (9.7)	14.39 (12.2)	18.15 (15.7)	22.24 (10.1)
Neelipleona	0.25 (0.6)	0.87 (1.9)	0.04 (0.1)	0.00 (0.0)	13.80 (12.3)
Symphyleona	0.49 (0.5)	0.30 (0.7)	1.34 (2.2)	0.55 (0.5)	2.98 (2.5)
Número de individuos	603	1117	523	508	785
Acari					
Oribatida	45.40 (27.9)	47.52 (29.3)	37.84 (37.4)	28.63 (23.5)	32.43 (13.0)
Prostigmata	25.47 (16.8)	14.14 (46.4)	25.23 (13.7)	36.92 (40.6)	8.33 (3.8)
Mesostigmata	7.30 (5.3)	8.53 (9.4)	12.27 (13.9)	10.99 (7.6)	12.95 (6.5)
Endeostigmata	0.56 (1.2)	1.40 (5.3)	1.60 (1.5)	3.56 (4.1)	0.17 (0.3)
Astigmata	0.00 (0.0)	0.57 (2.0)	0.39 (0.9)	0.04 (0.1)	1.91 (2.4)
Número de individuos	2232	2894	1784	2019	991

Nota: los valores entre paréntesis representan el error estándar

A1. Reforestada con *Cupressus lindleyi*. A2. Reforestada con *Pinus montezumae*.

A3. Reforestada con *Eucalyptus globulus*. A4. Reforestada con *Pinus radiata*.

A5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

La abundancia total de ácaros fue de 9,950 individuos, en *P. montezumae* (A2) se presentó el mayor número de ácaros con 2,894 (29.1%) individuos, seguido del A1 con *C. lindleyi* y del A4 con *P. radiata* con 2,232 (22.4%) y 2,049 (20.6%) individuos, respectivamente. Un valor intermedio de abundancia de ácaros se obtuvo con *E. globulus* con 1784 individuos (17.9%) y el menor número de ácaros fue colectado en el sitio de referencia (*Q. rugosa*) con 991 (9.7%) individuos (Cuadro 2.2). En general, los ácaros del suborden Oribatida fueron los más abundantes seguido por el de los Prostigmata; con excepción del A4 donde el suborden más abundante fue el de los Prostigmata (36.9%) y los de menor abundancia fueron los del orden Mesostigmata, con excepción del sitio de referencia (A5). En el sitio de referencia A5 con *Q. rugosa* la cohorte Astigmata fue la más abundante (1.9%) y el suborden Endeostigmata presentó el menor número de individuos (0.17 %).

El análisis de Kruskal Wallis no mostró diferencias significativas entre las abundancias de colémbolos de las diferentes áreas ($X^2=4.7290$, $df=4$, $p \leq 0.3162$), ver Figura 2.6). Por el contrario, en el caso de las abundancias de ácaros si se presentaron diferencias altamente significativas ($X^2=13.4313$, $df=4$, $p \leq 0.0093$). Entre el sitio de referencia (A5) y las áreas A1 ($x^2=3.3028$, $p \leq 0.0022$), A2 ($x^2= 3.8657$, $p \leq 0.0005$) y A4 ($x^2=2.70229$, $p \leq 0.0105$) existieron diferencias altamente significativas entre la abundancia de ácaros, como se muestra en la Figura 2.7. Sin embargo, entre reforestaciones no se observaron diferencias significativas entre las abundancias de ácaros de la hojarasca. Únicamente las abundancias de ácaros entre el área reforestada con *E. globulus* (A3) y el sitio de referencia con *Q. rugosa* (A5) no presentaron diferencias significativas ($x^2=1.764$, $P < 0.865$).

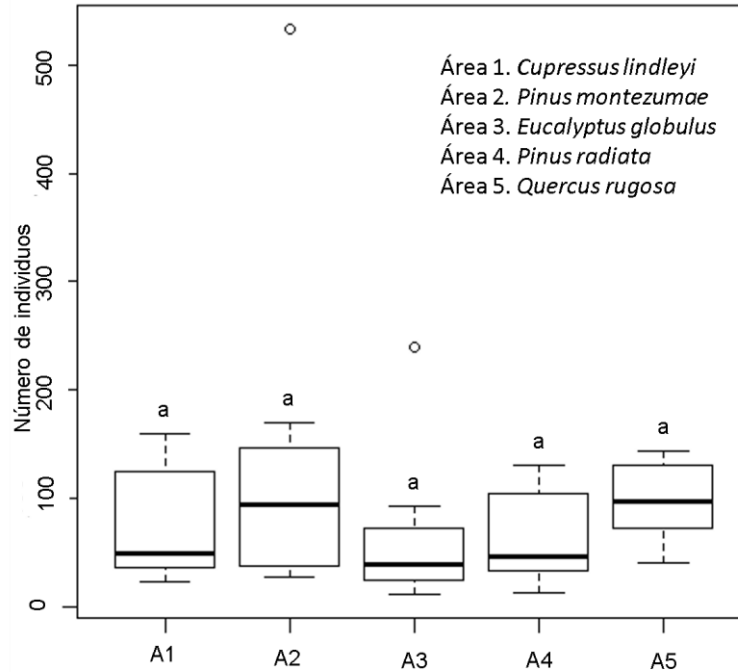


Figura 2.6. Abundancia de colémbolos en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia, con *Q. rugosa*, en la cuenca del río Chapingo. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

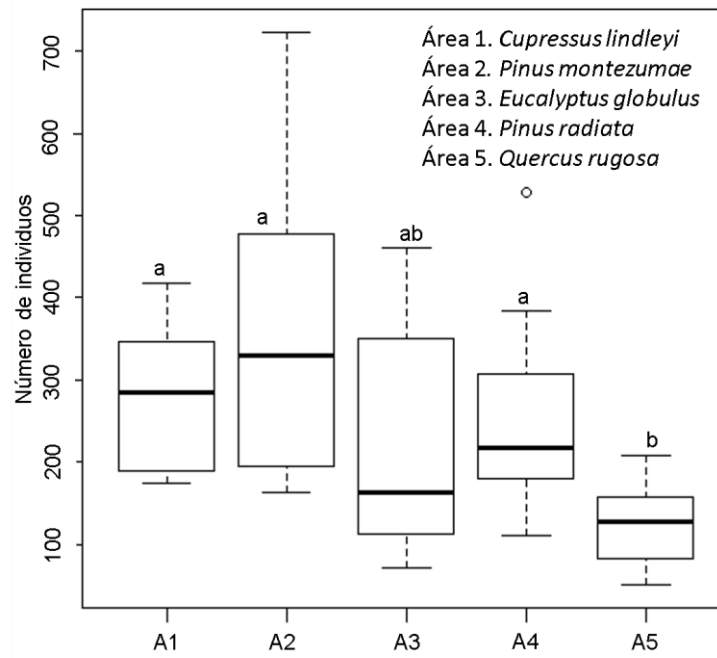


Figura 2.7. Abundancia de ácaros en la hojarasca de las cuatro áreas reforestadas y el sitio de referencia, con *Q. rugosa*, en la cuenca del río Chapingo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

La abundancia de mesofauna entre el sitio de referencia y las áreas reforestadas presentaron diferencias en relación al número de individuos encontrados en los órdenes y subórdenes de ácaros y colémbolos, colectados en el mantillo forestal. A pesar de que el estudio se hizo a un nivel taxonómico muy alto, se pudo observar que en el sitio de referencia con *Q. rugosa* (A5) se observó una abundancia más proporcional entre el número de individuos de cada orden y suborden (Figura 2,8). En las áreas A1 y A3 con vegetación de *C. lindleyi* y *E. globulus*, respectivamente se colectaron morfotipos de ocho órdenes y subórdenes, observándose proporciones muy similares en abundancias de ácaros y colémbolos (Figuras 2.9 y 2.11). En la reforestación con *P. montezumae* (A2) se observó una mayor abundancia de ácaros y colémbolos de un suborden y orden, respectivamente (Figura 2.10), y la reforestación con *P. radiata* (A4) fue en la que se colectó el menor número de órdenes y subórdenes (siete), dominando principalmente los ácaros (Figura 2.12).

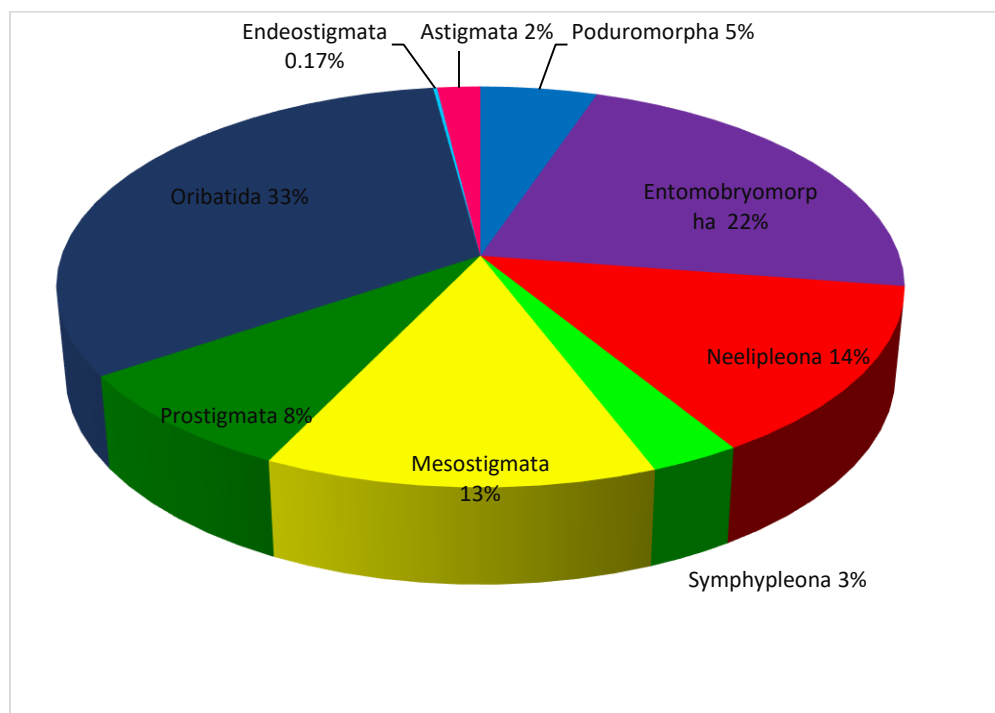


Figura 2.8. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el A5 del sitio de referencia con la vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

