



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Instituto de Ecología

INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO EN MATORRAL DE
Quercus spp., PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN
EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE GUADALUPE,
MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(RESTAURACIÓN ECOLÓGICA)**

P R E S E N T A

ARMANDO NAVARRETE SEGUEDA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

COMITÉ TUTOR: DRA. CHRISTINE DESIREE SIEBE GRABACH
DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES

MÉXICO, D.F.

Noviembre, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Instituto de Ecología

INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO EN MATORRAL DE
Quercus spp., PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN
EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE GUADALUPE,
MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(RESTAURACIÓN ECOLÓGICA)**

P R E S E N T A

ARMANDO NAVARRETE SEGUEDA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

COMITÉ TUTOR: DRA. CHRISTINE DESIREE SIEBE GRABACH
DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES

MÉXICO, D.F.

Noviembre, 2011

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 27 de junio de 2011, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del alumno **NAVARRETE SEGUEDA ARMANDO** con número de cuenta **510008156** con la tesis titulada **"INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO EN MATORRAL DE *Quercus* spp. PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE GUADALUPE, MÉXICO"**, realizada bajo la dirección del **DR. JORGE LÓPEZ BLANCO**:

Presidente: M. EN C. FRANCISCO GONZÁLEZ MEDRANO
Vocal: DR. GILBERTO VELA CORREA
Secretario: DRA. CHRISTINE DESIREE SIEBE GRABACH
Suplente: DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM
Suplente: DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 11 de enero de 2012.

Mi del Coro Arizmendi
Dra. María del Coro Arizmendi Arriaga
Coordinadora del Programa

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a)

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental con orientación en Restauración Ecológica) Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Fundación Packard, por el apoyo económico para la realización del trabajo de campo.

Al apoyo económico recibido por CONACYT.

Al apoyo económico recibido por PAEP.

Al Dr. Jorge López Blanco por su apoyo en la realización de esta

A los miembros del Jurado: M. en C. Francisco González Medrano, Dr. Gilberto Vela Correa, Dra Christine Siebe Grabach, Dr. Lorenzo Vázquez Selem y Dr Julio Campo Alves.

Al Comité Tutoral: Dr. Jorge Lopez Blanco, la Dra Christine Siebe Grabach y Dr. Julio Campo Alves.

A todos ellos por sus valiosas contribuciones a esta tesis y a mi desarrollo académico.

Agradecimientos personales

A mi familia

Particularmente a mi madre, todo te se lo debo. A mi tío Jesús Cevallos, por orientarme y apoyarme en cada paso. A mi hermana, por motivarme a ser mejor cada día. A Dafne, no lo hubiera logrado sin ti.

A mi otra familia

Jorge Vega, Elisa Talancon, Aslam Narvaes, Rocío Alanis, Ale Guzmán, Israel Rodríguez² y Felipe por sus comentarios a esta tesis, por contribuir a mi desarrollo personal y mejorar mi vida con su compañía.

A mis amigos

Elizabeth, Paco, Lourdes González Arqueros, Ramón Cocodrilo, Narce, Diego, por su apoyo y opiniones que contribuyeron en esta tesis.

A mis profesores

Por formar parte de mi formación académica y personal, particularmente a la Dra. Christine Siebe por fomentar mi pasión en el estudio de los suelos y al Dr. Gilberto Vela por ser mí amigo, mentor y modelo a seguir.

A la Dra. Susana Valencia por su apoyo en la identificación de los encinos.

A la Biol. Georgina García y a Luz María por el apoyo logístico recibido en la realización de la tesis y de la maestría en general.

A la Dra. Ma de Lourdes Rodríguez Gamiño y a la Biol. Maricruz Miranda por el apoyo en campo.

Al Instituto de Ecología y la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mis estudios de Maestría.

Dedicatoria

A:
Anaite Dafne Vaca Velazco
Cecilia Segueda Mora
Gabriela Navarrete Segueda

Por ser fuente de inspiración, fortaleza y alegría

ÍNDICE

I Resumen	I
II Abstract	III

Capítulo 1

1.1 Introducción	1
1.2 Contribución del conocimiento de los suelos a la restauración ecológica	1
1.3 La calidad de suelo como un concepto guía en la restauración del ecosistema	3
1.4 La evaluación de la calidad de suelos y los criterios de selección de indicadores	3
1.5 Planteamiento del problema	4
1.6 Requerimientos del matorral de <i>quercus</i>	8
1.7 Objetivos de la investigación	11
1.8 Hipótesis	11

Capítulo 2 Metodología

2.1 El ANP Sierra de Guadalupe	12
2.1.1 Localización geográfica	12
2.1.2 Clima	14
2.1.3 Vegetación	15
2.2 Estructura del trabajo	16
2.3 Trabajo de Gabinete	17
2.3.1 Delimitación del área de estudio y selección de los sitios de muestreo	17
2.4 Caracterización del relieve en campo	18
2.4.2 Evaluación del suelo	19
2.4.3 Vegetación	19
2.5 Análisis de datos	20
2.5.1 Selección preliminar de indicadores de calidad de suelo para el matorral de <i>Quercus</i>	20

Capítulo 3 Resultados y Discusión

3.1 Condiciones generales de relieve y suelo para el matorral de <i>Quercus</i> en el ANP Sierra de Guadalupe	22
3.2 Selección preliminar de indicadores	24
3.3 Clasificación de la vegetación	29
3.3.1 Recopilación bibliográfica de la vegetación de la sierra de Guadalupe	35
3.4 Selección de indicadores	39

Capítulo 4 Propuestas

4.1 Selección de áreas susceptibles a restaurar con el matorral de <i>Quercus</i>	46
---	----

Capítulo 5. Conclusiones

5. Conclusiones	54
-----------------------	----

6 Referencias

6. Referencias.....	56
---------------------	----

Anexos

Anexo 1.Perfiles de suelo analizados en el ANP Sierra de Guadalupe	64
Anexo 2 Algunas características edafo-ecológicas de sitio de los perfiles estudiados.....	74
Anexo 3 Variables integradas en el análisis ACP y ACC	75

Indicadores de calidad de suelo en matorral de *Quercus* spp., para la restauración ecológica en el Área Natural Protegida Sierra de Guadalupe, México.

RESUMEN

El ANP Sierra de Guadalupe ha estado sujeta a presiones por actividades humanas desde tiempos prehispánicos, sin que hasta la fecha se haya considerado la calidad de suelos desde una perspectiva biofísica en los trabajos que se desarrollan en ella. No se tiene conocimiento de las condiciones de referencia que permita seleccionar áreas prioritarias a restaurar, así como las especies adecuadas para dicha actividad. En el ámbito de la restauración ecológica, el concepto de calidad de suelos permite establecer indicadores de evaluación y monitoreo a partir de los cuales se podrían desarrollar, adaptar e incentivar prácticas de manejo y sistemas de producción no degradativos. El objetivo de este estudio, fue determinar los indicadores de calidad de suelo que permiten seleccionar áreas para la reintroducción de *Quercus* con fines de restauración ecológica en la Sierra de Guadalupe. Se evaluaron parámetros de calidad de suelo en los sitios de muestreo y se midieron los aspectos de estructura y composición del matorral, como variables de respuesta. También se realizó un análisis sobre el efecto de los atributos del relieve en el establecimiento del matorral de *Quercus* spp., considerando aspectos relativamente estables del paisaje, como es la geometría de la ladera, la pendiente, la exposición y altitud en cada uno de los sitios de matorral y finalmente se determinó la relación existente entre las variables de suelo y relieve con el establecimiento del matorral a partir de un análisis canónico de correspondencias. En general se considera que las variables de calidad de suelos que explican cambios en el matorral de *Quercus* spp., en el ANP Sierra de Guadalupe son; exposición, pendiente, posición en el relieve, pH, volumen del suelo, relación evapotranspiración-precipitación, relación carbono-nitrógeno y relación calcio-magnesio. La utilización de las variables seleccionadas, explica en el 86.9% de la varianza explicada para el establecimiento del matorral de *Quercus* spp. Las variaciones en la estructura y composición del matorral están fuertemente influenciadas por la pendiente, pH y volumen del suelo. *Q. frutex* es la especie que se encuentra adaptada a las

condiciones de sitio (relieve y suelo). Mientras que *Q. mexicana* solo se localiza en dorsos de ladera, siendo dependiente de las condiciones de: exposición Noroeste, pendiente entre 20 y 25°, el pH entre 5.4 y 7, masa de suelo por volumen mayor de 2 kg/dm³. *Q. desertícola* se localiza en hombros y dorsos de ladera, se observó que presenta mayores tallas en los sitios que almacenan y retienen más agua. A partir de los indicadores se realizó la selección de áreas prioritarias para restaurar el matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe. Los criterios seleccionados constituyen una herramienta útil para entender los requerimientos de las especies del matorral de *Quercus* en el área de estudio con base en la determinación de indicadores de calidad a diferentes escalas, siendo posibles a partir de ello, sugerir áreas para la restauración ecológica.

Soil quality indicators in shrub cover of *Quercus* spp., for ecological restoration in the Natural Protected Area Sierra de Guadalupe, Mexico.

Abstract

The NPA Sierra de Guadalupe has been subject to pressure from human activities since prehispanic times, but to date the soil quality from a biophysical perspective it has not been considered in the restoration strategy knowledge exist on specific criteria that allow to select priority areas to be restored, and the appropriate species for this activity. In the field of ecological restoration, soil quality concept allow to establish monitoring and assessment indicators from which management practices can be developed, adapted and encouraged and further degradation prevented The aim of this study was to determine soil quality indicators to select areas for the reintroduction of *Quercus* for ecological restoration in the Sierra de Guadalupe. We evaluated soil quality parameters at several sampling sites and determined the structure and composition of the shrub cover, as response variables. We also analyzed the effect of relief attributes on the establishment of the *Quercus* spp., considering relatively stable aspects of the landscape, such as slope geometry, exposure and altitude at each of the sites and finally the relationship between soil and relief attributes with the establishment of the shrub species was determinate by canonical correlation analysis. Results show that the soil quality variables that explain changes in the shrub of *Quercus* spp., in the Sierra de Guadalupe NPA are; exposure, slope, relief position, pH, soil volume, and the ratios evapotranspiration-precipitation, carbon-nitrogen and calcium-magnesium. These variables explain 86.9% of the variance for the establishment of shrub *Quercus* spp. Variations in the structure and composition of the shrub cover are strongly influenced by slope, pH and soil volume. *Q. frutex* is the species that is beat adapted to the determinant site (relief and soil) conditions. While *Q. mexicana* is only located at hillsides, being dependent on the following conditions: exposure (NW), slope (20-25°), pH (5.4-7.0), soil mass (2 kg/dm³). *Q. deserticola* is located on shoulders and backslope, it has larger sizes at sites that store and hold more water. On behalf of the indicators, we selected the priority areas to restore

Quercus shrub in the Sierra de Guadalupe NPA. The selected criteria are a useful tool to understand the requirements of the *Quercus* scrub species in the study area based on the determination of quality indicators at different scales, being possible, from this, to suggest potential sites for restoration.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas son entidades naturales que a partir de su propia estructura, composición y funcionamiento, tienen algún grado inherente de resiliencia los cambios originados por perturbaciones. Pero cuando la extensión, la magnitud y la recurrencia de las alteraciones son mayores a la capacidad de resiliencia, ocasionan un deterioro del ecosistema a tal grado que la intervención humana sea la única respuesta viable para intentar la recuperación de la mayor cantidad posible de sus componentes originales, de su estructura y de sus funciones (Sánchez, 2005).

La restauración ecológica como estrategia de manejo de los ecosistemas, busca asistir a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido. Es una actividad intencional que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema respecto de su salud (procesos funcionales), integridad biológica, (composición de especies y estructura de la comunidad) y sustentabilidad (resistencia a disturbios y resiliencia) (SER, 2005).

La restauración ecológica abarca, primeramente, el trabajo teórico relacionado con el conocimiento de las características y funciones que realiza el ecosistema, posteriormente, un aspecto práctico responsable de la recuperación de las características y funcionalidad (Márquez-Huitzil, 2005). Intenta regresar al ecosistema al estado previo a su degradación, lo cual puede requerir la reconstrucción del suelo y la colocación de las especies originales (nativas) del sitio (Brown *et al.*, 1986).

1.2 Contribución del conocimiento de los suelos a la restauración ecológica

Las características de los suelos en un área específica determinan las funciones que pueden desarrollar, definen sus usos potenciales y son la base para establecer las prácticas de manejo que llevarán a un aprovechamiento óptimo de este recurso natural. El suelo es un componente crucial para definir el plan de

manejo de cualquier territorio (Siebe *et al.*, 2003).

Es importante reconocer que los procesos de degradación del suelo afectan de manera distinta a las propiedades edáficas, alterando su funcionamiento y presentando repercusiones e implicaciones en los otros componentes y funciones de los ecosistemas como pueden ser la regulación del ciclo hidrológico, la biodiversidad, la productividad de las plantas, la producción de sus semillas y la germinación de las mismas (Jordan, 1983 citado por Cotler *et al.*, 2005).

Un proyecto que plantea como objetivo la restauración de sitios altamente degradados, debe considerar el conocimiento de las características del suelo (Heneghan *et al.*, 2008), desde las actividades que preparación, hasta el monitoreo de los resultados de los tratamientos de restauración (Callaham *et al.*, 2008).

Pensando en la restauración de un ecosistema, el conocimiento del suelo se enfoca a conceptos relevantes como las funciones que cumple y los indicadores que permitan evaluar su calidad, su variabilidad espacial en el paisaje y la relación temporal de los procesos degradación-restauración en el sistema planta-suelo. El conocimiento de este equilibrio dinámico sustenta el planteamiento de técnicas y prácticas de restauración de suelos como parte de la restauración ecológica (Cotler *et al.*, 2005).

La premisa de base es que, a cada unidad de paisaje biofísico, a medida que un suelo se desarrolle, tiene una capacidad específica de satisfacer los requerimientos de la vegetación, así como de ofrecer una variedad de servicios ecosistémicos específica, en función de sus características. La restauración de comunidades vegetales degradadas, en general suele ser antecedida por la rehabilitación de los suelos en los cuales se implanta. De ahí que resulta relevante conocer las funciones de estos suelos así como de su variabilidad espacial (Cotler *et al.*, 2005).

1.3 La calidad de suelo como un concepto guía en la restauración del ecosistema

La calidad del suelo y sus parámetros se pueden ligar al funcionamiento del ecosistema (Kemmers *et al.*, 2007) ya que integran e interconectan los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo en una situación determinada (Astier-Calderón *et al.*, 2002), desde una perspectiva ecológica. Este concepto refleja la capacidad específica que tiene un suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema, para sostener o mejorar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Karlen *et al.*, 1997; USDA-NRSC-SQI, 2001; Bautista *et al.*, 2004).

En el ámbito de la restauración ecológica el concepto de calidad de suelo permitirá establecer indicadores de evaluación y monitoreo a partir de los cuales se podrían desarrollar, adaptar e incentivar prácticas de manejo y sistemas de producción no degradativos (Cotler *et al.*, 2005).

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo, y para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo (Karlen *et al.*, 2003; NRCS, 2004). La evaluación de la calidad de suelos es una herramienta centrada en la dinámica que presentan las propiedades y los procesos edáficos, y que son eficaces para evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo, por lo que es realizada para estructurar metas prioritarias, identificar las funciones críticas del suelo necesarias para lograr esas metas y seleccionar indicadores que provean información útil para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo durante un período dado (Gil-Stores *et al.*, 2005).

1.4 La evaluación de la calidad de suelos, las condiciones de sitio y los criterios de selección de indicadores

La calidad del suelo debe ser evaluada con base en su papel multifuncional

(Doran *et al.*, 1996; Karlen *et al.*, 1997), puesto que los suelos son muy diversos en sus propiedades, desempeñan funciones con distinta intensidad y adquieren con ella potenciales diferentes (Siebe, 1999). Entendiendo cada potencial como el resultado de la interacción de las diversas propiedades del suelo, los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer cada función (Doran *et al.* 1996; Carter *et al.*, 1997). En ese sentido, una propiedad puede ser simultáneamente relevante en varios atributos o funciones que desempeñe un suelo en particular.

El criterio base es elegir las funciones que mejor representen ese servicio ecosistémico, así como identificar los atributos de la calidad del suelo, de tal modo que se puedan traducir en propiedades fácilmente cuantificables, y que estos atributos presenten mayor sensibilidad a mostrar cambios si la función se modifica como resultado de las prácticas de conservación y manejo.

Junto con las propiedades fisicoquímicas y morfológicas de los suelos, la integración de variables geomorfológicas como son; la identificación de procesos geomorfológicos (tipos de erosión, procesos gravitacionales), las características morfométricas del relieve (geometría de la porción de ladera); así como de altitud, pendiente y orientación del relieve, permitirán la delimitación de unidades de paisaje con características relativamente homogéneas.

En estas unidades, la interacción de los procesos morfodinámicos y pedogenéticos, la litología aflorante, las condiciones climáticas locales, la actividad de los organismos y la edad de la superficie, conducen a determinar un mosaico ambiental, en el cual, la variación de estos factores a nivel regional forman una diversidad de hábitats desde el punto de vista ecológico (Schlichting, 1986 citado por Cotler *et al.*, 2002) y una diferenciación de la calidad de suelo, que aunado con las variables antes mencionadas, establecerán diferentes condiciones de sitio para el desarrollo del servicio ecosistémico a evaluar.

1.5 Planteamiento del problema

De acuerdo con la LEGEEPA (DOF, 2011), las áreas naturales protegidas (ANP)

son las zonas del territorio nacional y aquéllas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables. Particularmente en el Distrito Federal existen 24 ANP, cubriendo una superficie de 2,507 mil hectáreas (GDF, 2009).

Aunque la superficie que cubre la Sierra de Guadalupe solo representa el 1.4 del suelo de conservación del Distrito Federal (PAOT, 2007), la sierra es un complejo de origen volcánico que constituye el último reducto de extensión considerable de recursos naturales y áreas cubiertas de vegetación al norte de la Ciudad de México (Figura 1). Forma una barrera natural contra la contaminación y degradación del ambiente, sus características morfológicas, geológicas y ecológicas la convierten en una de las más importantes reservas bióticas de la Cuenca de México, y resguarda un número importante de recursos, entre los que se encuentran 319 especies de plantas y 135 de fauna silvestre (GODF, 2003).

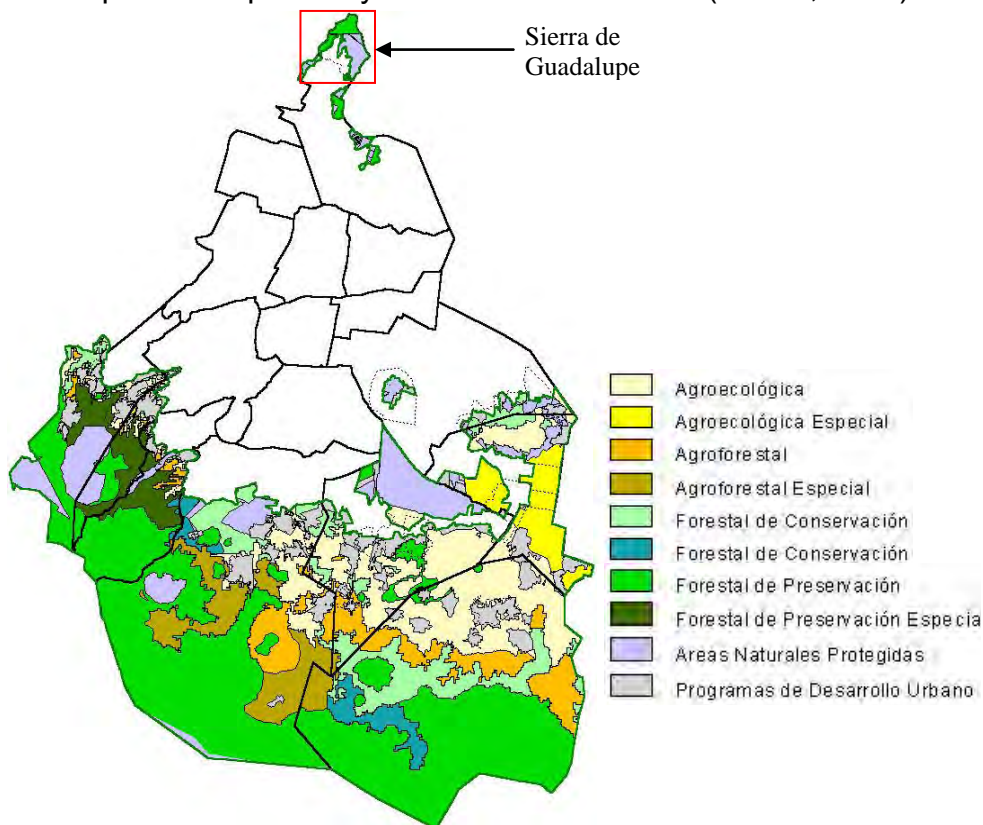


Figura 1. Suelo de conservación de Distrito Federal (GODF, 2000).

La región donde se localiza la Sierra de Guadalupe ha estado sujeta a presiones por actividades humanas, como son la deforestación desde tiempos prehispánicos, cambio de uso de suelo, incendios, la falta de cobertura vegetal permanente, degradación del suelo por erosión y aprovechamiento agrícola en terrenos con aptitud de uso forestal (figura 2), lo cual representa una problemática ambiental y urbana muy importante que es necesario resolver (CONSERVA, 2004). Los limitados intentos para recuperar y restaurar la flora y fauna incluyen reforestar con especies exóticas (p. e. *Eucalyptus spp*, *Schinus molle*, *Casuarina equisetifoli*) y construir muros que eviten el avance de los asentamientos humanos (Méndez-De la Cruz, 1992).

En la Sierra se distribuyen remanentes de encinares arbustivos en los cuales se considera que la calidad de los suelos es mayor, es por ello que para llevar a cabo la rehabilitación de suelos con fines de restauración ecológica a partir de la reintroducción de la vegetación nativa en el ANP Sierra de Guadalupe, es necesario contar con conocimientos de referencia de calidad de suelo que integren además de las características edafoecológicas, físicas y químicas de los suelos, también aspectos del paisaje biofísico resultantes de los procesos geomorfológicos dominantes en la sierra.

En la Sierra de Guadalupe las características de los suelos se pueden explicar en el contexto de un modelo de ladera, el cual acentúa un patrón de toposecuencia de erosión y depósito (Flores-Román *et al.*, 2009), ya que en aéreas montañosas la formación de suelos está fuertemente afectada por procesos geomorfológicos activos, los mosaicos de suelos son formados por la combinación de procesos de ladera (Krasilnikov *et al.*, 2005).

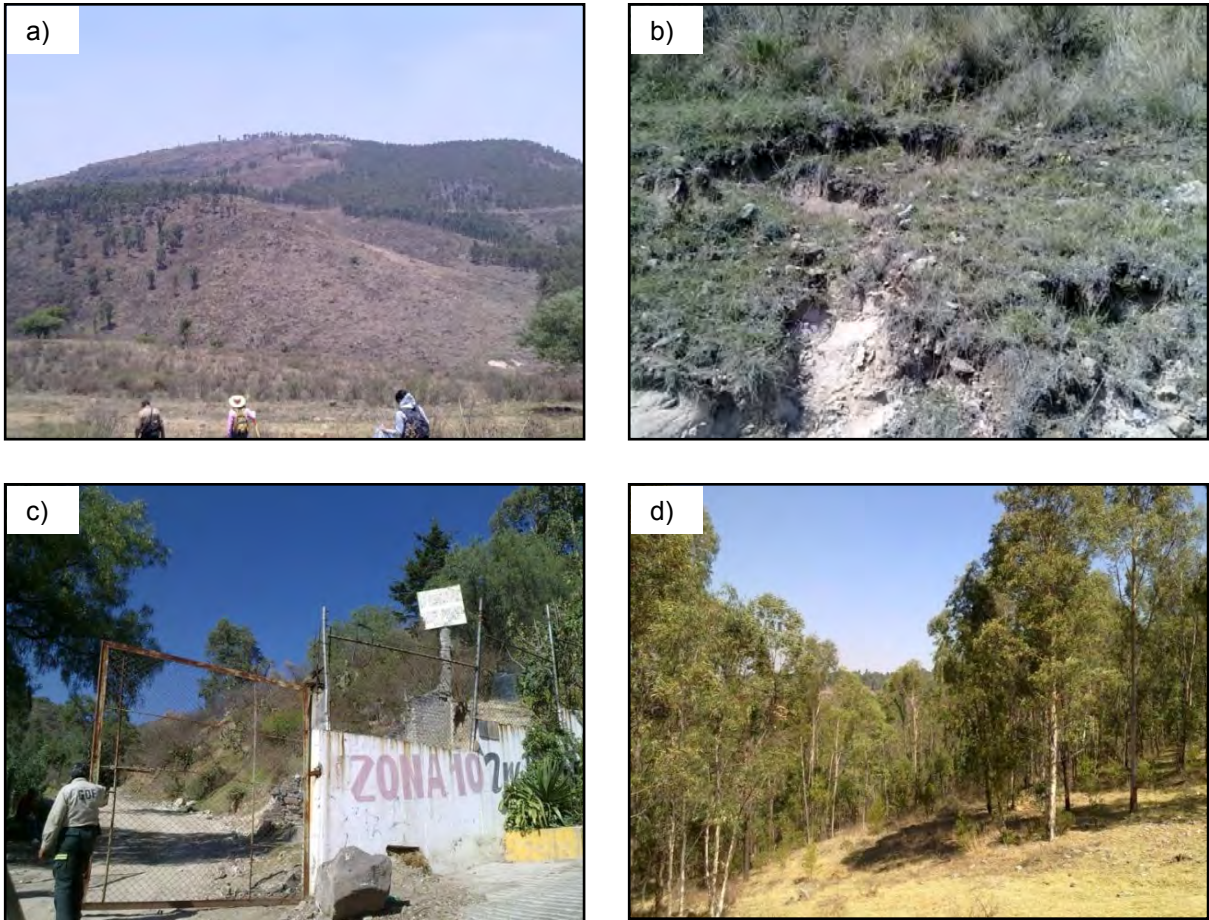


Figura 2. Efectos antrópicos sobre el área de estudio: a) deforestación y falta de cobertura vegetal permanente, b) degradación del suelo por erosión; c) presencia del muro ecológico y d) reforestación con especies exóticas.

Hasta la fecha no se ha hecho un levantamiento de calidad de suelo que incorpore aspectos de sitio y los mosaicos ambientales que determina el relieve en la Sierra de Guadalupe, por lo que no se tiene conocimiento de las condiciones de referencia que permitan seleccionar áreas prioritarias a restaurar, así como las especies adecuadas para dicha actividad.

Es por ello que para diseñar y llevar a cabo medidas de restauración ecológica que permitan influir de manera directa en áreas con distintos niveles de degradación, es necesario contar con una evaluación de calidad de suelo y estabilidad de la ladera a nivel local que lleve a generar un diagnóstico ambiental integral, así como la designación de indicadores que permitan elaborar propuestas de restauración y monitorear el éxito de las mismas dentro del ANP Sierra de Guadalupe.

1.6 Requerimientos del matorral de *Quercus*

A nivel global, el incremento gradual en el número de especies a lo largo de cualquier gradiente se puede correlacionar de manera importante con la energía solar y la precipitación que recibe una región. Sin embargo, cuando se trabaja a escalas espaciales más grandes, otros factores pueden ser determinantes en la distribución y abundancia de las especies. A nivel de paisaje, estas se pueden frecuentemente correlacionar con variaciones en las condiciones edáficas, es decir, a la composición química, física y morfológica del suelo. En este sentido, aspectos como la distribución, el tamaño, la calidad leñosa del tallo, la susceptibilidad a la sequías y heladas entre otras, pueden ser influidos por las características de los suelos (Paredes-Rojas, 2010).