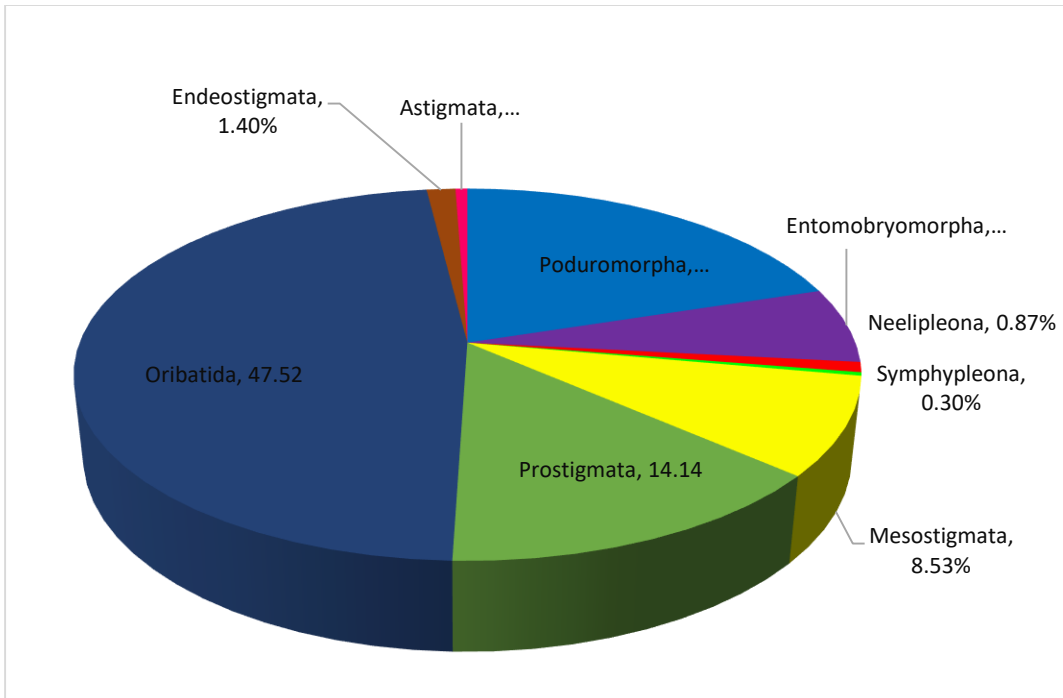


Figura 2.9. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A1 con *Cupressus lindleyi*.

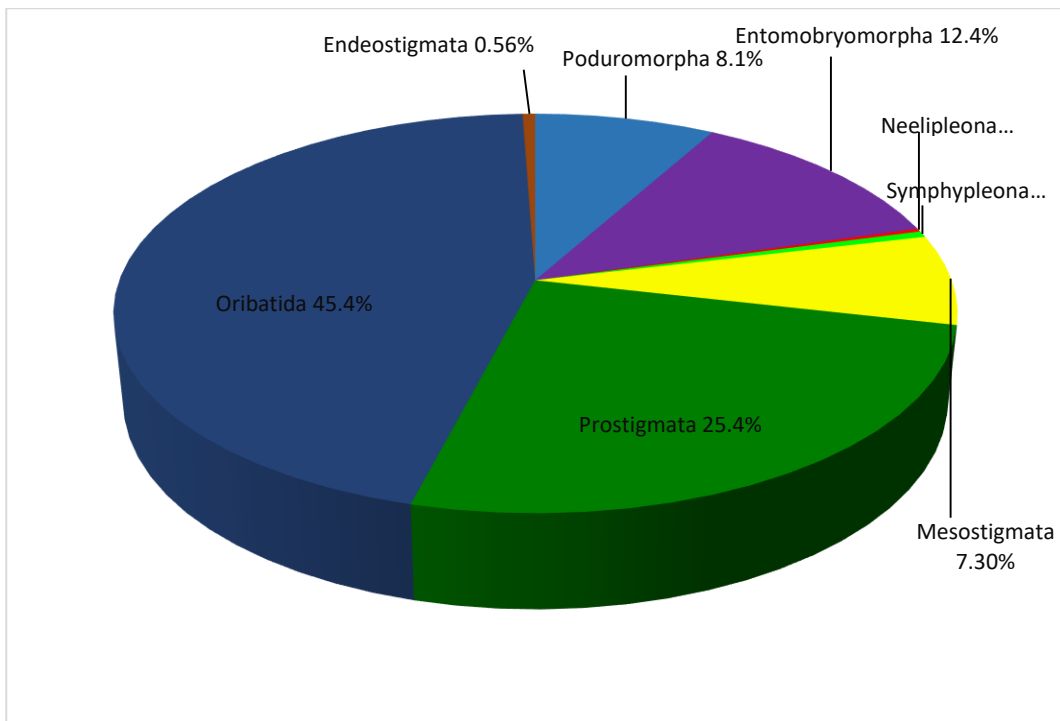


Figura 2.10. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A2 con *Pinus montezumae*.

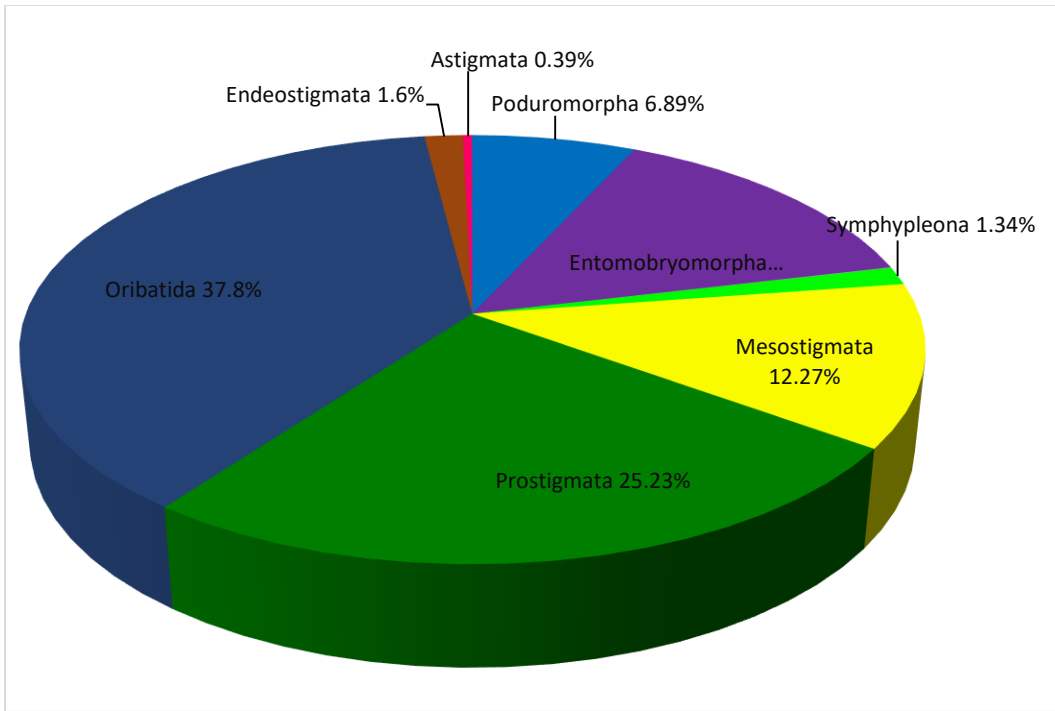


Figura 2.11. Porcentajes de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A3 con *Eucalyptus globulus*.

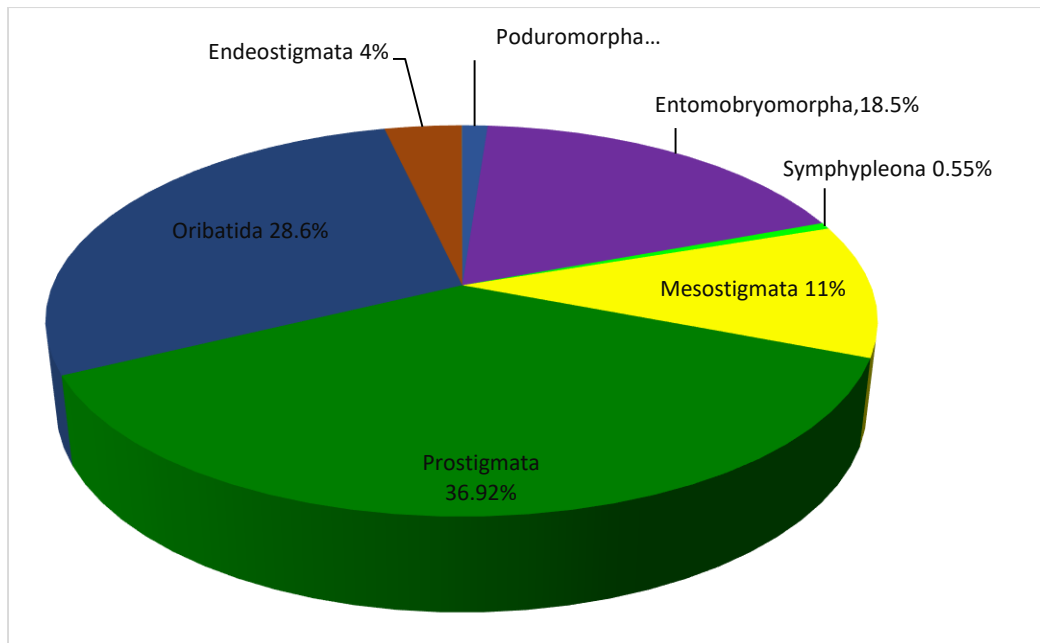


Figura 2.12. Porcentaje de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden en el área reforestada A4 con *Pinus radiata*.