Los matorrales de *Quercus*, tienen una vasta distribución en la Altiplanicie de México, aunque se presentan, por lo común, en forma de manchones pequeños y en su conjunto no cubren mucha superficie. Son variables en cuanto a su altura; incluso diversas especies de *Quercus* que normalmente se comportan como árboles, pueden, en condiciones especiales, asumir un porte arbustivo y formar matorrales (Rzedowski, 2006).

La gran mayoría de los encinares arbustivos de México se desarrolla en áreas que son climáticamente intermedias entre los matorrales propios de clima francamente árido y los bosques de clima semihúmedo, o sea en las áreas limítrofes de climas BS y Cw de la clasificación de Koeppen (1948). Las precipitaciones medias anuales más frecuentes son del orden de 400 a 750 mm (Rzedowski, 2006; Luna-Cruz, 2008); por su parte, Ezcurra (1990) y González-Elizondo *et al.* (1993) reportan al matorral de encinos sobre todo en áreas semiáridas con 600 a 900 mm de lluvia anual media.

Alvarado-Rosales *et al.* (2007) identificaron la falta de agua como uno de los principales causantes de estrés y muerte del género *Quercus* en el centro-oeste de México, ellos mencionan que los periodos de estiaje, interfieren con el desarrollo normal de las plantas, y en suelos secos las plantas no son capaces de reemplazar el agua que han perdido, por lo cual desarrollan un estrés fisiológico.

Así mismo, para Bonfil (1998) una de las principales causas de mortalidad de plántulas de *Quercus* es la falta de humedad durante la temporada de secas, siendo evidentes las diferencias entre sitios parcialmente sombreados en comparación con sitios abiertos, teniendo un efecto no solo en la supervivencia sino además en el crecimiento de las plántulas, tanto de altura como de diámetro basal.

El matorral de *Quercus* prospera sobre suelos someros y pedregosos de laderas de cerros (Rzedowski, 2006). González-Elizondo *et al.* (1993), mencionan que este matorral se adapta a suelos someros (menos de 15 cm de profundidad), algo pedregosos y con escaso afloramiento de roca madre. Por su parte Luna-Cruz (2008), reporta al matorral de *Quercus frutex* en suelos de profundidad media (40 cm), con un contenido de materia orgánica de entre 3 y 4%, una porosidad mayor del 50%, densidad aparente baja y pH entre 5.4 y 6.3 con desarrollo de estructura en bloques subangulares.

Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo (2004) en la Sierra de Guadalupe reportan efectos favorables en la supervivencia de plantaciones de restauración con encinos en laderas de exposición nor-noreste.

Es posible discutir varios factores edáficos como si fueran variables estadísticamente independientes, aunque en la realidad muchos de ellos estén correlacionados. En este sentido, hay casos en los que es posible entender los patrones de vegetación estudiando un solo factor edáfico, pero lo más frecuente es que sea necesario estudiar la relación suelo-planta, tomando en cuenta la naturaleza multivariada de los suelos, e incluir la distribución espacial misma de los factores edáficos (Hammer, 1988, citado por Paredes-Rojas, 2010).

Considerando que en los suelos de la Sierra de Guadalupe las características y propiedades del suelo son atribuidas principalmente a su arreglo espacial sobre las laderas en sentido longitudinal (Vela y Flores, 2006), los suelos del ANP Sierra de Guadalupe, al ser diversos en sus propiedades, desempeñan funciones con distinta intensidad y adquieren potenciales diferentes.

La principal cualidad del suelo en relación con el crecimiento de la vegetación, basado en el conjunto de sus propiedades, es la capacidad que tiene

para almacenar nutrimentos y agua y ponerlos de forma disponible para las plantas, además de proporcionar un espacio para el anclaje y desarrollo de las raíces.

En el área de estudio los factores del relieve como la pendiente, la forma y posición de la ladera, estarán directamente relacionados con los procesos de erosión y acumulación de suelo, mismos que influirán en la capacidad de brindar soporte y de retener agua además de nutrimentos disponibles para el matorral. En sinergia, la exposición de las laderas podría estar jugando un papel relevante respecto del favorecimiento de micro ambientes favorables para los *Quercus* determinados por la cantidad de luminosidad en cada ladera y su influencia en el régimen de humedad del suelo durante los periodos de déficit hídrico.

Con base en lo anterior, Körner (2003) resalta la importancia de la influencia del conocimiento en las variaciones en la ladera, la exposición, el relieve y el suelo en los diferentes gradientes sobre la vegetación en los ecosistemas montañosos.

Razón por la cual, la localización dentro de los sitios respecto de una posición en la ladera (superficie cumbral, hombro, dorso) puede resultar insuficiente. Puesto que la realidad es más compleja que los sistemas morfológicos simplificados, considerar los efectos de la geometría de la ladera permite incluir la variabilidad de la Sierra de Guadalupe de acuerdo con esta evaluación de calidad de suelo, la premisa base es, que cada sitio presentará condiciones particulares de calidad de suelo y relieve, lo que determinara variaciones sobre el crecimiento y estructura del matorral.

1.7 Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Determinar los indicadores de calidad de suelo que permita la reintroducción del matorral de *Quercus* spp., con fines de restauración ecológica en el ANP Sierra de Guadalupe.

Objetivos específicos:

- a) Determinar los requerimientos respecto de calidad de suelo y relieve del matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe
- b) Proponer una zonificación para la restauración en el área de estudio, considerando la reintroducción de *Quercus* spp.

1.8 Hipótesis

Dado que la falta de agua es uno de los principales causantes de estrés y muerte del género *Quercus*, teniendo un efecto en la supervivencia y en el crecimiento de las plántulas. Se espera que en los sitios en los que el suelo presente mayores almacenes de agua y nutrimentos, el crecimiento y la densidad del matorral de *Quercus* serán mejores.

Considerando que en la Sierra de Guadalupe las propiedades de los suelos son atribuidas principalmente a su arreglo espacial sobre las laderas y que la falta de humedad durante la época seca puede tener un efecto determinante en la supervivencia encinos. Se espera que las laderas con exposición norte y pendientes menores a 20° determinaran condiciones de sitio favorables para el desarrollo del matorral de *Quercus*.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 EL ANP SIERRA DE GUADALUPE

2.1.1 Localización geográfica

La Sierra de Guadalupe se localiza en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, dentro de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, constituye un sistema montañoso de origen volcánico, inmerso en el Altiplano Central, con altitudes que van desde los 2,240 hasta los 3,000 msnm. Geográficamente se localiza entre los 19°37' y 19°29' de latitud norte y los 99°12' y 99° 02' de longitud oeste (Figura 3), tiene una superficie de 6,238.35 ha y está constituida por estructuras volcánicas, tales como domos y estratovolcanes colapsados, los cuales tienen asociados depósitos de caída, flujos piroclásticos, flujos de lodo y avalanchas (Carlos-Valerio *et al.*, 2007).

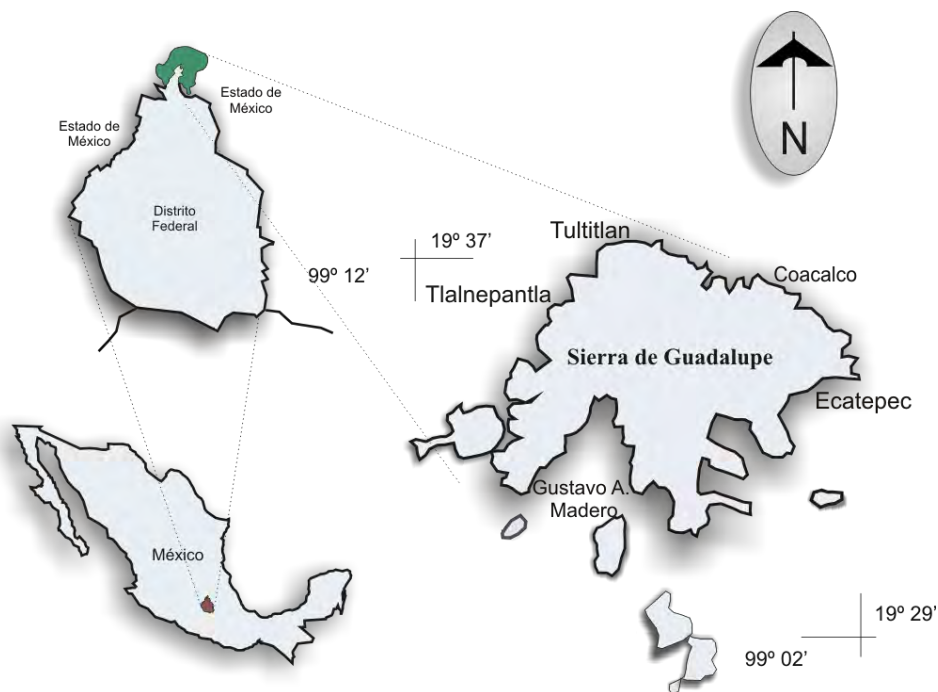


Figura 3. Localización de la Sierra de Guadalupe

Su relieve se originó a partir de procesos volcánicos y tectónicos, posteriormente fue modelado por la erosión y depositación. La disección se

manifiesta por barrancos, circos de erosión y valles, algunos de ellos en forma de herradura; la red fluvial es principalmente de tipo dendrítico y está controlada por el intenso fracturamiento y fallamiento de la roca (Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996; Carlos-Valerio *et al.*, 2007).

La sierra es un pequeño conjunto de elevaciones volcánicas independientes y sobrepuestas, formado a partir del Mioceno (Mooser *et al.*, 2002), se originó por dos tipos de actividades: procesos explosivos que formaron los edificios mayores; y de derrames de lava de poca duración y extensión (Lugo-Hubp y Salinas Montes, 1996).

Salinas Montes (1994); Lugo-Hubp y Salinas Montes (1996) mencionan que en la mayor parte de la Sierra de Guadalupe, predominan los derrames de lava, en los cuales se observan 11 tipos de materiales no consolidado que consisten en los de origen lahárico, de derrame piroclástico, detritos de lava alterada, ceniza, arena, pómez, brecha, arena y ceniza, pómez con arena y ceniza, conglomerado y depósitos de ladera.

Las rocas de la sierra de Guadalupe están compuestas principalmente por andesitas con alto contenido de sílice (dacita), frecuentemente con feldespato (Ordoñez, 1985) y en cantidades menores, riolita y dacita (Campa-Uranga, 1965), incluyendo brechas y vitrófidos (Lozano-Barraza, 1968).

Los suelos son poco profundos, compuestos, formados a partir de andesitas y brecha volcánica con diversos grados de intemperismo y material aluvial, cuya permeabilidad va de moderada a rápida. Predomina el tipo Phaeozem háplico, que se localiza en lomeríos con declives de moderados a suaves, es de color oscuro y rico en materia orgánica y nutrientes. En menor proporción, en zonas escarpadas o con pendientes mayores a 50°, se encuentran los Leptosoles constituidos por horizontes A delgados (<25 cm) sobre andesitas, tepetate o caliche duro; son, poco profundos y se encuentran bien drenados (GODF, 2003).

La sierra de Guadalupe está constituida por una red de corrientes estacionales. Los arroyos principales son Peña Gorda, El Panal, La Armella, El Tejón, El Grande y Xochitlán. Posee un volumen disponible de agua superficial muy escaso y un alto porcentaje de infiltración hacia los mantos freáticos (INEGI,

1970).

Su relevancia hidrológica es alta por la gran capacidad de infiltración que tiene el suelo, aún cuando la precipitación es baja respecto al resto del suelo de conservación del Distrito Federal, más del 80% del agua de lluvia se infiltra contribuyendo a la recarga del manto; esto es especialmente importante si se considera que la Sierra de Guadalupe es la única zona al norte de la ciudad que cumple con esta función y que el área colindante al ANP está totalmente urbanizada (GODF, 2003).

2.1.2 Clima

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), el clima en la zona es C(wo)(w)(i'), templado subhúmedo con lluvias en verano; la precipitación media anual alcanza los 627 mm y la temperatura media anual es de 16.7°C, siendo enero el mes el más frío con 13.1°C y junio el más cálido con 18.8°C. Los vientos dominantes provienen del N y NE, entre septiembre y diciembre y febrero a marzo con una velocidad máxima de 11 km/h, además hay presencia de vientos alisios provenientes del N y vientos locales denominados brisas montaña-valle (Salinas, 1994).

La temperatura es uno de los factores que más influye en las pérdidas del agua ya sea a través de la evaporación y/o evapotranspiración vegetal. La temperatura media anual oscila entre los 12 y 16°C, mientras que las temperaturas máximas promedio anuales fluctúan entre los 20 y 26°C, presentado mayor incidencia entre los meses de abril o mayo. Las temperaturas mínimas promedio anuales varían de 2 a 10°C, con una presencia marcada durante parte del invierno (enero-febrero).

El origen de las lluvias que se reciben en la Sierra de Guadalupe, son básicamente ciclónicas y se presentan principalmente durante el verano y en menor proporción se asocian con nortes durante el invierno. Las características propias de las lluvias en cuanto a su volumen aportado, oscila entre los 600 y 700 mm anuales. En cuanto a la distribución espacial es ligeramente inferior en la

vertiente oriental de la sierra (600 mm), mientras que en la porción poniente la isoyeta registra un valor de 700 mm.

La marcha anual de las precipitaciones observa una estación lluviosa definida entre los meses de mayo a octubre durante la cual se precipita aproximadamente un 75% de la lluvia total anual, el valor máximo generalmente ocurre entre julio y agosto. En menor porcentaje existe la presencia de precipitación convectiva, la cual se forma cuando el aire húmedo ascendente se satura y se condensa al enfriarse, originando intensas lluvias en el mismo periodo. La estación seca corresponde al periodo de noviembre-abril, siendo los meses mínimos de lluvia diciembre y febrero, cuyo porcentaje de lluvia invernal es del 5 al 10% del total anual, como se puede observar en el diagrama ombrotérmico (Figura 4).

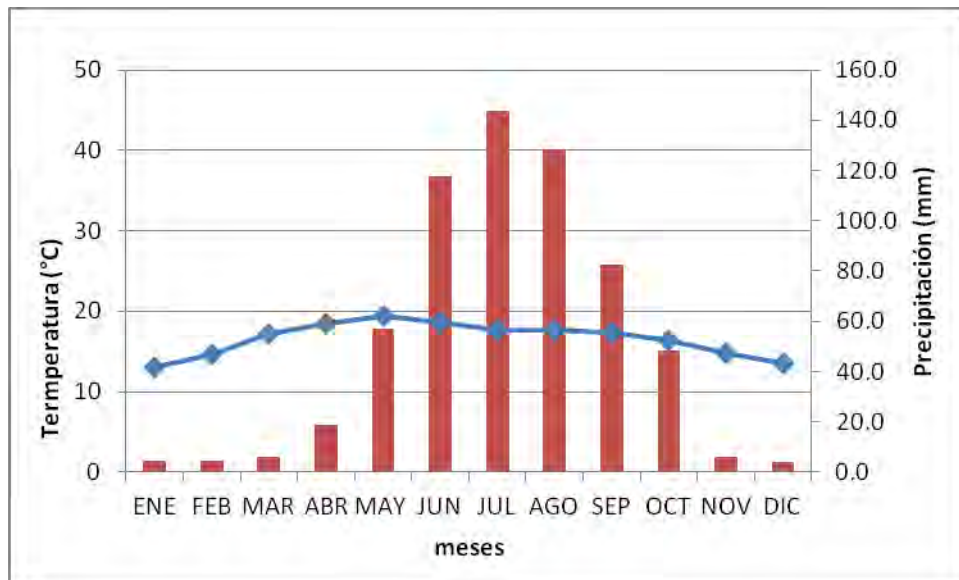


Figura 4: Diagrama ombrotérmico de la estación Cuauhtepac Barrio Bajo (periodo 1971-2000) $\sigma^2=53.7$.

2.1.3 Vegetación

El ANP se encuentra cubierta por vegetación tanto natural como introducida. Los tipos de vegetación son matorral xerófilo, bosque inducido, bosque de encino y pequeñas porciones de pastizal (Rzedowski y Rzedowski 2001).

El matorral xerófilo cubre cerca del 80% de la superficie del ANP, se distribuye en las partes bajas e intermedias de la Sierra, las especies características son el palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*), huizache (*Acacia schaffneri*), mezquite (*Prosopis laevigata*), uña de gato (*Mimosa aculeaticarpa*), yuca (*Yucca filifera*), cuajote (*Bursera fagaroides*), tuna mansa (*Opuntia streptacantha*) y nopal (*Opuntia* spp). Este tipo de vegetación es característico de la sierra y fuera de ésta, sólo se encuentra en la parte meridional de la cuenca de México (GODF, 2003).

El segundo tipo de vegetación es el bosque introducido o inducido; se distribuye en manchones irregulares, en áreas donde aún existe el matorral xerófilo. La composición de la vegetación es muy diversa, destaca la presencia de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), pino (*Pinus* spp), cedro blanco (*Cupressus lusitanica*), fresno (*Fraxinus uhdei*), casuarina (*Casuarina equisetifolia*), tejocote (*Crataegus mexicana*), durazno (*Prunus persica*) y nopal (*Opuntia* spp), entre otras (GODF, 2003).

En las cañadas con vegetación más conservada se distribuyen remanentes de encinares, predominan las especies *Quercus microphylla*, *Q. rugosa* y *Q. castanea*, mezcladas principalmente con arbustos como la trompetilla (*Bouvardia ternifolia*) y la perlilla (*Symphoricarpos microphyllus*). En la parte sur se localizan pastizales, los cuales son resultado de actividades como la ganadería y la agricultura, que provocaron la eliminación de vegetación natural y posteriormente fueron abandonados. La flora la representan 319 especies de plantas, que se agrupan en 67 familias. La familia mejor representada es Asteraceae, con 72 especies; la sigue Fabaceae con 24; y, Poaceae con 21 especies.

2.2 Estructura del trabajo

El presente trabajo aborda dos preguntas principales. La primera analiza la relación existente entre la estructura y composición del matorral de *Quercus*, y la calidad de suelos del ANP Sierra de Guadalupe, para lo cual se evaluó la calidad de suelo en los sitios de muestreo en términos de almacenes de nutrientes y

agua, y se midieron los aspectos de estructura y composición del matorral de *Quercus* como variable de respuesta a dichas condiciones de suelo.

En la segunda pregunta se analiza el efecto de los atributos del relieve sobre el establecimiento del matorral de *Quercus*. Puesto que la realidad es más compleja que los sistemas morfológicos simplificados, la localización dentro de los sitios respecto de una posición en la ladera (superficie, hombro, dorso) no es suficiente. Considerar los efectos de la geometría de la ladera, permite incluir la variabilidad de la Sierra de Guadalupe de acuerdo con esta evaluación de calidad de suelo, por lo que se midieron las siguientes variables: pendiente, forma de la ladera, la exposición y altitud en cada uno de los sitios de matorral.

Las respuestas tanto de distribución como estructurales del matorral (área basal, alturas, densidad) pueden estar determinadas por las condiciones particulares del área de estudio, para responder las preguntas de investigación, la propuesta de indicadores debe responder a los requerimientos específicos del matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe, por lo que al final se determinó la relación existente entre las variables de suelo y relieve seleccionadas con el establecimiento del matorral de *Quercus* a partir de un análisis canónico de correspondencias, el cual mediante la utilización de análisis multivariante y técnicas particulares de regresión múltiple, conjuntamente con varias formas de análisis de correspondencias, permite obtener una ordenación integrada de las especies y los datos ambientales asociados.

2.3 Trabajo de gabinete

2.3.1 Delimitación del área de estudio y selección de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se seleccionaron dentro de los límites que comprenden al ANP Sierra de Guadalupe, a partir de la interpretación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas del INEGI del año 2007 a escala 1:40,000 y recorridos en campo. Para el muestreo de campo se identificaron áreas con matorral de *Quercus* spp.

Para la selección del área de estudio se consideró la cota de los 2,400

msnm debido que, aunque el sistema montañoso de la Sierra de Guadalupe inicia desde los 2,250, el muro de conservación ecológica se sitúa a una altitud de 2,400; debajo de esta cota altitudinal se encuentran asentamientos humanos.

El muestreo se realizó en el mes de abril de 2010 (al final de la época seca). Se muestrearon nueve sitios en los cuales se llevó a cabo la evaluación de suelo, relieve y vegetación. Los sitios se distribuyeron en la parte este de la sierra como se muestra en la Figura 5.

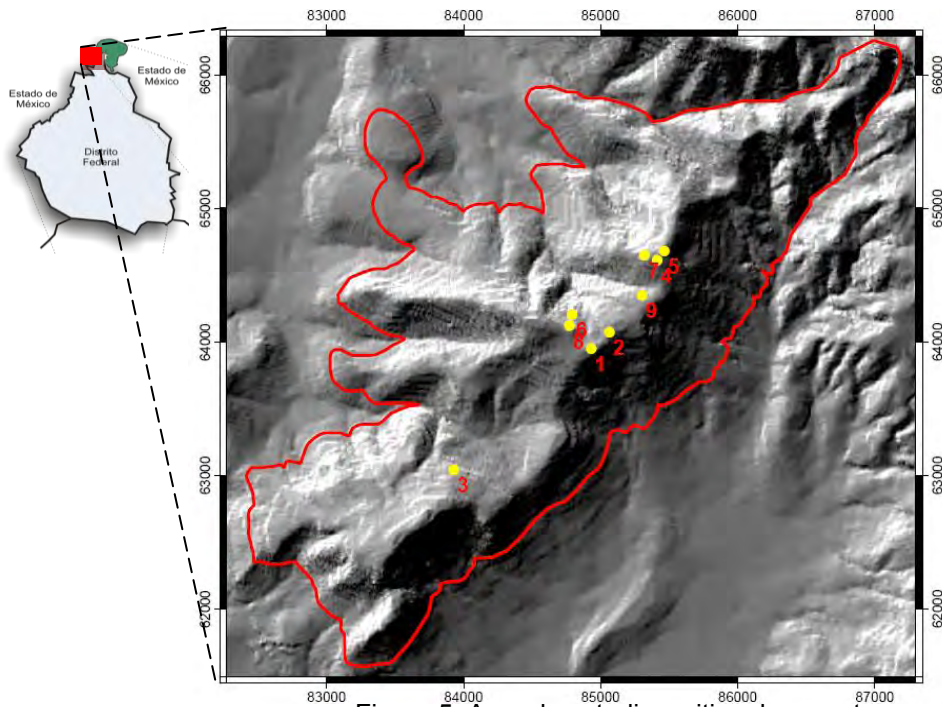


Figura 5. Área de estudio y sitios de muestreo

2.4 Caracterización del relieve en campo

El análisis de las laderas y su geometría permite conocer las condiciones que influyen el suelo y la vegetación en el contexto de estabilidad-erosión, cantidad de energía incidente y flujo hídrico determinados por las condiciones de ladera (pendiente y orientación) y los procesos geomorfológicos dominantes de forma local, por lo que en cada punto de muestreo se identificaron dichos procesos geomorfológicos (tipos de erosión, procesos gravitacionales), las características morfométricas del relieve (geometría de la porción de ladera); así como de altitud, pendiente y orientación.

2.4.2 Muestreo del suelo

En campo se evaluaron las condiciones de los suelos que son determinantes en su capacidad para mantener la vegetación, con respecto a la penetrabilidad de las raíces, de la estabilidad que presenten los suelos a la erosión y de la capacidad que tengan los suelos para retener agua y nutrientes, así como proporcionarlos en forma disponible para las plantas.

Para lo anterior se realizó la caracterización morfológica del perfil de suelo acuerdo con Vela *et al.*, (2011) y se complementó con la evaluación ecológica del perfil de suelo en campo, con base en Siebe *et al.* (2006). Una vez concluida la descripción morfo-ecológica se tomó una muestra alterada de 2 kg de suelo de cada horizonte y se colocaron en bolsas de plástico, debidamente etiquetadas, para su posterior análisis en laboratorio. Además se colectaron tres muestras inalteradas por horizonte en cilindros para determinar densidad aparente y humedad volumétrica en laboratorio.

2.4.3 Muestreo de la vegetación.

Dentro de cada unidad de muestreo se establecieron dos transectos de 25x2m (total 0.01ha), dispuestos en forma de cruz, en los cuales se obtuvo información dasométrica por especie (de acuerdo a la posterior identificación en herbario), altura (h), diámetro (d 0.10 m del suelo) y cobertura de copa (norte-sur, este-oeste). Se llevó a cabo la colecta de los especímenes para su posterior identificación en herbario. También se realizó la recopilación bibliográfica de la vegetación de la sierra de Guadalupe.

2.5 Procesamiento de las muestras de suelo en el laboratorio

En laboratorio se analizaron las propiedades físicas que reflejan cómo el suelo acepta, retiene y proporciona agua a las plantas; incluyendo condiciones que pudiesen limitar el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas y una

adecuada aireación. Las determinaciones físicas fueron; humedad volumétrica por gravimetría en muestras inalteradas tomadas con cilindros, densidad aparente por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986); la densidad real por el método del picnómetro, el porcentaje de espacio poroso (Baver *et al.*, 1980); textura por el método de la pipeta previa destrucción de la materia orgánica con H₂O₂ (Baver, 1956), color por comparación con las tablas Munsell (1994).

Entre las propiedades químicas realizadas, se encuentran aquéllas que inciden en la relación suelo-planta, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos. Entre las propiedades químicas que se determinaron se encuentra el pH en una relación suelo:agua 1:2.5 empleando un potenciómetro Corning con electrodo de vidrio, la concentración de materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) por el método de combustión en húmedo de dicromato de potasio (Walkley y Black, 1947); Nitrógeno total (Nt) por el método Kjeldahl (Rodríguez y Rodríguez, 2002) y la capacidad de intercambio catiónico (Burt, 2004), la concentración de Bases intercambiables Ca²⁺, Mg²⁺, por extracción en acetato de amonio y cuantificación por el método del versenato (Jackson, 1982). Na⁺, y K⁺ intercambiables extractadas por el mismo método y cuantificadas por flamometría utilizando un fotómetro de flama Corning 400.

2.6 Análisis de datos

2.6.1 Selección de indicadores de calidad de suelo para el matorral de *Quercus*

La selección preliminar de indicadores de calidad en los suelos parte de la identificación de variables que permitan explicar la dinámica del matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe. Para ello se realizó un análisis de componentes principales (ACP), el cual es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables) que permitió seleccionar los indicadores de calidad del suelo en concordancia con los requerimientos del matorral. Se realizó con el programa Multivariate Statistical Package (MVSP).

La clasificación de las unidades de muestreo se realizó mediante un dendrograma de similitud de presencia/ausencia (Jaccard). Para determinar el número de grupos en el dendrograma se eligió un nivel de corte que considerara un compromiso entre la pérdida de información y la simplificación de un número de unidades de vegetación interpretables desde un punto de vista natural (McCune y Grace, 2002), se realizó con el programa MVSP (*Kovach Computing Services 2011*).

Se calcularon los valores relativos de diámetro, densidad y frecuencia empleando las siguientes expresiones:

-Cobertura relativa= $(\sum \text{diámetro por especie} / \sum \text{diámetro total de individuos}) \times 100$

-Densidad relativa= $(\text{Número de individuos de una especie} / \sum \text{ todos individuos de todas las especies}) \times 100$

-Frecuencia relativa= $(\text{frecuencia de una especie} / \sum \text{ frecuencia de todas las especies}) \times 100$

-El índice de dominancia (ID) de las especies se calculó a partir de: $ID = \text{DAP relativo} + \text{Abundancia relativa}$.

Con los datos obtenidos se elaboraron dos matrices de datos para realizar el análisis canónico de correspondencias (ACC), el cual es un método de ordenación directa que constituye además un caso especial de regresión multivariada. En éste se efectúa una regresión lineal múltiple (método de mínimos cuadrados) tomando los coeficientes para las muestras como la variable dependiente y las variables ambientales como variable independiente.

En este caso la tabla de frecuencias es una tabla de ausencia/presencia en diferentes sitios de matorral de *Quercus* mientras que la otra tabla describe dichos sitios por sus características de relieve y suelo. El ACC consigue introducir las variables explicativas dentro del análisis dándoles un papel activo y explicar los datos relacionándolos con ellas. Éste se realizó con la ayuda del programa Multivariate Statistical Package (MVSP).