2.6.2. Riqueza de ácaros y colémbolos a nivel de orden y suborden

La comparación de la riqueza de la mesofauna, ácaros y colémbolos, a nivel de órdenes y subórdenes se realizó utilizando curvas de rarefacción basadas en el número de individuos colectados y haciéndose la comparación con un esfuerzo de muestreo comparable de 1,776 individuos, que fue el menor número de colémbolos y ácaros colectados en la hojarasca del sitio de referencia (A5). La mayor riqueza de mesofauna se encontró el sitio de referencia con *Q. rugosa* (A5) y en las áreas con *P. montezumae* (A2) y *E. globulus* (A3), con nueve órdenes y subórdenes. Las áreas reforestadas con *C. lindleyi* (A1) y *P. radiata* (A4) fueron las que presentaron la menor riqueza de órdenes y subórdenes, con siete en total (Figura 2.13).

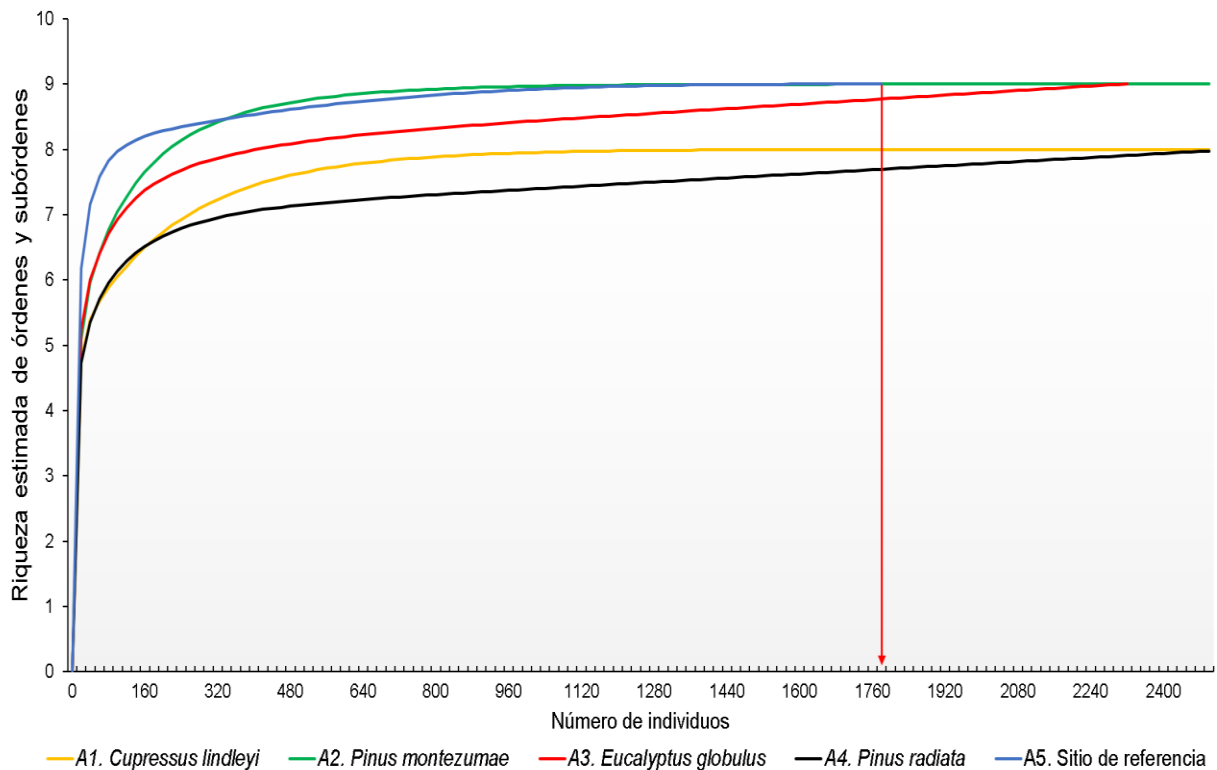


Figura 2.13. Riqueza de órdenes y subórdenes estimada por curvas de rarefacción basadas en el número de individuos de mesofauna, ácaros y colémbolos, colectados en cuatro áreas reforestadas y un sitio de referencia. La estimación se estandarizó a un tamaño de muestra de 1776 individuos indicado por la flecha.

A pesar de que solo se observó una diferencia de dos órdenes o subórdenes, los resultados de la estimación sugieren que existe una relación entre la riqueza y la especie arbórea utilizada en las reforestaciones ya que al no encontrarse especímenes de ácaros o colémbolos de un orden y suborden indica que las características de la hojarasca no son un adecuado hábitat para ellos. Las curvas de rarefacción presentaron una estabilización lo cual indica que el muestreo fue suficiente para realizar la comparación entre la riqueza de la mesofauna de la hojarasca en las diferentes áreas.

2.6.3. Dominancia de órdenes y subórdenes

El análisis de dominancia a nivel de orden y suborden indicó que los ácaros del suborden Oribátida fueron dominantes, presentando los más altos valores de dominancia relativa desde $DV'=28.91$ en *P. radiata* (A4) hasta $DV'=48.33$ en *P. montezumae* (A2), tanto en las áreas rehabilitadas como en el sitio de referencia los ácaros del suborden Prostigmata fueron el otro suborden dominante en A1 con *C. lindleyi* ($DV'=25.62$), en A3 con *E. globulus* ($DV'=26.36$) y en A4 con *P. radiata* ($DV'=37.29$) (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Valores de abundancia relativa (DV') de ácaros y colémbolos en la hojarasca de cuatro áreas rehabilitadas y el sitio de referencia, ordenados de acuerdo con los valores de (DV') del sitio de referencia (A5).

Orden/suborden	A5	A2	A1	A3	A4
Oribatida	34.39 D	48.33 D	45.67 D	39.53 D	28.91 D
Entomobryomorpha	23.58 D	6.64 S	12.49 S	15.04 S	18.33 S
Mesostigmata	13.73 S	8.67 S	7.35 S	11.21 S	11.10 S
Neeliplena	10.97 S	0.67 C	0.06 U	0.01 U	-
Prostigmata	8.84 S	14.38 S	25.62 D	26.36 D	37.29 D
Poduromorpha	4.81 S	25.62 D	8.16 S	5.40 S	0.74 C
Symphyleona	2.37 S	8.16 S	0.43 C	0.88 C	0.48 C
Astigmata	1.27 C	0.15 U	-	0.10 U	-
Endeostigmata	0.04 U	0.53 C	0.21 U	1.47 C	3.15 S

Nota: D= Dominante, S=subdominante, C=común, U=No común. A1. Reforestada con *Cupressus lindleyi*. A2. Reforestada con *Pinus montezumae*. A3. Reforestada con *Eucalyptus globulus*. A4. Reforestada con *Pinus radiata*. A5. Sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

Los ácaros del orden Mesostigmata fueron subdominantes en todas las áreas y los ácaros pertenecientes a los Endeostigmata y Astigmata se caracterizaron por variar entre comunes y no comunes (Cuadro 2.3). Los colémbolos del orden Entomobryomorpha fueron dominantes únicamente en el sitio de referencia ($DV'=23.58$), en comparación con las áreas rehabilitadas donde estos fueron subdominantes. Por el contrario, en A1 con *P. montezumae*, los colémbolos del orden Poduromorpha fueron los dominantes ($DV'=25.62$) y únicamente en el A4 con *P. radiata* fue un orden común ($DV'=0.74$). Los colémbolos de orden Neelipleona fueron únicamente subdominantes en A5 en el sitio de referencia con *Q. rugosa* ($DV'=10.97$) y no comunes en A1 con *C. lindleyi* ($DV'=0.06$) y el A3 con *E. globulus* ($DV'=0.01$) y los colémbolos del orden Symphypleona variaron de subdominantes en A2 con *P. montezumae* ($DV'=8.16$) a comunes como en A1 con *C. lindleyi* ($DV'=0.43$) (Cuadro 2.3).

2.7. DISCUSIÓN

La acumulación del mantillo forestal como resultado de las actividades de reforestación en suelos altamente degradados en la cuenca del río Chapingo, influyo en la abundancia y diversidad de la mesofauna edáfica. Al respecto, Ávila-Campuzano *et al.* (2011) observó en un análisis micromorfológico la presencia de pellets (heces fecales) de fauna del suelo, detectando la presencia de una mayor actividad biológica dependiendo de la especie arbórea; en las plantaciones de cedro (*C. lindleyi*) se observó una mayor presencia de pellets de ácaros oribátidos en comparación con las de eucalipto (*E. globulus*). En este estudio se obtuvieron resultados similares al cuantificar la abundancia de ácaros oribátidos en ambas plantaciones. Los ácaros del orden Oribátida fueron los más abundantes en todas las áreas reforestadas, con excepción del área reforestada con *P. radiata*, en la que también abundaron los ácaros Prostigmata.

Al respecto, Wallwork (1983) indica que los ácaros oribátidos son los microartrópodos numéricamente dominantes en los sistemas forestales debido a la diversidad de microhábitats y recursos en la hojarasca, lo cual demuestra la radiación adaptativa de los oribátidos en el horizonte orgánico (hojarasca) de las reforestaciones de la cuenca del río Chapingo. Aoki (1967) comparó las densidades de ácaros oribátidos entre varios materiales que componen el mantillo forestal y encontró que la abundancia y la composición de especies es muy diferente; apoyando la idea de que las características de los hábitats están estrechamente relacionadas con los recursos alimenticios (Scheu, 2002).

Se observaron diferencias estadísticamente significativas en las abundancias de la subclase Acari, encontradas en las áreas bajo reforestación con *C. lindleyi*, *P. montezumae* y *P. radiata* y el sitio de referencia con vegetación nativa de *Q. rugosa*. Esto es posiblemente el resultado de la acumulación y la tasa de descomposición de la hojarasca las cuales difieren, en gran medida, debido a la calidad del material de la

hojarasca entre las especies arbóreas, sus componentes estructurales y nutricionales generan diferentes clases de humus que pueden soportar diferentes biotas del suelo (Green *et al.*, 1993).

La mayor abundancia de ácaros podría también estar relacionada con las características de la hojarasca y tiempo de descomposición de esta, ya que, de acuerdo con sus características, entre mayor tiempo tome para desintegrarse existirá una mayor cantidad de organismos descomponedores (Barajas y Álvarez, 2003). La hojarasca de pino suele tener un tiempo más largo de descomposición debido a una relación alta de C:N (43.1) respecto a especies de género *Quercus* cuya relación C:N es de 32.5:1. (Rocha y Ramírez, 2009).

Las abundancias más bajas de la mesofauna y no estadísticamente significativas entre las áreas reforestadas y el sitio de referencia en este estudio fueron para los colémbolos. Sin embargo, se encontraron mayores abundancias de Entomobryomorpha en el sitio de referencia con *Q. rugosa* y en las áreas reforestadas con *C. lindleyi*, *E. globulus* y *P. radiata*, en contraste en la reforestación con *P. montezumae* en donde abundaron los Poduromorpha. Al respecto, Potapov *et al.* (2016) indican que las diferencias morfológicas que separan taxones de alto rango de colémbolos tienen un claro significado funcional en relación con su estilo de vida y los requerimientos de hábitat, así mismo, mencionan que el nicho trófico varía entre los diferentes órdenes y familias de colémbolos.

De acuerdo con Winkler y Tóth (2012), hay comunidades típicas de colémbolos que son específicas para diferentes tipos de hábitat y donde algunos morfotipos de una comunidad dada se pueden encontrar solo o predominantemente en ese hábitat; como fue el caso de los Neelipleona en el sitio de referencia, que fueron morfotipos no comunes o no se encontraron en las áreas rehabilitadas. Además, Winkler y Tóth (2012), mencionan que la composición de colémbolos es más diversa en sitios con vegetación natural, lo cual corrobora los resultados encontrados en este estudio.

Se encontraron diferencias en la riqueza estimada de órdenes y subórdenes de ácaros y colémbolos, entre las áreas reforestadas y el sitio de referencia, siendo menor en las reforestaciones con *C. lindleyi* y *P. radiata*, ambos con una capa de hojarasca muy delgada. Por el contrario, la reforestación con *E. globulus* a pesar de presentar una capa muy delgada de hojarasca su riqueza fue alta. A pesar de que se comparó la riqueza a un nivel taxonómico muy alto, la ausencia de algunos órdenes o subórdenes, indican que las características del mantillo forestal influyen en la diversidad y riqueza de mesofauna.

Anderson (1978), indica que la riqueza aumenta con la complejidad y la heterogeneidad del mantillo forestal, lo que puede conducir a una mayor diferenciación de nichos para la mesofauna; como puede ser el caso de las características del mantillo forestal (ej. mayor profundidad y contenido de humedad, ver Cuadro 2.1) en *P. montezumae* y el sitio de referencia con *Q. rugosa*. Por tanto, una mayor acumulación de hojarasca puede contener diferentes biotas del suelo (Green *et al.* 1993). Los resultados de una riqueza menor podrían deberse a que se trata de una condición con suelos menos profundos, lo que puede conducir a una diferenciación de un menor número de nichos debido a que la distribución vertical de microartrópodos puede verse restringida por reducción de la profundidad de hojarasca y del suelo (Anderson 1978). Además, el dosel de cada especie arbórea crea diferentes microhábitats en términos de intensidad de la luz, microclimas y características del suelo que pueden soportar diferente biota (Cavard *et al.*, 2011).

La mesofauna de la hojarasca de las áreas reforestadas en la cuenca del río Chapingo está compuesta principalmente de un suborden de ácaros dominante que son los oribátidos, cuyo grado de dominación no varió según la especie arbórea. Estos resultados pueden deberse principalmente a que los ácaros oribátidos tienen la capacidad de adaptarse a diversos hábitats, desde sitios perturbados, en hábitats con estadios tempranos de sucesión o bien en ecosistemas naturales conservados. Franklin *et al.* (2004) sugiere que los organismos de mesofauna dominantes en un ecosistema tienen hábitos y hábitats muy específicos como musgo, líquenes, corteza

de árboles y hojarasca, etc, que contribuyen a la formación de hábitats idóneos para el establecimiento diferentes órdenes y subórdenes de mesofauna.

Los ácaros Astigmata fueron los menos encontrados, tanto en abundancia como en dominancia, probablemente porque solo se conglomeran en parches ricos en nutrientes en el suelo (Oconnor, 2009). Serralheiro y Madeira, (1991) menciona que los ácaros astigmata son dominantes al inicio de la descomposición de la hojarasca de *Quercus*, pero disminuye con el paso del tiempo, se sugiere que la presencia de estos en las primeras etapas de descomposición de la materia orgánica se debe a que son organismos principalmente fitófagos, además la disminución de estos coincide con el aumento de ácaros oribátidos.

A pesar de no observarse diferencias significativas entre las abundancias de colémbolos, el análisis de dominancia relativa indicó que en la hojarasca de la vegetación nativa con *Q. rugosa* los colémbolos dominantes fueron del orden Entomobryomorpha y este mismo orden fue subdominante en todas las reforestaciones, lo cual muestra que los colémbolos Entomobryomorpha presentan preferencias por el bosque nativo. Por el contrario, en la reforestación con *P. montezumae* el orden que fue dominante fue el de los Poduromorpha. Los factores que influyen en la colonización de los colémbolos son los recursos alimenticios disponibles y la diversidad de microhábitats, así como, los nichos tróficos relacionados con la su identidad taxonómica y formas de vida (Potapov *et al.*, 2016).

Los colémbolos del orden Entomobryomorpha encontrados se caracterizaron por ser taxones que habitan entre el suelo y la hojarasca (euedáficos y hemiedáficos) y en menor cantidad los epiedáficos, que habitan en la superficie de la hojarasca y los colémbolos Poduromorpha fueron euedáficos y hemiedáficos. Al respecto, Potapov *et al.* (2016) indicaron que las adaptaciones de los colémbolos euedáficos y hemiedáficos se expresan por tener una longitud corporal diminuta, falta de pigmentación, ausencia de ocelos o presencia de unos pocos, ausencia de fúrcula o fúrcula pequeña y patas cortas. Los colémbolos que están adaptados a la vida en la

superficie del suelo (especies epiedáficas) son especímenes de tamaño grande a mediano, con una fúrcula grande y frecuentemente pigmentados y con ocho ocelos.

Los resultados mostraron que la especie arbórea utilizada en las reforestaciones de la cuenca del río Chapingo, influye en la abundancia, riqueza y dominancia de colémbolos y ácaros que habitan en la hojarasca. Entre las reforestaciones se observaron diferencias entre abundancias y presencia de diferentes taxones y estas diferencias pueden ser explicadas por las características de la hojarasca de la especie introducida con fines de rehabilitación. Al respecto, Anderson (1975) menciona que los microhábitats en las diferentes capas del mantillo forestal parecen proporcionar condiciones bastante estables para sus habitantes y albergar una gran diversidad de microartrópodos que pueden coexistir en pequeña escala.

2.8. CONCLUSIONES

Los tipos de especie arbóreas utilizadas con fines de reforestación forman distintas estructuras de la mesofauna que habitan la hojarasca. El sitio de referencia, bosque natural, presento una abundancia y diversidad muy diferente a la de las reforestaciones. Las diferencias entre las especies arbóreas confirieron diferentes características a la hojarasca del mantillo forestal las cuales se relacionan con la abundancia, riqueza de órdenes y subórdenes y dominancia relativa de colémbolos y ácaros, lo que resalta la importancia de la especie forestal utilizada en las reforestaciones en la estructuración de la diversidad de la mesofauna edáfica.

2.9. LITERATURA CITADA

- Adolphson, H. and A. Kinnear. 2008. Acari (mite) assemblages under plantations of bluegum, *Eucalyptus globulus*, in southwestern Australia. *Pedobiologia* 51: 427-437. Doi:10.1016/j.pedobi.2008.01.003.
- Allouche, O., M. Kalyuzhny, G. Moreno Rueda, M. Pizarro and R. Kadmon. 2012. Area-heterogeneity tradeoff and the diversity of ecological communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:17495-17500. Doi:10.1073/pnas.1208652109.
- Anderson, J. M. 1975. The enigma of soil animal species diversity. pp. 51-58. *In*: Vanek, J. (ed.). *Progress in Soil Zoology*. Czechoslovak Academy of Sciences. Springer, Dordrecht. Prague, Czech Republic. Doi:10.1007/978-94-010-1933-0_5.
- Anderson, J. M. 1978. Inter-and intra-habitat relationships between woodland Cryptostigmata species diversity and the diversity of soil and litter microhabitats. *Oecologia* 32: 341-348. Doi:10.1007/BF00345112.
- Anderson, J. M. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26: 32-46. Doi:10.1111/j.1442-9993.2001.01070.
- Anderson, J. M. 2005. PERMANOVA: a FORTRAN computer program for permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland. New Zealand.
- Aoki, J. I. 1967. Microhabitats of oribatid mites on a forest floor. *Bulletin of the National Science Museum* 10: 133-138.