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CONDICIONES GENERALES DE RELIEVE Y SUELO PARA EL MATORRAL DE QUERCUS EN EL ANP SIERRA DE GUADALUPE

El matorral de *Quercus* spp., se localiza en un intervalo altitudinal entre los 2,570 y 2,700m en pendientes que van desde los 3° en superficies cumbrales, 11° en hombros de ladera y 26° en dorso de ladera. Se encuentran en relieves rectos en sentido longitudinal y convexos en sentido transversal, con exposiciones NE, NO, E y SO (Tabla 1). Lo anterior coincide con González-Elizondo *et al.* (1993), ellos reportan el matorral de *Quercus* principalmente en laderas con exposición N-NE.

La geometría de la ladera en los sitios estudiados es principalmente plana en sentido longitudinal y convexa en sentido transversal, Lugo-Hubp y Salinas-Montes (1996), mencionan que las laderas convexas en el área de estudio son las mejor conservadas en términos de erosión.

Los suelos en los que se desarrolla el matorral de *Quercus*, tienen como material parental depósitos piroclásticos y coluviales sobre materiales volcánicos de naturaleza dacítica y andesítica (Vela y Flores, 2006). Presentan una secuencia de horizontes A/R y/o A/C, de forma general, son de color pardo oscuro, su estructura es subangular en bloques gruesa que rompe a fina de grado moderado y estabilidad de moderada a mediana, densidad aparente baja y textura franco limosa (Anexo 1).

Vela y Flores (2006) indican que los suelos en la Sierra de Guadalupe se encuentran en su mayoría sobre laderas con pendientes mayores a 10%, son poco profundos y pedregosos. En el área de estudio Flores-Román *et al.* (2009), reportan Leptosoles y Phaeozems, que corresponden a suelos con desarrollo incipiente en donde las características y propiedades del suelo son atribuidas principalmente a procesos sucesivos de remoción en masa, erosión y redepositación, así como a su arreglo espacial sobre las laderas en sentido longitudinal.

Tabla 1. Características del relieve en los sitios de muestreo

Sitio	Relieve	Morfografía		Altitud msnm	Pendiente (°)	Orientación	Erosión
		Longitudinal	Transversal				
1	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Convexa	2689	3	SO 50°	Hídrica laminar leve
2	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Convexa	2678	11	NE 40°	Hídrica laminar moderada
3	Dorso de ladera media de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno (con afloramientos rocosos)	Plana	Convexa	2568	25	NE 17°	Hídrica laminar fuerte
4	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Plana	2680	13	SO 25°	Hídrica laminar moderada
5	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Convexa	2701	3	NO 5°	Hídrica laminar leve
6	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Plana	2703	4	E	Hídrica laminar leve
7	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Convexa	2685	10	NE 85°	Hídrica laminar leve
8	Dorso de ladera media de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno (con afloramientos rocosos)	Plana	Plana	2679	26°	NO 74°	Hídrica laminar moderada
9	Dorso de ladera media de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	Plana	Plana	2654	20	NO 8°	Hídrica laminar leve

Tienen una alta porosidad, presentan un buen drenaje, una capacidad de aireación de media a alta, una alta capacidad de retención de agua disponible en el sitio dos (hombro de ladera), baja en el sitio tres (dorso de ladera) y muy baja en los sitios restantes, el comportamiento es el mismo respecto de la capacidad de campo. El espacio radicular efectivo y la profundidad fisiológica están entre 15 y 45 cm, siendo más someros en superficie cumbral y dorso de ladera, tienen como principal limitante la presencia de rocas tanto en el perfil como en superficie (Anexo 1).

El pH es moderadamente ácido, los porcentajes de materia orgánica y carbono orgánico son altos, la disponibilidad de nitrógeno va de baja a media, la capacidad de intercambio catiónico es mediana, con una alta saturación de bases

en la cual el complejo de intercambio está dominado por Ca^{2+} . Lo anterior coincide con lo reportado por Vela y Flores (2006) y Flores-Román *et al.* (2009); ellos encontraron en el área de estudio suelos ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, con un valor alto de capacidad de intercambio catiónico saturada con Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Tener una saturación de cationes Ca^{2+} es importante ya que de acuerdo con Brady (1990) el catión que domina en el complejo de intercambio tiene una marcada influencia en las propiedades del suelo, como puede ser su acción como floculante, lo que cobra importancia contra la erosión ya que la mayoría de los sitios en los que se presenta el matorral de *Quercus* están sobre laderas de hasta 25°.

Los pH encontrados (5.4-7.0) resultan ser adecuados para la actividad biológica, tanto de hongos como de bacterias así como para la disponibilidad de elementos esenciales como N, Ca, Mg, P, K y S (Brady, 1990), aunado a que tienen buena aireación y bajo condiciones adecuadas de humedad y con disponibilidad de hojarasca, se pueden dar favorablemente los procesos de mineralización de la M.O.

3.2 Selección preliminar de indicadores

No todos los factores antes mencionados, necesariamente son indicadores de la calidad de un suelo para el establecimiento del matorral de *Quercus*. Para identificarlos se realizó una selección preliminar de las variables que se muestran en la Tabla Anexo 3.

Se consideró adecuado trabajar con los logaritmos de dichas variables, esta es una transformación habitual para pasar este tipo de medidas de una escala multiplicativa a una escala aditiva. Esta transformación no sólo elimina el efecto de distintas escalas de medida, sino que también reduce la influencia de los valores grandes (Greenacre, 2008).

Posteriormente se realizó una prueba de esfericidad de Bartlett (Tabla 2), la cual comprueba si la matriz de correlaciones es una matriz de identidad. Se

buscan valores elevados del test con significancia inferior a 0.05. Esta prueba dio como resultado una Ji-cuadrada de 202.513, con unos 171 grados de libertad y una significancia de 0.00, el nivel de significancia con este valor indica que los datos poseen las características apropiadas para la realización de un análisis factorial.

Tabla 2. Prueba de esfericidad de Bartlett:	
Ji-cuadrada	202.513
GDL	171
p-valor	0.00
Alfa	0.05

Dado que las variables que integran los datos se encuentran correlacionadas, el análisis de componentes principales sintetizó los mismos para la selección preliminar de indicadores. En la Figura 6 se observa que la selección de tres componentes parece ser adecuada, ya que a partir del quinto eje no es muy pronunciada la pendiente de la representación gráfica de los autovalores ni la de varianza explicada, estos factores explican un 66.27% de la varianza total.

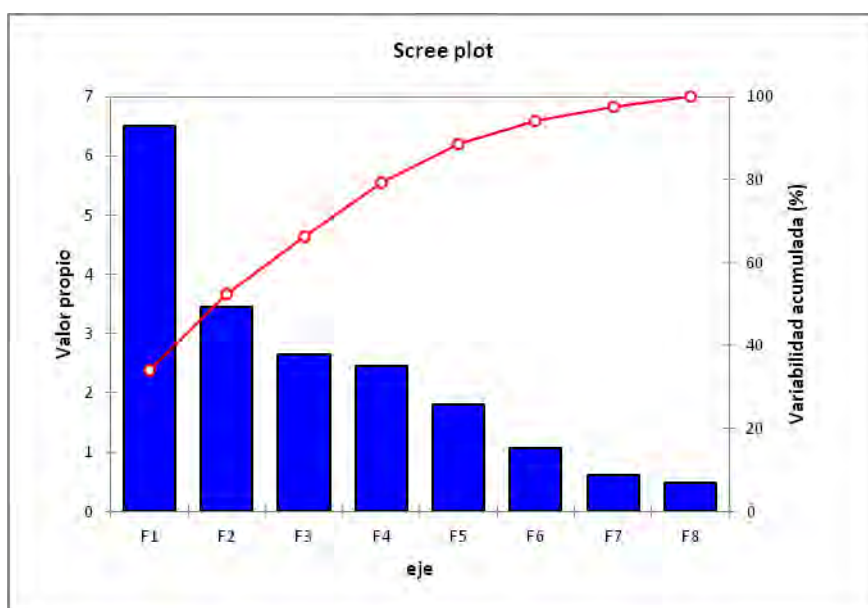


Figura 6. Gráfico de sedimentación para la selección de factores

Una vez decidido el número de factores, se les asignó a las correlaciones o

conjunto de variables que se formaron, un nombre que define aquello por lo cual resultaron relacionadas en función de las cargas de cada variable para cada uno de los factores originados (Tabla 3), de modo que las variables con cargas más altas en un factor, nos indica una correlación entre la variable y ese factor.

Tabla 3 Carga factorial ACP

	F1	F2	F3
Volumen suelo	>0.906	0.088	0.193
Prof. Fis	0.839	-0.024	0.282
M.O.	-0.818	-0.216	-0.008
dCC	0.792	-0.387	0.261
dCC:evapo	0.792	-0.387	0.261
%pedras	-0.752	0.238	-0.166
CA	-0.689	-0.626	-0.281
Pendiente	0.674	0.312	-0.082
Altitud	-0.582	0.123	0.402
Ca:Mg	-0.535	-0.085	0.587
pH	0.545	0.61	0.139
C:N	-0.531	-0.153	>0.610
evapo:preci	0.341	-0.218	-0.486
Humedad	0.300	-0.670	-0.281
Poros	0.276	-0.756	0.348
Arcillas	0.230	-0.420	-0.602
Ca:K	0.086	0.503	0.364
D.a.	0.082	>0.787	-0.434
CIC	0.002	0.072	-0.52

El componente número uno (Tabla 3) es el volumen del suelo, en este se agrupan las variables relacionadas con este factor, las variables con mayor carga factorial son la profundidad fisiológica, la capacidad de retención de agua y su relación con la evapotranspiración, el porcentaje de piedras en el perfil y la capacidad de aireación y la pendiente. Este primer componente manifiesta como los factores incluidos regulan la capacidad de retención de agua de estos suelos para el matorral, ya que al aumentar la profundidad fisiológica, con una disminución del porcentaje de piedras, aumentará el volumen del suelo y con esto, el espesor en el suelo en el que pueden penetrar y desarrollarse las raíces (Siebe *et al.*, 2006). En el caso contrario, si disminuye la profundidad y aumenta el volumen de piedras, disminuirá el soporte así como el almacén de agua y nutrimentos para el matorral.

El componente número dos es la densidad aparente, en este se agrupa el volumen total de poros, la humedad, y la capacidad de aireación, factores que influyen sobre la capacidad de absorción y circulación del agua. Valores

adecuados en estas variables permiten una capacidad de infiltración grande y de percolación media, el suelo será lo suficiente coherente para dar a las raíces soporte adecuado, pero sin ser tan denso que impida su desarrollo. Una adecuada aireación actúa químicamente, ya que el aire del suelo es rico en CO₂, este se equilibra con la solución del suelo y ayuda a la solubilización del Ca, el cual favorece la agregación (Fassbender y Bornemisa, 1994). El efecto de la aireación del suelo en el crecimiento de las plantas puede dividirse, en general, en dos categorías: a) El efecto sobre los constituyentes del suelo, que a su vez, influyen en el crecimiento; y b) El efecto directo en las condiciones fisiológicas de las plantas (Gavande, 1982), principalmente en las raíces (Gobat *et al.*, 2004). En este factor se encuentra al pH con una carga factorial alta. Las variaciones en el pH influyen en la solubilidad y distribución de los iones importantes para la nutrición vegetal en el corto plazo (solución del suelo), en el mediano plazo (complejo de intercambio) y en el largo plazo (Gobat *et al.*, 2004).

El tercer componente se asocia a los nutrimentos ya que en éste, las variables de mayor carga factorial son la relación carbono-nitrógeno, la relación calcio-magnesio y la cantidad de arcillas. Los aspectos antes mencionados, inciden en la relación suelo-planta; la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos en este caso para el matorral de *Quercus*.

En este tercer componente, la variable de mayor carga factorial es la relación C:N. Esta relación puede ser considerada un buen indicador de calidad (Gobat *et al.*, 2004) ya que indica la calidad de la hojarasca, de la resistencia de esta última a la degradación biogeoquímica y de los organismos, es un primer estimador de la disponibilidad de Nitrógeno (N); éste es de gran importancia para las plantas, las que absorben nitrato y amonio que utilizan en la síntesis de proteínas, la clorofila (importante en la fotosíntesis) y otros compuestos orgánicos (Fassbender y Bornemisa, 1994). Cerca del 95% del N total (Nt) en el suelo, se encuentra estrechamente relacionado con la materia orgánica del suelo (Schnitzer y Khan, 1978). El Ca²⁺ y en menor grado el Mg²⁺, inducen la floculación de la arcilla y al mismo tiempo son importantes en la nutrición y en proporcionar al suelo

una reacción favorable para el crecimiento de raíces y microorganismos (Gavande, 1982), la proporción entre los cationes es importante ya que el antagonismo entre cationes pueden modificar su asimilación como es en el caso de la relación Ca:Mg menor de 3 puede manifestar posibles limitaciones de fósforo y deficiencia de Ca^{2+} (Gobat *et al.*, 2004).