- Ávila-Campuzano, G. R., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, E. Angeles-Cervantes y P. Sánchez-Guzmán. 2011. Evaluación de las reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 303-312.
- Barajas-Guzmán, G. and J. Álvarez-Sánchez. 2003. The relationships between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest. *Applied Soil Ecology* 24: 91- 100. Doi:10.1016/S0929-1393(03)00069-6.
- Baquero, E. y R. Jordana. 2015. Clase; Collembola. Órdenes: Poduromorpha, Entomobryomorpha, Neelipleona y Symphypleona. *Revista Ibero Diversidad Entomológica Accesible-SEA* 36:1-11.
- Bellinger, P. F., K. A. Christiansen and F. Janssens. 1996-2020. Checklist of the Collembola of the World. <http://www.collembola.org>. Accessed June 2020.
- Buddle, M. C., J. Beguin, E. Bolduc, A. Mercado, T. Sackett, E., S. Duncan R., H. Varady-Szabo and R. Zeran, M. 2005. The importance and use of taxon sampling curves for comparative biodiversity research with forest arthropod assemblages. *Canadian Entomologist* 137: 120-127.
- Calugar, A. and O. Iván. 2013. Diversity and distribution of the edaphic mites (Acari: Gamasina, Oribatida) in some forest plantations from the central Moldavian plateau. *Scientific works* 56: 97-102.
- Cassagne, N., C. Gers and T. Gauquelin. 2003. Relationships between Collembola, soil chemistry and humus types in forest stands (France). *Biology and Fertility of Soils* 37: 355-361. Doi:10.1007/s00374-003-0610-9.

- Cavard, X., S. E. Macdonald, Y. Bergeron and H.Y.H. Chen. 2011. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests. *Environmental Reviews* 19:142-161. Doi:10.1139/a11-004.
- Choi, W.I., D. L. Moorhead, D. A. Neher, M. I. Ryoo. 2006. A modeling study of soil temperature and moisture effects on population dynamics of *Paronychiurus kimi* (Collembola: Onychiuridae). *Biology and Fertility of Soils* 43: 69-75. Doi:10.1007/s00374-005-0062-5.
- Christiansen, K. A. and P. F. Bellinger. 1998. *The Collembola of North America north of the Rio Grande. A taxonomic analysis.* 2nd ed. Grinnell College. Iowa, USA.
- Coleman, D. C., D. A. Crossley and P. F. Hendrix. 2004. *Fundamentals of soil ecology.* 2nd ed. Academic Press. San Diego, California.
- Colwell, R. K., C. X. Mao and J. Chang. 2004. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology* 85: 2717-2727. Doi:10.1890/03-0557.
- Covarrubias, R. 1993. Comparación de fauna de microartrópodos, entre bosque nativo y plantaciones de *Pinus radiata* de reemplazo, en biotopos equivalentes. *Acta Entomológica Chilena* 18: 40-51.
- Cruickshank, G. G. 1998. Proyecto lago de Texcoco: Rescate hidrológico. Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA). México, D.F.
- Cruickshank, G. G. 2003. La cosecha del agua, Proyecto Lago de Texcoco. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México, D.F.

- Edwards, C. A. 1991. The assessment of populations of soil-inhabiting invertebrates. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 34:145-176. Doi:10.1016/0167-8809(91)90102-4.
- Etchevers-Barra, J. D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. 1745-1748. *In*: R. Lal (ed.). *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker. Nueva York.
- Franklin, E., T. Hayek, E. P. Fagundes and L. L. Silva. 2004. Oribatid mite (Acari: Oribatida) contribution to decomposition dynamic of leaf litter in primary forest, second growth, and polyculture in the Central Amazon. *Brazilian Journal of Biology* 64: 59-72. Doi:10.1590/S1519-69842004000100008.
- Gómez-Anaya, J.A., J. G. Palacios-Vargas y G. Castaño-Meneses. 2010. Abundancia de colémbolos (Hexapoda: Collembola) y parámetros edáficos de una selva baja caducifolia. *Revista Colombiana de Entomología* 36: 96-105.
- Green, R. N., R. L. Trowbridge and K. Klinka. 1993. Towards a taxonomic classification of humus forms. *Forest Science Monographs* 29: 1-49.
- Gutiérrez-Castorena, M. C. y C. A. Ortiz-Solorio. 1992. Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México. *Terra* 10: 202-209.
- Hasegawa, M., K. Okabe, K. Fukuyama, S. Makino, I. Okochi, H. Tanaka, H. Goto and T. Sakata. 2013. Community structures of Mesostigmata, Prostigmata and Oribatida in broad-leaved regeneration forests and conifer plantations of various ages. *Experimental and Applied Acarology* 59: 391-408. Doi:10.1007/s10493-012-9618-x.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2000. Diccionario de datos climáticos, escala 1:250000 y 1:1000000. Recuperado de <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/climas.pdf?s=geo&c=1259&e=10>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2001. Edafología. Conjunto de datos vectoriales escala 1:250 000, Serie I. recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235604>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación. escala 1:250 000, serie VI. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf.

Krantz, G. W. 2009. Habits and habitats. pp. 64-82. *In*: Krantz, G. W. and Walter, D. E. (eds.). A Manual of Acarology, 3rd edition. Texas Tech University Press. Lubbock, Texas.

Krantz, G. W. and D. E. Walter. 2009. A manual of acarology. 3rd edition. Texas Tech University Press. Lubbock, Texas. Doi:10.1653/024.092.0323

León-Gamboa, A. L., C. Ramos y M. R. García. 2010. Efecto de plantaciones de pino en la artropofauna del suelo de un bosque Altoandino. *Revista de Biología Tropical*. 58: 1031-1048.

Maaß, S., T. Caruso, M. C. Rillig. 2015. Functional role of microarthropods in soil aggregation. *Pedobiologia* 58: 59-63.

- Martínez, I. R. y M. E. Casanueva. 1995. Comparación cuali-cuantitativa de la fauna oribatológica de suelo (Acari-Oribatida) de bosques nativos y *Pinus radiata*. Revista Chilena de Entomología 22: 25-34.
- Moreira, F., E. J. Huising y D. Bignell. 2012. Manual de biología de suelos tropicales, muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología. México. D. F.
- Niembro-Rocas, A. 2001. Las diásporas de los árboles y arbustos nativos de México: posibilidades y limitaciones de uso en programas de reforestación y desarrollo agroforestal. Madera y Bosques 7: 3-11. Doi:10.21829/myb.2001.721308.
- Oconnor, B. M. 2009. Cohort Astigmata. pp. 565-657. *In*: Krantz, G. W. and Walter, D. E. (eds.). A Manual of Acarology, 3rd ed. Texas Tech University Press. Lubbock, Texas.
- Ojeda-Trejo, E. 2001. Gis and land use in Texcoco municipality, Mexico. Contrasting local and official understandings. Doctoral thesis. Department of Geology, Durham University. Durham, United Kingdom.
- Ortiz-Torres, C., J. D. Gómez-Díaz, F. A. Domínguez-Álvarez y A. Villanueva-Morales. 2018. Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. Terra 36: 275-285.
- Peña, D. y C. Zebrowski. 1991. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Primer Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Peña, H. D. y C. Zebrowski. 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Terra 10: 151-155.

- Pinzón, J. and J. R. Spence. 2010. Bark-dwelling spider assemblages (Araneae) in the boreal forest: dominance, diversity, composition and life-histories. *Journal Insect Conservation* 14: 439-458. Doi: 10.1007/s10841-010-9273-7.
- Potapov, A. A., E. E. Semenina, A. Y. Korotkevich, N. A. Kuznetsova and A. V. Tiunov. 2016. Connecting taxonomy and ecology: Trophic niches of collembolans as related to taxonomic identity and life forms. *Soil Biology and Biochemistry* 101: 20-31.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, O. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura. *Terra* 11:1-68.
- R Development Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reddy-Vikram, M. and B. Venkataiah. 1990. Effects of tree plantation seasonal community structure of soil microarthropods in a tropical semi-arid savanna. *Tropical Ecology* 31: 96-105.
- Rocha-Loredo, A. G. y N. Ramírez-Marcial. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 84: 1-12.
- Scheu, S. 2002. The soil food web: structure and perspectives. *European Journal of Soil Biology* 38: 11-20.
- SER International. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

- Seniczak, S. and A. Seniczak. 2013. Oribatid mites (Acari, Oribatida) of pine and cypress litter in selected habitats of Sicily (Italy). *Biological Letters* 50: 95-102.
- Seniczak, S. and A. Seniczak. 2010. Oribatid mites (Acari, Oribatida) of various habitats in southern Andalusia (Spain). *Biological Letters* 47: 29-35.
- Serralheiro, F. and M. Madeira. 1990. Changes in arthropod soil fauna due to afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Agrokémia és Talajtan* 39: 602-606.
- Serralheiro, F. and M. Madeira. 1991. Acari colonization of *Quercus suber* and *Eucalyptus globulus* litter. pp. 353-358. *In* F. Dusbabek. and V. Bukva. (eds.). *Modern Acarology*. Academia, Prague and SPB Academic Publishing, The Hague. Ceske Budejovice, Czechoslovakia.
- Sirajul-Haque, S. M., S. Das Gupta and S. Miah. 2014. Deforestation effects on biological and other important soil properties in an upland watershed of Bangladesh. *Journal of Forestry Research* 25: 877-885. Doi:10.1007/s11676-014-0534-2.
- Valentin, C. 2018. The state and future of soils. pp. 1-20. *In*: Valentin, C. (ed.). *Soils as a key component of the critical zone 5. Degradation and rehabilitation*. Hoboken: John Wiley & Sons. London, England.
- Van-Reeuwijk, L. P. 2003. *Procedimientos para análisis de suelos*. Traducción al español por Gutiérrez Castorena, M. C., C. A. Tavares Espinoza y C. A. Ortiz Solorio. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.
- Vázquez-Yanes, C. y A. I. Batis-Muñoz. 1996. La restauración de la vegetación, árboles exóticos vs árboles nativos. *Revista Ciencias* 43:16-23.

Vanegas -López, M. 2009. Diversidad vegetal en obras de control de azolves sobre el Rio Chapingo. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.

Walter, D. E. and H. C. Proctor. 2013. Mites: ecology, evolution and behaviour. Life at a microscale. Springer. Dordrecht, Holanda.

Winkler, D. and V. Tóth. 2012. Effects of afforestation with pines on Collembola diversity in the limestone hills of Szárhalom (West Hungary). *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 8: 9-20.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las actividades de reforestación en suelos con afloramiento de tepetates contribuyeron a la formación de suelo.
- El aporte de materia orgánica, así como las características de la misma, fue diferente de acuerdo a la especie arbórea. La presencia de materia orgánica en áreas bajo rehabilitación favorece los procesos formativos del suelo.
- Las prácticas de conservación de suelo cumplen con la función de ser auxiliares para el establecimiento de la reforestación, además de que favorecen los procesos formativos del suelo.
- El movimiento y roturación de la capa endurecida permite modificar las características del material parental.
- La abundancia, riqueza y dominancia de la mesofauna, colémbolos y ácaros, está relacionada por las características de la hojarasca de la especie arbórea
- La subclase Acari fue el grupo dominante de mesofauna de la hojarasca y su abundancia y diversidad excedió a la de la clase Collembola tanto en las áreas reforestadas como en el sitio de referencia.
- La mayor diversidad de colémbolos y ácaros se observó en el sitio de referencia con *Q. rugosa* y las áreas reforestadas con *P. montezumae* y *E. globulus*, lo que sugiere que las características de la hojarasca determinan el establecimiento de la mesofauna.
- Los bosques nativos forman nichos ecológicos distintos en comparación con las reforestaciones con especies exóticas, albergan diferentes taxones de mesofauna edáfica.

RECOMENDACIONES

En el Plan Lago de Texcoco (PLT) el objetivo fue reducir la velocidad de escurrimiento y la erosión del suelo a través de obras de conservación y reforestación, lo cual redujo el escurrimiento superficial, incrementó la cobertura vegetal y formó suelo a partir del tepetate.

En un programa de rehabilitación de tepetates se debe tener claro, desde su planeación, cuál es el objetivo de la rehabilitación: reducir escurrimientos, rehabilitar el ecosistema o la formación del suelo. En el trabajo de campo se observó que en el PLT el objetivo fue reducir los escurrimientos con obras de conservación y reforestación. En futuros programas de rehabilitación de tepetates es deseable identificar los tipos de tepetate, esto permitirá seleccionar obras de conservación y especies de reforestación que promoverán la formación de suelo o la rehabilitación del ecosistema.

En esta investigación se observó que la reforestación con obras de conservación promueve la formación de suelo y un mantillo más grueso y mejora la recuperación del ecosistema en tepetate rojo o blanco reforestado con pino. Sin embargo, en tepetate blanco con eucalipto hay mayor formación de suelo, pero poca recuperación del ecosistema.

Por lo anterior, si se quiere recuperar el ecosistema y formar suelo en tepetates blandos (rojo o blanco) con pináceas se recomienda roturar el suelo con obras de conservación. En las áreas con tepetate duro se deberán realizar obras de conservación para reducir el escurrimiento, pero sin reforestar.

ANEXOS

Cuadro A 1. Propiedades químicas de los suelos en las cinco áreas estudiadas.

Área	pH	MO %	N %	CIC (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	PBI %	CaCO ₃ %
Área 1. <i>C. lindleyi</i> zanjas trinchera tepetate rojo	5.7	6.4	0.1	15.7	4.1	11.1	9.4	2.2	15.9	0.9
	6.3	32.5	0.5	50.9	7.4	23.9	3.6	6.4	2.8	1.3
	6.3	10.0	0.1	15.0	5.3	17.3	1.9	2.1	17.3	1.2
	6.3	8.5	0.0	26.3	5.1	16.5	1.0	2.2	5.8	1.2
	6.4	16.7	0.0	24.0	7.6	21.7	1.3	4.3	9.7	1.3
	6.6	13.6	0.1	25.2	5.9	20.3	1.9	5.7	8.6	1.2
	6.5	16.7	0.3	21.7	7.4	22.7	0.5	5.4	12.0	0.7
	6.4	8.3	0.0	33.6	7.0	18.3	1.0	2.1	4.2	1.2
	6.2	12.2	0.1	20.2	9.2	20.2	2.0	6.0	14.3	0.9
	5.6	7.9	0.1	10.9	3.7	6.9	1.1	2.0	15.3	0.5
Área 2. <i>P. montezumae</i> zanjas trinchera tepetate rojo	6.0	6.9	0.0	17.7	4.7	14.4	1.4	2.1	11.0	0.0
	5.8	10.0	0.1	21.3	7.4	14.4	2.3	4.3	9.8	0.5
	5.6	8.3	0.0	26.5	5.3	10.8	0.6	2.2	4.4	0.0
	5.5	16.4	0.1	35.7	5.1	15.7	0.3	4.4	3.4	0.4
	5.9	11.2	0.1	24.0	5.9	18.9	0.3	4.2	8.1	1.2
	5.4	21.5	0.0	34.2	6.1	21.3	1.0	2.1	4.4	1.2
Área 3. <i>E. globulus</i> terrazas tepetate blanco	5.9	11.1	0.0	24.0	3.3	19.5	0.9	2.1	7.1	1.1
	4.8	16.7	0.2	29.2	4.5	16.0	3.4	2.1	5.0	1.0
	5.7	6.4	0.1	9.4	3.5	9.6	1.2	2.0	23.5	1.4
	6.1	16.9	0.2	27.5	4.7	18.6	1.1	2.1	5.8	1.0
	5.4	8.5	0.1	28.8	4.8	21.9	1.2	4.0	6.3	1.2

Área	pH	MO %	N %	CIC (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	PBI %	CaCO ₃ %
	5.8	6.5	0.0	16.5	3.6	21.8	1.0	4.1	16.7	1.2
	7.2	12.2	0.1	26.5	5.0	22.9	1.3	2.1	7.2	1.7
	6.8	10.4	0.1	33.6	4.4	20.4	1.1	6.4	4.8	0.0
	6.6	8.0	0.0	27.3	4.6	22.4	1.2	4.1	7.1	0.3
	6.9	9.8	0.1	34.8	4.6	22.4	0.5	4.2	4.4	1.3
	7.0	13.2	0.0	28.0	4.8	22.6	0.6	6.3	7.2	1.4
Área 4. <i>P. radiata</i> terrazas tepetate blanco	6.7	11.8	0.1	31.7	2.7	22.2	0.5	4.0	4.9	0.6
	6.9	19.3	0.3	30.1	4.4	22.3	0.6	4.2	5.7	0.6
	7.0	7.1	0.0	16.3	4.0	22.4	0.8	6.3	18.6	0.5
	6.6	21.8	0.4	38.6	4.8	22.3	0.6	6.2	3.9	0.5
	7.1	7.0	0.0	30.7	3.8	22.3	0.9	4.3	5.5	0.7
	4.9	7.6	0.1	12.1	3.8	5.4	0.4	2.1	11.0	0.5
	6.7	14.9	0.1	28.0	3.6	22.3	1.0	2.0	6.0	0.7
	5.3	11.4	0.4	16.3	3.6	11.7	0.5	2.1	9.9	0.5
Área 5. Sitio de referencia <i>Q. rugosa</i>	6.1	12.0	0.2	23.6	4.2	22.2	1.2	4.0	9.0	0.5
	5.2	16.8	0.3	30.5	4.4	15.4	0.9	4.2	4.4	0.0
	6.2	13.3	0.4	15.6	4.2	21.2	1.2	4.1	18.6	0.5
	6.7	15.4	0.4	22.3	4.4	22.1	0.3	4.2	9.9	0.5
	5.9	11.4	0.1	19.0	3.8	15.0	0.9	2.1	9.2	0.5

ANEXO 2. GRÁFICAS DE DOMINANCIA

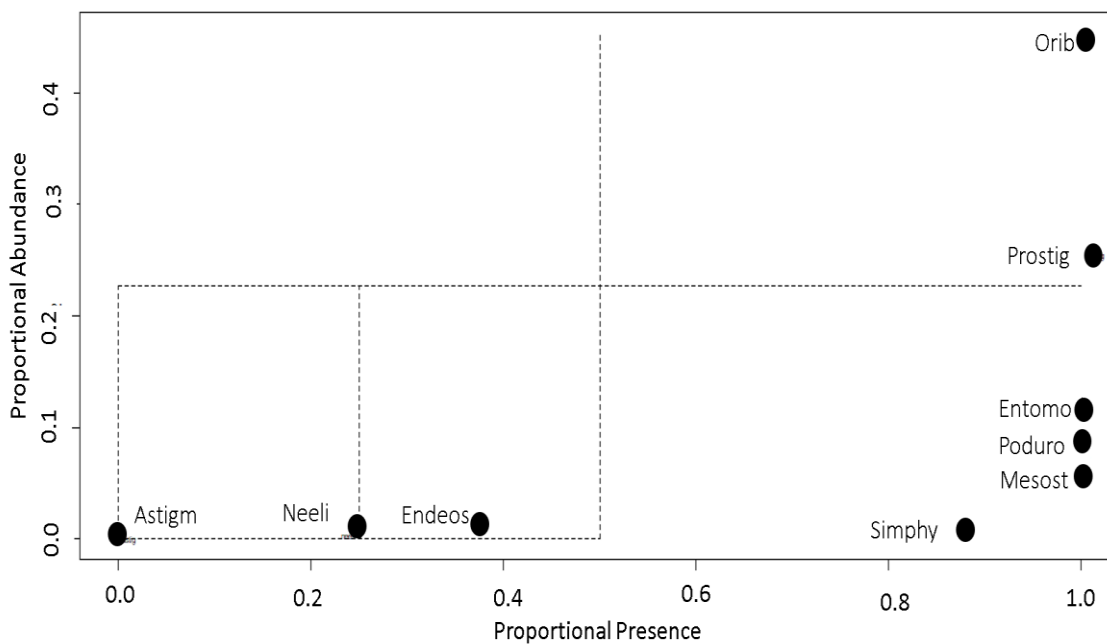


Figura 1A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A1 con *Cupressus lindleyi*.