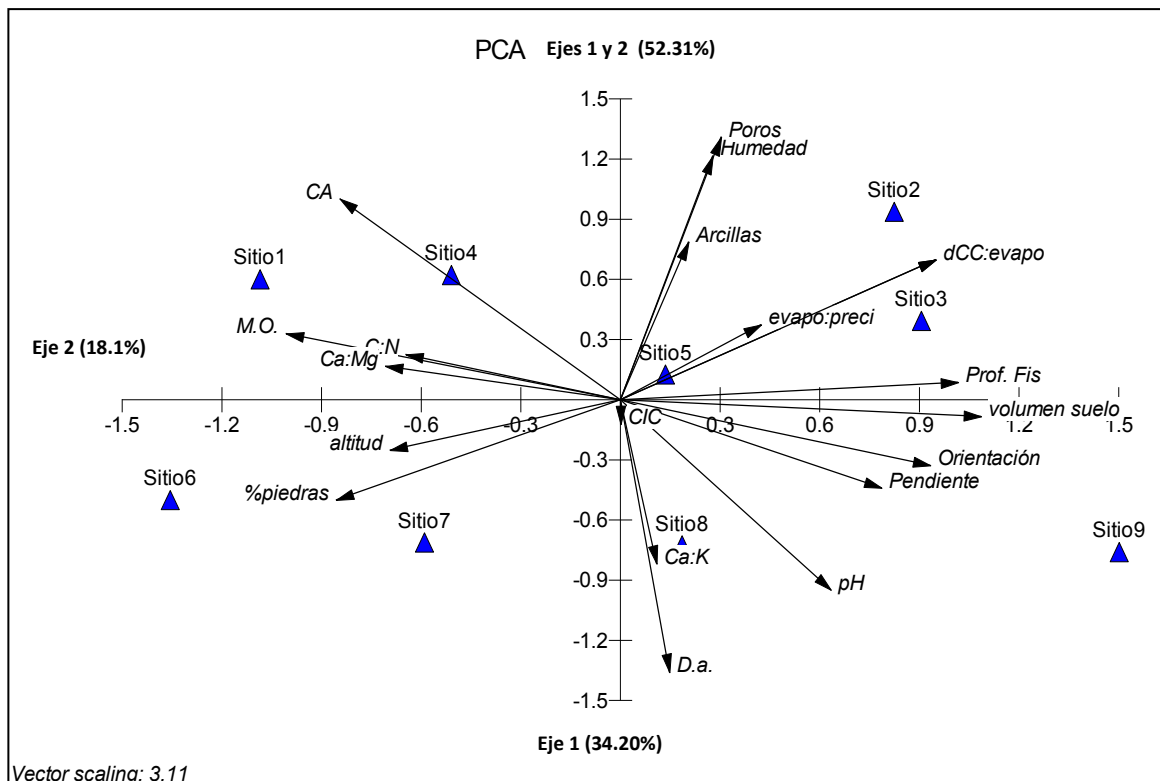


Figura 7. Biplot de correlación

La selección de componentes se realizó con base en varios criterios, generalmente se seleccionan las variables que desde cada eje expliquen la mayor parte de la varianza, en este caso la varianza explicada llega a ser del más del 88% sólo después del sexto eje por lo que en éste ya están incluidas todas las variables del análisis, por lo que además se consideró la carga factorial de cada variable (tabla 3), esto permite evaluar la contribución de las variables a la inercia recogida a lo largo de una dirección, que contribuye a la medida de la importancia de dicha variable, para lo cual se consideraron los valores de carga mayores a 0.6 de los tres primeros ejes que es donde se tiene el 66.27% de varianza explicada (figura 7).

Finalmente se consideraron los cosenos cuadrados de las variables (tabla 4), el coseno cuadrado es una medida de la importancia de esa dirección para explicar la inercia de la variable. En otras palabras, si una variable presenta un reducido coseno cuadrado respecto a una dirección del espacio, eso significa que no podemos afirmar nada acerca de su verdadera posición en el espacio viendo su coordenada en dicha dirección, ya que su inercia queda explicada en otras direcciones distintas de la que se está considerando.

Tabla 4. Cosenos cuadrados de las variables:

	F1	F2	F3
volumen			
suelo*	0.821	0.008	0.037
Prof. Fis*	0.704	0.001	0.080
M.O*	0.669	0.047	0.000
dCC*	0.628	0.150	0.068
dCC:evapo*	0.628	0.150	0.068
%piedras*	0.566	0.057	0.027
CA*	0.474	0.392	0.079
Pendiente*	0.455	0.097	0.007
Altitud	0.339	0.015	0.162
pH	0.297	0.372	0.019
Ca:Mg*	0.286	0.007	0.345
C:N*	0.282	0.023	0.372
evapo:preci	0.117	0.047	0.236
Humedad*	0.090	0.449	0.079
Poros*	0.076	0.571	0.121
Arcillas*	0.053	0.177	0.362
D.a.*	0.007	0.619	0.188
Ca:K	0.007	0.253	0.133
CIC	0.000	0.005	0.271

*Los valores en negrita corresponden, en cada factor, la variable para la cual el coseno cuadrado es mayor

3.3.1 Clasificación de la vegetación

Se identificaron tres especies de *Quercus* en el área de estudio. En dorso de ladera (sitio 3) que presenta exposición NE, se encontraron las especies *Quercus frutex* y *Q. mexicana*, en este sitio se encuentran los matorrales que presentan mayores diámetros y coberturas, en contraste las plantas con menor diámetro, alturas y coberturas se encuentran en el sitio 4 (hombro de ladera) que presenta orientación SW donde se encontraron las especies *Q. frutex* y *Q. deserticola*, la especie mejor representada de este género fue *Q. frutex* al encontrarse en todos los sitios.

Especie	Sitios
<i>Quercus frutex</i> Trel.	1-9.
<i>Quercus mexicana</i> Trel.	3,8,9.
<i>Quercus deserticola</i> Trel.	4,9.

En general, el matorral de *Quercus* se presenta en forma de pequeños manchones de entre. Son comunidades arbustivas densas, generalmente más o menos caducifolias que se reproducen vegetativamente en el subsuelo formando clones que a veces abarcan superficies de varios metros de diámetro (Rzedowski, 2006).

Se incluyeron las especies de matorral de *Quercus* mediante la presencia-ausencia para los nueve sitios de muestreo. En el dendrograma (cluster) se muestran las relaciones jerárquicas entre los sitios de muestreo. Las unidades de muestreo determinaron 3 grupos diferentes (Figura 8).

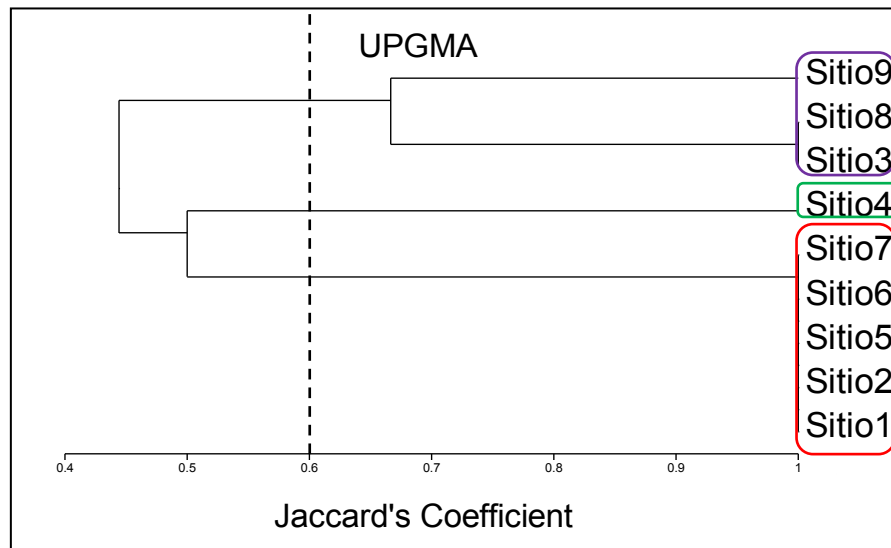


Figura 8. Dendrograma de similitud de presencia/ausencia (Jaccard)

Grupo 1 (*Q. frutex*)

En la Figura 9 se observa que en el grupo formado por los sitios 1, 2, 5, 6 y 7, presentan una afinidad del 100%, debido a que corresponde a los sitios donde sólo se encontró *Q. frutex*, en términos de relieve a sitios 1, (48 ind/100m²), 5 (40 ind/100m²) y 6 (54 ind/100m²) corresponden a la superficie cumbral de ladera, los sitios 2 (42 ind/100m²) y 7 (22 ind/100m²) están sobre el hombro de ladera.

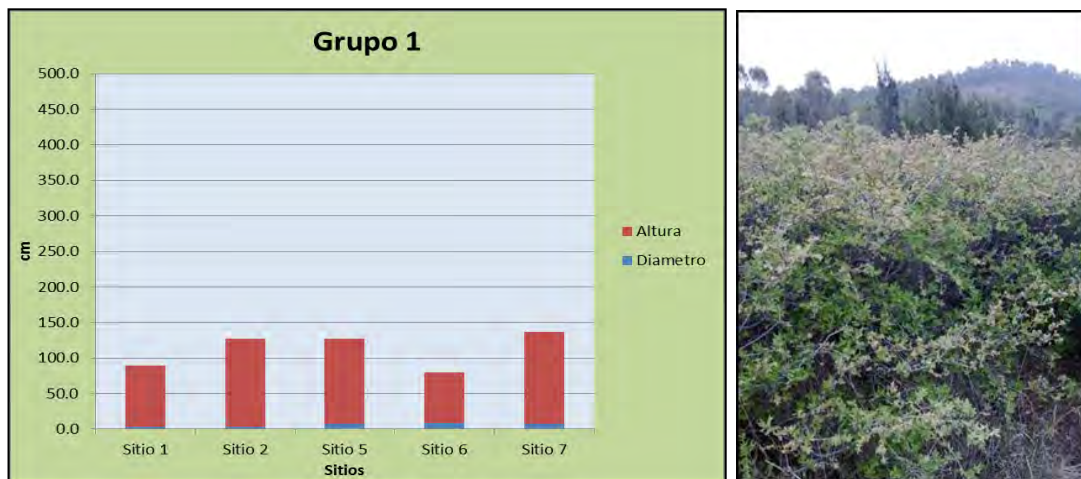


Figura 9 Características dasométricas grupo 1

Grupo 2 (*Q. frutex-Q. mexicana*)

Este grupo presenta las tres especies de *Quercus* identificadas en el matorral; éstas son *Q. frutex*, *Q. mexicana* y *Q. deserticola*, formado por los sitios 3 que presenta *Q. frutex* (18 ind/100m²) *Q. mexicana* (4 ind/100m²); 8 con *Q. frutex* (26 ind/100m²), *Q. mexicana* (10 ind/100m²), en términos de composición, el sitio 9 estuvo compuesto por las tres especies del matorral y presentó un mayor número de individuos *Q. frutex* (30 ind/100m²) *Q. mexicana* (8 ind/100m²) *Q. deserticola* (6 ind/100m²) (Figura 10).

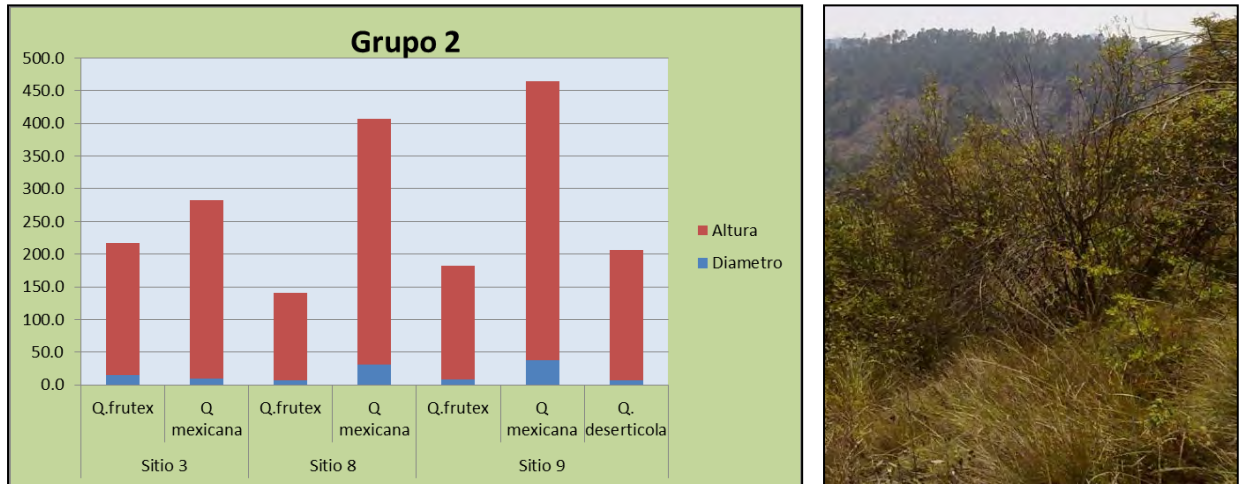


Figura 10 Características dasométricas grupo 2

Sitio 4 (*Q. frutex*-*Q. deserticola*)

El sitio 4 no está agrupado, en éste se encuentra *Q. frutex* (48 ind/100m²) y *Q. deserticola* (18 ind/100m²) (figura11).

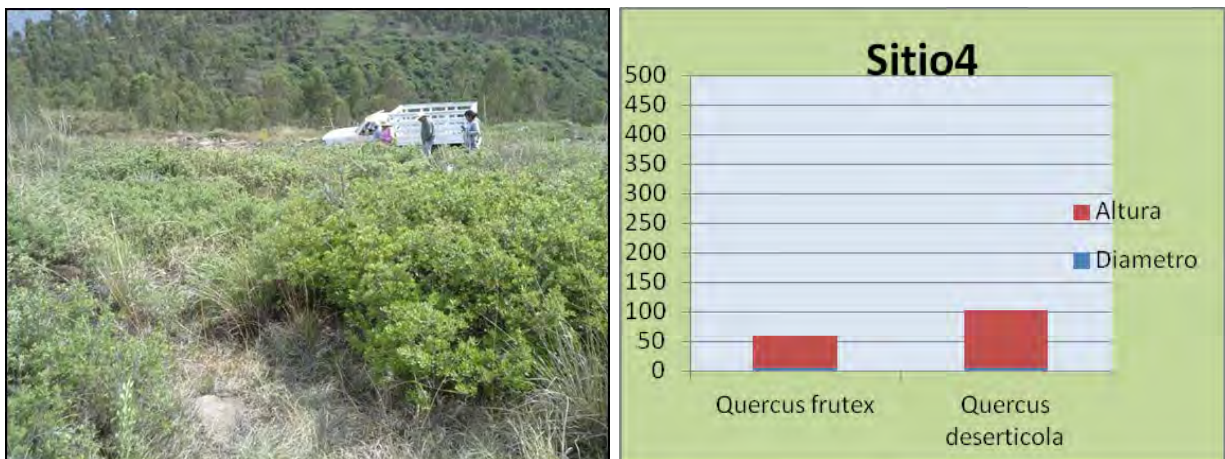


Figura 11. Características dasométricas sitio 4

El intervalo altitudinal (2568-2703m) en el cual se encontró el matorral de *Quercus* en el área de estudio corresponde con lo reportado por González-Elizondo *et al.* (1993), Valencia (2004), Torres-Soria (2001) y Romero *et al.* (2002) principalmente para *Q. frutex*.