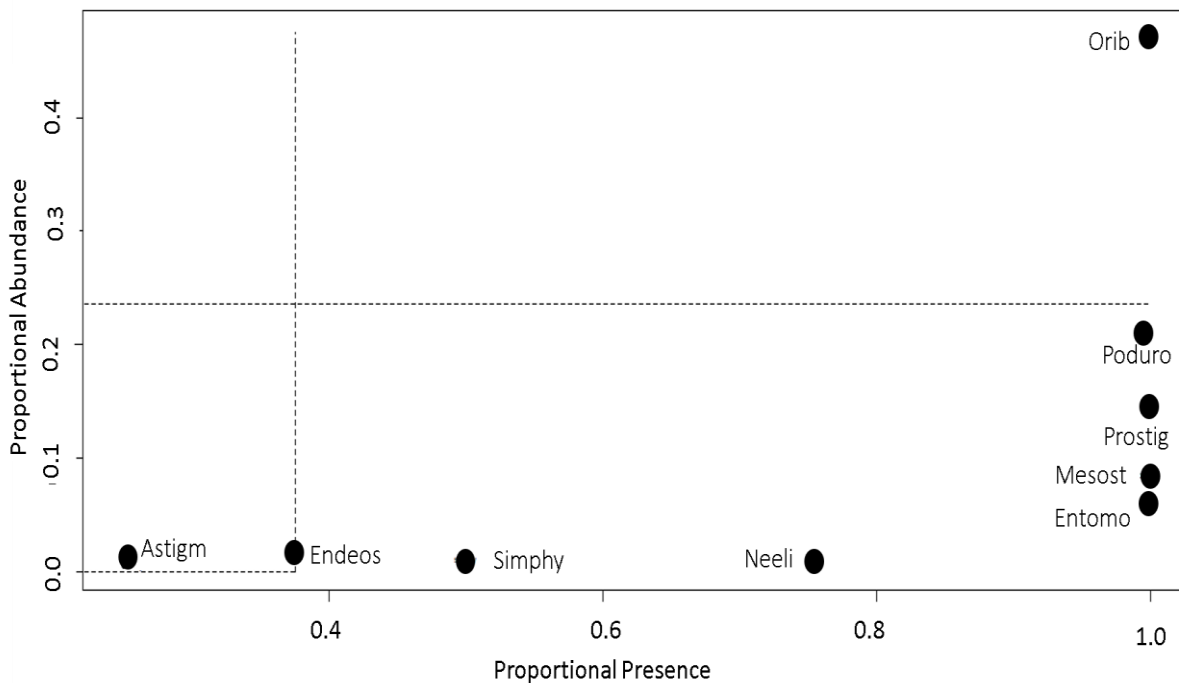


Figura 2A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A2 con *Pinus montezumae*.

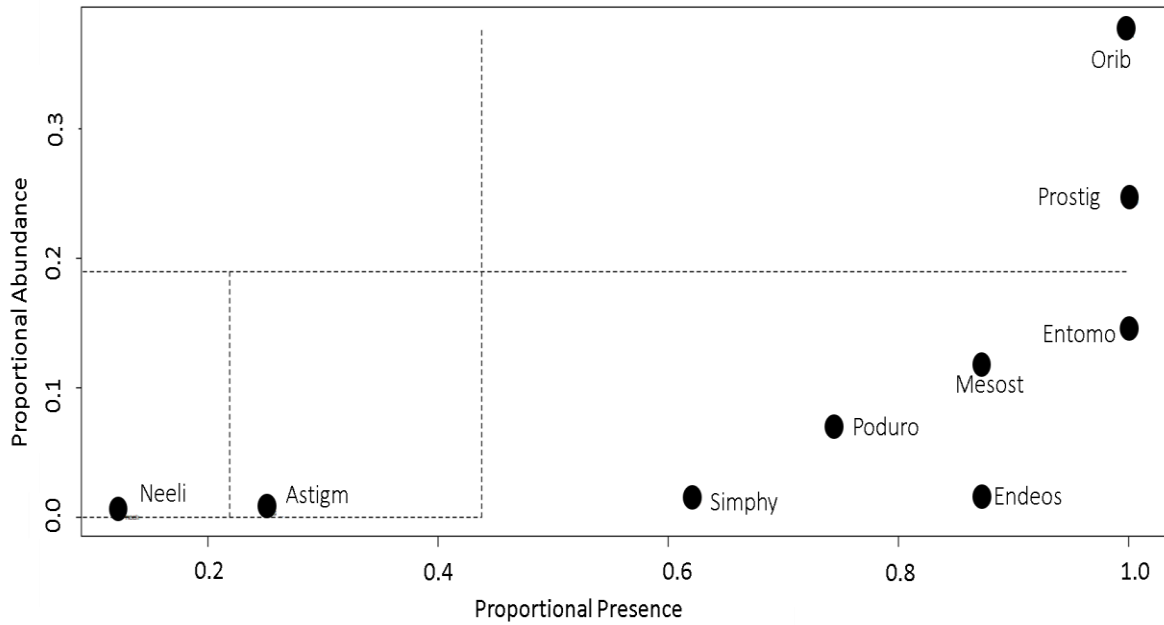


Figura 3A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A3 con *Eucalyptus globulus*.

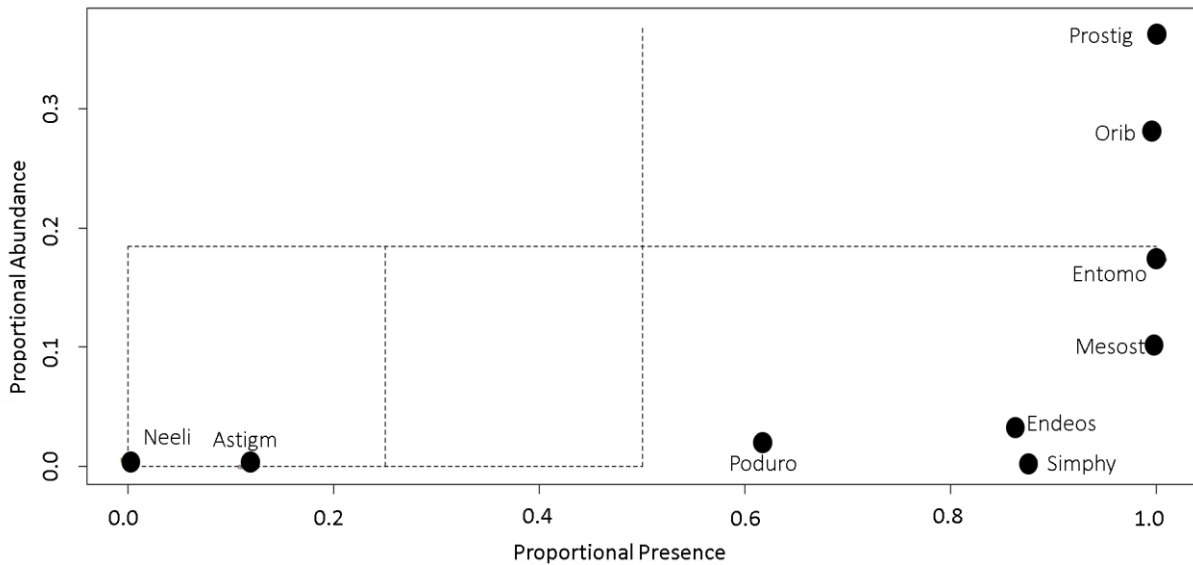


Figura 4A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A4 con *Pinus radiata*.

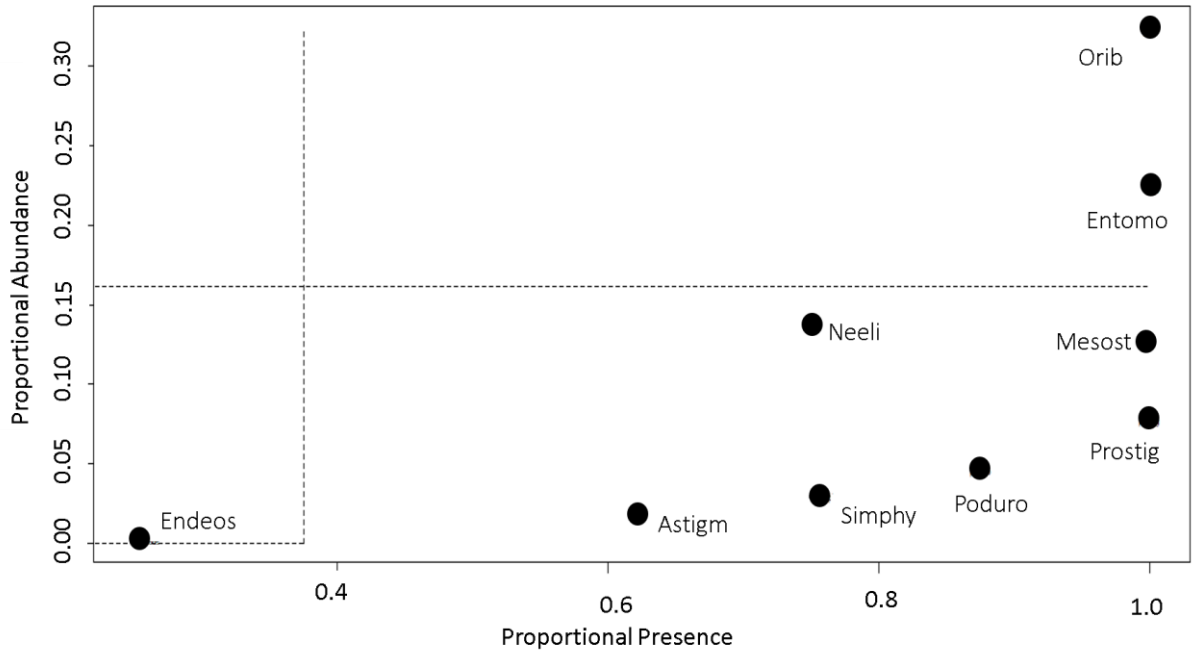
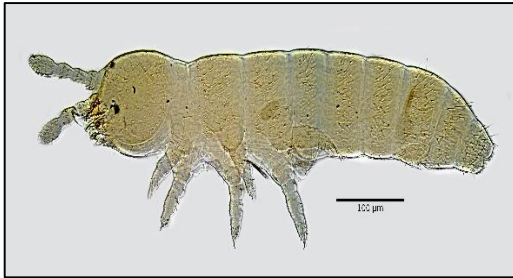
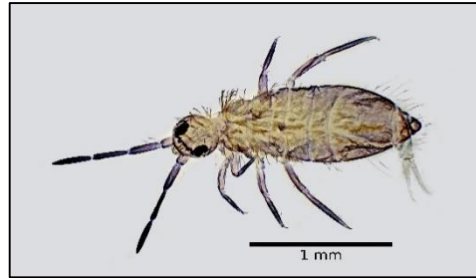


Figura 5A. Dominancia de grupos y subgrupos de mesofauna que habitan en la hojarasca del A5 sitio de referencia con vegetación nativa de *Quercus rugosa*.