También la exposición coincide con lo reportado por González-Elizondo *et al.* (1993) respecto del establecimiento del matorral principalmente en laderas exposición N-NE. La orientación interviene en el número de horas que la ladera recibe radiación solar, por ello es importante en el análisis de los procesos de erosión, además permite explicar las diferencias en la temperatura y humedad del suelo y de la cobertura vegetal (García-Flores, 2008).

Las unidades naturales con mayor insolación son generalmente las orientadas al S, por lo que sus superficies tienden a ser más secas y por lo tanto el desarrollo de la vegetación se ve menos favorecido en comparación con aquellas unidades naturales expuestas al N, en donde la irradiación es menor en tiempo e intensidad, siendo éstas las que conservan mayor humedad y por lo tanto la vegetación está más desarrollada (García-Flores, 2008). Por lo que bajo condiciones de escasa precipitación como sucede en la sierra de Guadalupe, González-Elizondo *et al.* (1993) explican que las diferencias en parámetros estructurales (DAP, distribución de frecuencias), y comportamiento hídrico de las especies dominantes podrían estar fuertemente influidas por la exposición de ladera y su influencia en la temperatura, y cantidad de agua en el suelo, por lo que González-Hidalgo *et al.* (1996), remarcan que el efecto de la orientación de ladera sobre el crecimiento del matorral de *Quercus* puede ser clave en el desencadenamiento del crecimiento vegetal por lo que debería calificarse este efecto como un carácter selectivo en el tiempo.

Otro aspecto importante en el establecimiento de este matorral fue la geometría de la ladera, de acuerdo con Lugo-Hubp y Salinas-Montes (1996), las laderas cóncavas son las formas dominantes en la sierra, son las más erosionadas o por lo menos más susceptibles a erosión. En este trabajo, los sitios en los que se encontró el matorral principalmente presentaron geometría convexa.

Además del efecto observado por las variaciones en el relieve, las propiedades de los suelos tienen profundos efectos sobre el matorral, como puede ser la tasa de crecimiento de las raíces y en su desarrollo y, hasta un grado considerable, sobre el tipo y extensión de los sistemas radicales de las especies establecidas (Pritchett, 1986).

Para el primer componente resultante del ACP (volumen del suelo), se observa que el matorral de *Quercus* del área de estudio está ampliamente adaptado a condiciones de escasa profundidad fisiológica del suelo como se observa en los sitios 1, 4, 6 y 7, donde los suelos tienen una profundidad de 15 cm, de manera similar en el sitio 5, a pesar de que tiene una profundidad ligeramente mayor (23 cm), la presencia de rocas en el perfil disminuye el volumen útil de suelo. Se observa que la condición derivada del escaso volumen de suelo aprovechable, está teniendo influencia en el matorral. Primeramente, estos sitios presentan los suelos donde el volumen de suelo es menor y como resultado tienen una menor retención de agua (Anexo 2), en estos sitios solo se encontró *Q. frutex* y por su similitud, fueron ubicados en el grupo 1. En este primer grupo se encontraron los menores diámetros y alturas para el matorral en el área de estudio (figura 9), incluso el sitio que tuvo menor suelo aprovechable (Sitio 6) presentó la menor altura de este grupo.

Se observó una relación de la presencia de *Q. frutex* en el grupo 1 con la posición en la ladera, estos sitios corresponden a superficies cumbrales y hombros de ladera. Parece que la menor talla (diámetro y altura) en estos puntos es como resultado de una respuesta funcional a la baja retención de agua de estos sitios, ya que a pesar de esto, este grupo presentó la mayor densidad relativa del área de estudio.

Variaciones respecto de la densidad relativa del matorral como las que se observan en esta investigación, podrían ser resultado de un estrés fisiológico resultante de la disminución en la reserva de agua en el suelo. Este agente puede estar asociado a la declinación y muerte de encinos, tal y como lo reportan Alvarado-Rosales *et al.* (2007) para el centro-oeste de México. Marañón *et al.* (2005), reportan que en el invernadero los niveles más altos de luz y de agua determinan una mayor biomasa de las plántulas, pero en condiciones de reservas bajas de agua, como las que se presentan en los sitios el Grupo 1, la capacidad de respuesta de las plántulas a las condiciones cambiantes del medio puede actuar como un mecanismo para sobrevivir ante un ambiente variable (Harper 1977 citado por Quero *et al.*, 2008). Esto puede ser explicado por los resultados

reportados por Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo (2004). Ellos reportan que en la Sierra de Guadalupe, en la exposición sur-suroeste se presentan condiciones desfavorables para las plantaciones como resultado de los efectos que tiene ésta sobre la retención de agua disponible para la vegetación, resultando en una disminución global de biomasa, menores diámetros y alturas promedio y modales.

Por el contrario, los sitios 3, 8, 9 son los sitios donde se llega a presentar el mayor volumen de suelo aprovechable, por su similitud, ubicados en el Grupo 2, este grupo se caracteriza por tener los suelos de mayor espesor en el que pueden penetrar y desarrollarse las raíces, así como una mayor retención de agua. Aunado a lo anterior, la exposición de estos sitios es hacia el norte, situación que favorece un mayor almacenamiento y aprovechamiento del agua, condición que permite la mayor acumulación de biomasa expresada en un mayor diámetro y altura de los *Q. frutex*. Lo anterior coincide con lo reportado por Luna-Cruz (2008), que encontró mayores diámetros y alturas para *Q. frutex* en sitios donde la profundidad del suelo es mayor. Lo anterior permite también el establecimiento de *Q. mexicana*, especie que sólo se encontró en dorsos de ladera y *Q. desertícola*, que se encontró en dorso y en hombro de ladera, aunque el mayor diámetro y altura se presentó en dorso de ladera.

En general, para las tres especies encontradas, los mayores diámetros y alturas se encontraron en el sitio 9, el cual parece presentar sinergia determinada por un mayor volumen de suelo y retención de agua con la posición en la ladera y la orientación, ya que, aunque presenta condiciones similares de suelo con el sitio 2, este último se encuentra en un hombro de ladera con una pendiente de 11° y, aunque está en dirección norte, no permite un aprovechamiento óptimo del agua en este sitio por la irradiación, razón por la cual probablemente sólo se encuentra *Q. frutex* en el sitio 2.

3.3.1 Recopilación bibliográfica de la vegetación de la sierra de Guadalupe

En la Sierra de Guadalupe, la deforestación para la obtención de leña como combustible y para la obtención de superficies para la agricultura, ha existido

desde la época prehispánica, siendo intensa en el siglo II a.C. (Boop, 1956; Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996). Debido a lo anterior, la influencia de la actividad humana sobre las laderas de la sierra, tuvo un efecto destructivo sobre vegetación original, además de la introducción de plantas exóticas. A continuación se presenta lo encontrado en la sierra en términos de vegetación para tres periodos 1914, 1939 y 1956.

Reiche (1914), realizó el estudio de la vegetación en los alrededores de la capital de México, particularmente en la Sierra de Guadalupe. Encontró árboles como *Schinus molle* y arbustos como *Montanoa tomentosa*, *Zaluzania augusta*, *Jatropha spathulata*, *Buddleja verticinata*, *Pisonia hirtella*, *Brongniartia sericea*, *Mimosa acanthocarpa*, algunas especies de *Bursera cuneata*, *B. fagaroides*, las opuntias *O. imbricata*, *O. tunicata*, *Mammillaria centricirra* y *M. rhodantha*, *Echinocactus corniger* y *E. Crispatus*, además de Agaves de hojas gruesas; hacía la cúspide *A. filifera*. Matas subleñosas como *Salvia grahami*, *Plumbago pulchella*, *Piqueria trinervia*, *Castilleja tenuiflora*, *Lobelia fenestralis*, *Senecio peltiferus*, etc. Especies herbáceas como: *Oxalis divergens*, *Tradescantia pulchella*, *Ipomea costellata*, *Buchnera elongata*, *Tagetes micrantha*, *T. peduncularis*, *Justicia furcata*, *Calochortus flavus*, *Milla biflora*, *Cuphea wrightii*, *Bidens leucantha*, *Peperomia umbilicata*, *Ipomoea stans*, *Zinnia multiflora*, *Silene laciniata*, *Stevia micrantha*, *Physalis aequata*, *Cosmos bipinnatus*, *C. parviflorus*, *San vitalia procumbens*, *Begonia gracilis*, *Guilleminia illecebroides*, *Gomphrena decumbens*, etc. Encontró en la cumbre matorral de *Zaluzania augusta*, adornado por *Epicampres Berlandieri*; entre piedras grandes *Stachys coccínea*, *Tillandsia beuthamiana*, además de otra *Nolina*. En parajes pedregosos predomina *Nolina*, *Prionosciadium mexicanum* y *P. multifidum*. Más hacia el este, *Schinus molle*, *Eysenhardtia amorphoides* (*Eysenhardtia polystachya*), *Mimosa uncifera*, *Bursera cuneata*, *Zaluzania augusta*; arbustos de *Verbesina*, *Stevia* y *Eupatorium*.

Agustina-Batalla y Ramírez-Cantu (1939) en su contribución al estudio florístico del valle de México, realizaron el estudio cualitativo de las sinecias en la Sierra de Guadalupe, particularmente en los cerros: Gachupines, Guerrero, Chiquihuite, Santa Isabel y Ticomán, en los cuales encontraron que las especies

vegetales que integran las principales agrupaciones botánicas se repiten en pequeños grupos por toda la región, integrados por asociaciones de *Parthenium hysterophorus*, *Malva parviflora* y *Gossypianthus rigidiflorus*, *Mirabilis jalapa*, *Bouvardia triphylla* y *Eupatorium calaminthaefolium*. Observaron grupos de *Schinus molle* de forma achaparrada, *Panicum caespitosum* con gran desarrollo en extensión y que se encuentra formando una especie de fondo a las sinecias que constituyen la flora de esta región, caracterizada por grupos de *Malva parviflora*, *Parthenium hysterophorus*, *Comphrena nitida*, *Bouchea ehrenbergii*, *Physalis sórdida*, entre otros.

Al ascender entre las rocas, se observan grupos de *Boerhavia viscosa* asociada con *Eupatorium calaminthae folium* que presenta las hojas muy plegadas; en la parte correspondiente a la falda *Panicum caespitosum*, asociada con *Bouteloua bromides* y destaca *Tecoma stans*.

En la parte superior, la vegetación es escasa, observándose grupos aislados de *Oxalis* de diversas especies, *Sphaeralcea angustifolia* y *Gomphrena decumbens*, se podía encontrar cúmulos de *Brogniartia intermedia* asociada con *Mirabilis jalapa*; *Bouvardia triphylla*, que en ocasiones se asocia con *Acalypha langiana* y *Eupatorium calamintha folium*.

En las fisuras se observan Labiadas del género *Salvia*, relacionadas con *Plumbago scandens*; bignoniáceas del género *Tecoma* y, en la parte más baja, asociaciones de *Notholaena sinuata*, *Linum longipes*, *Commelina coelestis* e *Ipomea heterophylla*. En el lado occidental se observa vegetación Casmoftica (Vegetación formada por plantas cuyas raíces crecen las grietas de las rocas); las rocas están cubiertas de Crasuláceas del género *Cotyledon*; *Polypodium thyssanolepis* en las grietas de rocas. En la parte baja del cerro se encuentra *Echinocereus cinerascens*, además de *Rhaphanus raphanistrum*.

Por su parte, Bopp (1956) menciona que en tiempos más húmedos, las laderas del área de estudio pudieron estar cubiertas por bosque de pino y encino, como resultado de la perturbación e introducción de especies exóticas que encontraron un ambiente propicio para su desarrollo, como es el caso de *Ricinus communis*, *Cosmos bipinnatus*, *Jatropha snathulata*, una planta más bien de clima

tropical. Otras familias tropicales aclimatadas encontradas fueron Bignonaceas, Malpigiaceae y Sapindaceae. Además de *Schinus molle* con *Senecio praecox*, este último como dominante en los cerros de la sierra junto con otros como *Opuntia imbricata*, *O. lasincatha*, *O. hyptiacantha*, *Agave filifera*, *Eysenhardtia amorfoides*, *Acacia filicoides*, *Mimosa biuncifera*, *Prosopis juliflora*, *Eriocoma tomentosa*, *Senecio salignus*, *Pisonia hirtella*, *Steyia*, *Tecoma Stans*.

En general se encuentran especies características de pastizales, matorrales, sitios abiertos y perturbados (Vibrans, 2009). Boop señala que el pastoreo excesivo y los asentamientos humanos son escenarios que permitieron el establecimiento de plantas ruderales como: *Plumbago pulchella*, *Commelina coelestis*, *Zaluzania augusta*, *Oxalis divergens*, *O. stipulata*, *Tagetes micrantha*, *T. peduncularis*, *Salvia grahami*, *S. amarissima*, *S. hirsuta*, que invaden una gran extensión de los cerros de la sierra [encontradas también por Reiche (1914) y Agustina-Batalla y Ramírez-Cantu (1939)].

3.4 Selección de indicadores

Se realizó la ordenación de la vegetación, para evaluar la relación que tienen las variables seleccionadas con el establecimiento del matorral de *Quercus*. Se trata de organizar la presencia de las especies del matorral a lo largo de las variaciones en la calidad de suelo que presenta el ANP Sierra de Guadalupe, e identificar las variables ambientales de mayor correlación con los ejes.

En el análisis se incluyeron las 15 variables de tipo cuantitativo resultantes del análisis de componentes principales. Dentro del análisis canónico de correspondencia inicialmente se realizó una discriminación de variables mediante una prueba de colinealidad (Tabla 5).