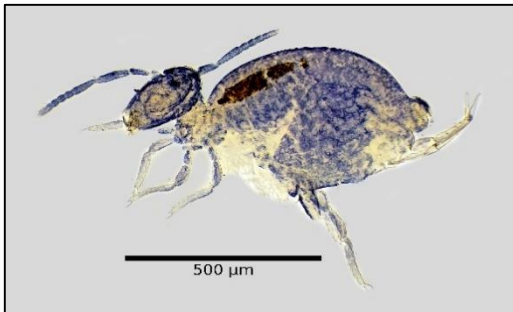
**ANEXO 3: ANEXO FOTOGRÁFICO DE EJEMPLARES DE MESOFAUNA
ENCONTRADOS EN LA CUENCA DEL RIO CHAPINGO**



Clase: Collembola
Orden: Entomobryomorpha
A5. *Quercus rugosa*



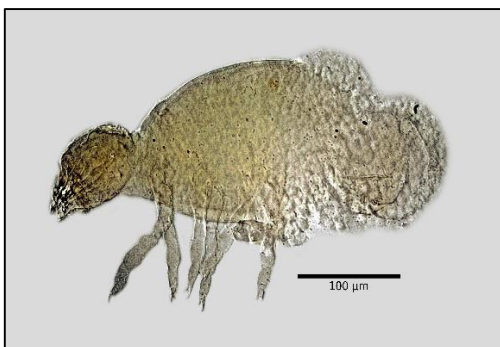
Clase Collembola
Orden: Entomobryomorpha
A3. *Eucalyptus globulus*



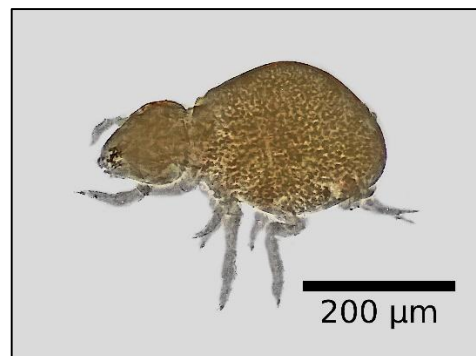
Clase: Collembola
Orden: Symphypleona
A2. *Pinus montezumae*



Clase: Collembola
Orden: Symphypleona
A5. *Quercus rugosa*



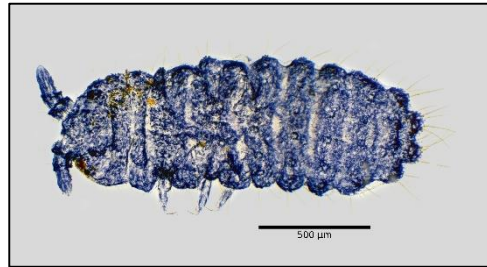
Clase: Collembola
Orden: Neelipleona
A5. *Quercus rugosa*



Clase: Collembola
Orden: Neelipleona
A2. *Pinus montezumae*



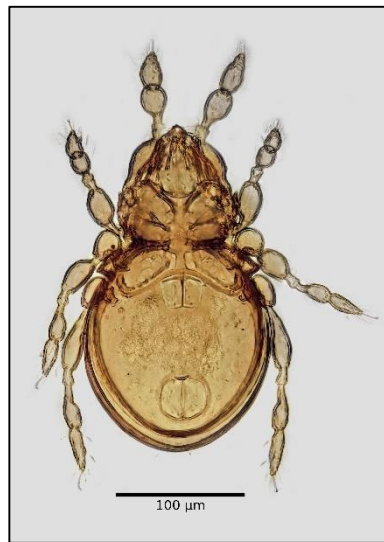
Clase: Collembola
Orden: Entomobryomorpha
A5. *Quercus rugosa*



Clase: Collembola
Orden: Poduromorpha
A5. *Quercus rugosa*



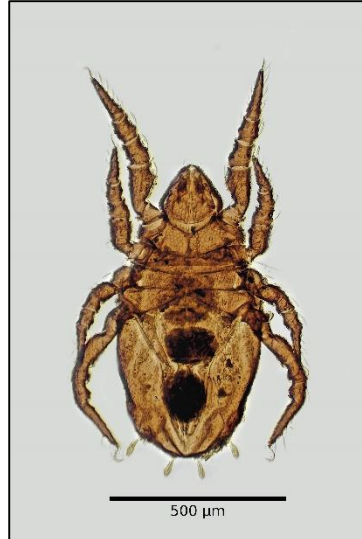
Subclase: Acari
Suborden: Oribatida
A1. *Cupressus lindleyi*



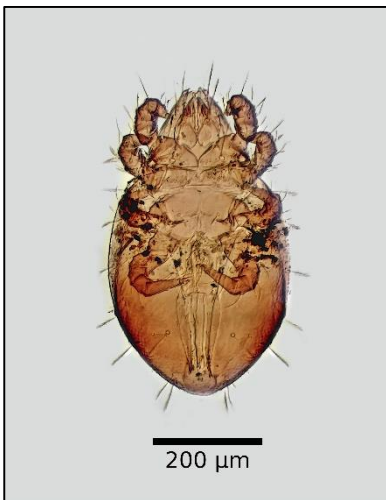
Subclase: Acari
Suborden: Oribatida
A1. *Cupressus lindleyi*



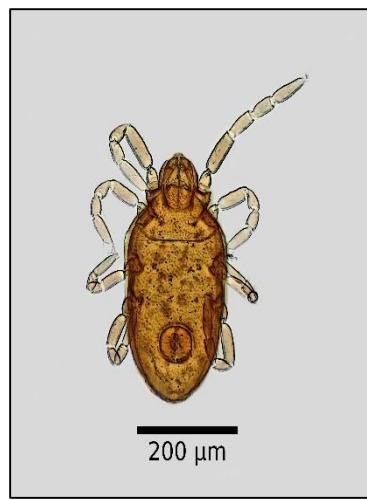
Subclass: Acari
Suborden: Oribatida
A2. *Pinus montezumae*



Subclass: Acari
Suborden: Oribatida
A2. *Pinus montezumae*



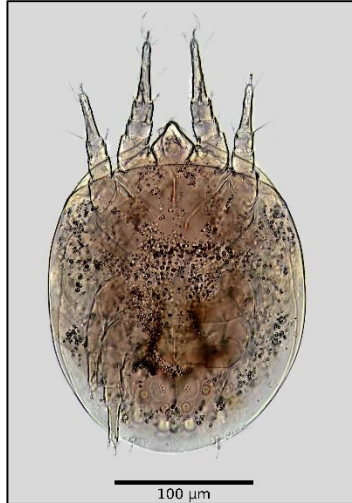
Subclass: Acari
Suborden: Oribatida
A1. *Cupressus lindleyi*



Subclass: Acari
Suborden: Mesostigmata
A1. *Cupressus lindleyi*



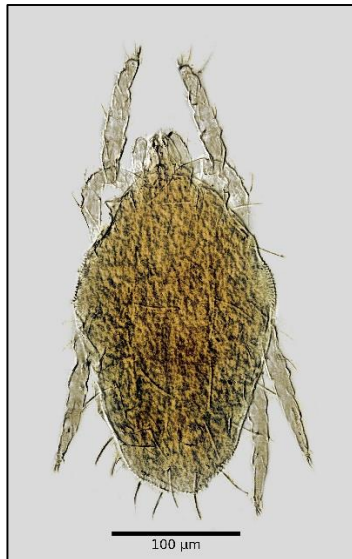
Subclase: Acari
 Suborden: Mesostigmata
 A1. *Cupressus lindleyi*



Subclase: Acari
 Suborden: Astigmata
 A2. *Pinus montezumae*



Subclase: Acari
 Suborden: Endeostigmata
 A2. *Pinus montezumae*



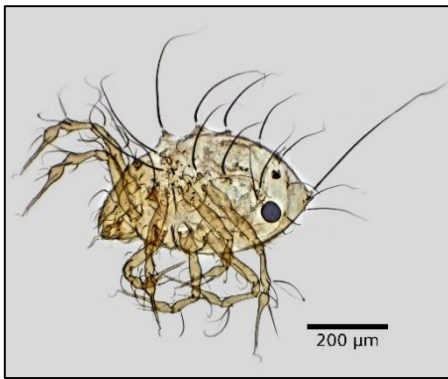
Subclase: Acari
 Suborden: Prostigmata
 A3. *Eucalyptus globulus*



Subclase: Acari
 Suborden: Prostigmata
 A3. *Eucalyptus globulus*



Subclase: Acari
 Suborden: Prostigmata
 A5. *Quercus rugosa*



Subclase: Acari
 Suborden: Oribatida
 A5. *Quercus rugosa*



Subclase: Acari
 Suborden: Oribatida
 A5. *Quercus rugosa*