Tabla 5. Resumen del análisis de prueba de colinealidad

Variable	Media ponderada	Desviación estándar ponderada	Factor de inflación	
Prof. Fis	0.191	1.062	0	***
Humedad	0.097	1.017	2.481	
Poros	-0.088	0.857	1.625	
CA	-0.289	1.125	0	***
dCC	0.087	0.894	0	***
Pendiente	0.336	0.975	10.366	
pH	0.37	1.136	13.155	
M.O.	-0.229	1.105	0	***
C:N	-0.227	0.948	3.282	
Ca:Mg	-0.121	0.94	4.504	
%piedras	-0.19	0.843	0	***
volumen suelo	0.272	1.123	3.383	
evapo:preci	0.101	1.113	6.951	
dCC:evapo	0.087	0.894	0	***
Orientación	0.345	0.702	0	***

*** Multicolinealidad detectada, variables ignoradas en el análisis ACC

Del resultante de la prueba de multicolinealidad se realizó el análisis canónico de correspondencias (ACC). El porcentaje de la inercia total recogida es del 100%, el ACC presenta un espacio restringido (o espacio canónico) de 0.54, el 86% de la inercia total, es decir hay mas inercia en el espacio restringido que en el espacio no restringido, lo que permite explicar que las dimensiones del ACC dan correlaciones altas con las variables seleccionadas (Greenacre, 2008).

Tabla 6. Descomposición de la Inercia

	Valor	%
Total	0.620	100.000
Restringida	0.540	86.981
No-restringida	0.081	13.019

En la Tabla 7 se muestran los eigenvalores para los dos ejes de ordenación, estos indican el grado de significancia entre las especies de matorral a lo largo de los ejes de variación e identifican las variables ambientales de mayor correlación con los mismos ejes. El primer eje absorbe una varianza del 49.36%, y el segundo eje un 37.61% con una acumulado de 86.98% de la varianza explicada, por lo que se considera que la interpretación de los dos primeros ejes factoriales es razonable para explicar las correspondencias entre las variables y la especies en los diferentes sitios.

Tabla 7. Resumen del análisis de correspondencia canónica, correlación entre especies y variables ambientales en relación a los ejes de ordenación.

	Eje 1	Eje 2
Eigenvalores (o valores propios)	0.306	0.233
Correlación especies-factores Ambientales	0.980	0.870
Varianza explicada (%)	49.369	37.612
Varianza acumulada (%)	49.369	86.981

La especie con la correlación más baja es *Q. deserticola*, ya que no se presenta en todos los sitios, sólo en los sitios 4 y 9, por lo que se encuentra alejada del centro de ejes de ordenación. De acuerdo con Ortiz-López (2008), mientras más cercano se encuentren ubicadas las especies en el centro de ejes de ordenación, indica que éstas tienen una mayor correlación. Por lo que *Q. mexicana* y *Q. frutex* presentan una mayor correlación con los ejes de ordenación, como se observa de forma gráfica en la tabla 8 y la figura 11.

Tabla 8 Coordinadas principales de las especies en el ACC

	Eje1	Eje2
<i>Q. frutex</i>	-0.394	-0.108
<i>Q. deserticola</i>	0.369	1.139
<i>Q. mexicana</i>	0.935	-0.436

Los valores de correlación entre las variables ambientales y los ejes de ordenación se presentan en la tabla 9, en el primer eje las variables con mayor correlación son: la pendiente (0.922), el pH (0.772), el volumen de suelo (0.542) y la relación carbono nitrógeno (0.442), la relación Ca:Mg (0.375) y la relación evapotranspiración-precipitación (0.357). Para el segundo eje se tiene a la relación C:N como la variable con mayor correlación (0.516), seguido de la relación evapotranspiración-precipitación (0.414), y el porcentaje de poros (0.318). De forma principal se tiene a la pendiente como al factor principal que indica a la distribución de las especies.

Tabla 9. Correlación entre variables ambientales y los ejes de ordenación

	Eje 1	Eje 2
Pendiente	-0.922	-0.185
pH	-0.772	0.150
Vol.suelo	-0.542	0.212
C:N	0.442	-0.516
Ca:Mg	0.375	0.168
evapo:preci	-0.357	-0.414
Poros	0.160	-0.318

La ordenación de los sitios, especies y factores ambientales, se muestra en la Figura 11, en la que se indican los factores ambientales y los ejes derivados como se aprecia en la tabla 9, siendo las principales, la pendiente, el pH, el volumen de suelo y la relación carbono nitrógeno indicado por longitud de las flechas.

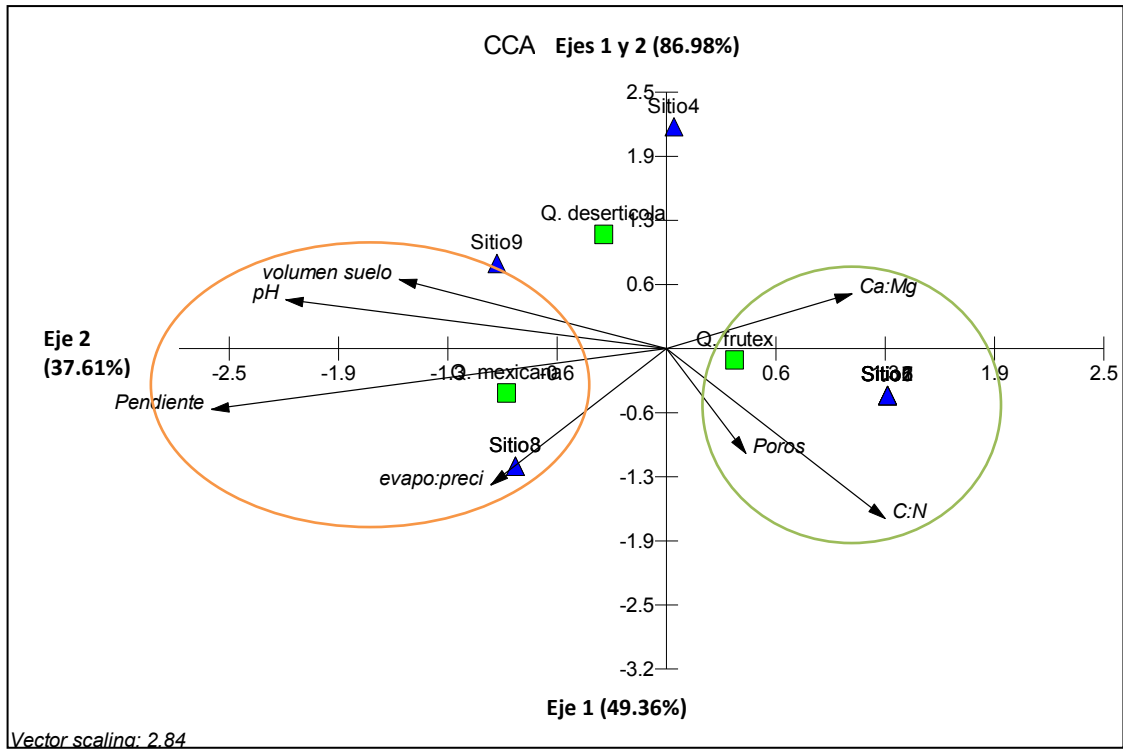


Figura 12. Plano factorial 1-2 del ACC. Triplot de sitios, especies e indicadores de calidad de suelo

En la Figura 12 también se presenta una sobreposición de los sitios 1, 2, 5, 6 y 7 debido a una coincidencia de valores en el eje 2, esta agrupación, corresponde primeramente con la clasificación obtenida mediante el cluster realizado a la vegetación, además como ya se discutió, estos sitios presentan características similares de relieve y suelo, esto se aprecia más claramente en la tabla 10, igualmente existe una sobreposición de los sitios 3 y 9, en estos sitios se encuentra *Q. mexicana*.

Tabla 10 Coordenadas de los sitios en el ACC

	Eje 1	Eje 2
Sitio1	1.285•	-0.462•
Sitio2	1.285•	-0.462•
Sitio3	-0.884	-1.165
Sitio4	0.040	2.209
Sitio5	1.285•	-0.462•
Sitio6	1.285•	-0.462•
Sitio7	1.285•	-0.462•
Sitio8	-0.884	-1.165
Sitio9	-0.991	0.850

Cada especie responde a diferentes indicadores, primeramente *Q. frutex*, se observa una mayor correlación con ambos ejes, es decir se establece en todos los sitios, por esta razón se encuentra cercano al centro de ordenación, aunque es la especie de mayor distribución en el área de estudio, se observa que existen respuestas funcionales de esta especie sobre las condiciones evaluadas, mismas que tienen un efecto sobre parámetros estructurales como son la distribución de frecuencias así como en los diámetros y alturas de esta especie. En el triplot del ACC se observa que el componente tres obtenido a partir del ACP explica de mejor forma la variación en esta especie.

En el caso de *Q. mexicana*, los resultados sugieren que el establecimiento de esta especie está determinado por las condiciones establecidas por la pendiente y el primer factor resultante del ACP, es decir, esta especie en el área de estudio, parece estar condicionada a sitios en los que se almacena y retiene el agua de mejor forma. Encina-Domínguez *et al.* (2009) reportan que encinares como en los que se encuentra *Q. mexicana* se caracterizan por ser perennifolios y están conformados por un número algo mayor de elementos arbóreos, lo que se debe a que prosperan en ambientes más húmedos y con menor influencia de aridez.

Para *Q. desertícola* no se encontró una correlación alta, por lo que no se puede comprobar estadísticamente la relación entre las variables evaluadas, aunque se observó una respuesta parecida a las otras especies del matorral respecto de presentar mayores tallas en los sitios que mayormente almacenan y retienen agua.

El suelo está organizado de manera multiescalar, de tal modo, el Soil Quality Institute (1998), considera que el tipo y número de indicadores por usar depende de la escala de evaluación. Debido a lo anterior, se pueden identificar sitios que requerirán atención especial por presentar mayores restricciones a la restauración, puesto que se encontró que las áreas con exposición sur-suroeste, con geometría cóncava, y de acuerdo con las especies, las diferentes posiciones en la ladera pueden representar deficiencias para el establecimiento y óptimo desarrollo para el establecimiento del matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de

Guadalupe.

A partir de esta investigación, se lograron determinar los requerimientos de matorral de *Quercus*:

En términos de calidad de suelo se identificó al porcentaje de poros; el pH; las relaciones C:N y Ca:Mg; y el volumen del suelo como aspectos relevantes en el establecimiento del matorral. Debido a lo anterior, el matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe, se desarrollará mejor en sitios de profundidad fisiológica mínima de 25 cm en los que la porosidad sea mayor al 50%, pedregosidad menor a 20%, con pH de entre 5.4 y 7, disponibilidad de Ca^{++} y Mg^{++} alta.

En términos de calidad de sitio, las variables del relieve que tienen un efecto determinante en el establecimiento y desarrollo de este matorral son: la posición en el relieve; la pendiente; la exposición; la geometría de la ladera y la relación evaporación-precipitación por favorecer el balance hídrico, por lo que los sitios con exposición norte (N-NO) y las laderas convexas podrán guardar más agua durante el periodo seco. Respecto a la posición en la ladera, *Q. frutex* se establece principalmente en superficies cumbrales y hombros de ladera; *Q. mexicana* se establece solo en dorsos de ladera con pendientes entre 20 y 26°, *Q. desertícola* se encontró en dorso y en hombro de ladera, los mayores diámetro y alturas de esta especie se encontraron en dorso de ladera.

Las variables de sitio antes mencionadas presentan la ventaja de ser de fácil obtención y representación cartográfica, por lo que esta investigación sugiere que podrían ser indicadores primarios para la selección de sitios en el ANP Sierra de Guadalupe con potencial para restaurar a partir de la introducción del matorral de *Quercus*.

CAPÍTULO 4 PROPUESTAS

La vegetación en el área de estudio, consiste predominantemente en especies exóticas establecidas a partir de reforestaciones realizadas por la Comisión de Recursos Naturales (CORENA) del distrito federal, principalmente *Eucalyptus* spp. De acuerdo con Vázquez-Yanes *et al.*, (1999) los bosques de especies exóticas se transforman por lo general en “desiertos verdes”, que no permiten la subsistencia de la gran mayoría de las especies locales de plantas y animales. Cuando estos son cultivados en pendientes, cumplen muy pobremente su pretendida función de proteger el suelo de la erosión y ayudar a restaurar el ciclo hidrológico original.

Para Camargo-Ricalde y García-García (2001), la restauración ecológica es una estrategia de investigación en ecológica que une la teoría con la práctica, capaz de responder preguntas básicas sobre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. El hecho de entender a la restauración en el ANP Sierra de Guadalupe como una acción espacio-dependiente, permite alcanzar objetivos deseables como la integridad de la funcionalidad ecológica, el control de las tasas de erodabilidad y la continuidad en la aportación de servicios ecosistémicos (Cotler *et al.*, 2005).

Un recurso fundamental para lograr lo anterior lo constituyen las especies vegetales herbáceas y leñosas nativas que tengan la potencialidad de crecer en zonas profundamente alteradas, y que, con el tiempo, permitan la recuperación de la fertilidad del suelo, un microclima y un ciclo hidrológico similares a los originales y el restablecimiento de al menos parte de la flora y fauna nativa que aún sobrevive en algunos sitios (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999)

En la flora propia de cada localidad existen una o más especies aptas para formar una cubierta vegetal temporal o preliminar en los terrenos más pobres; siendo los arbustos o hierbas los más utilizados (Wooding, 1967).

Las comunidades arbustivas de encino proveen sombra y favorecen la germinación de semillas y el establecimiento de plántulas de numerosas especies (Jordano *et al.*, 2000).

Los indicadores derivados del análisis brindaron información en un 86.9%

de la varianza, con una correlación especies-indicadores cercana a uno. La especie dominante en el matorral fue *Q. frutex*. Considerando que en el área de estudio están permitidas las obras de restauración ecológica en todas las zonificaciones propuestas en el programa de manejo del ANP (GODF, 2003), Se propone realizar prácticas de restauración ecológica a partir de la introducción de esta especie.

Q. frutex forma comunidades arbustivas en donde habitan un número importante de herbáceas, sin faltar arbóreas; además provee de alimento y albergue a la fauna y sobre todo evita la compactación y pérdida del suelo por erosión. Es una especie que impide la fragmentación ambiental, por lo que puede ser candidata para restauración de suelos y comunidades vegetales (Luna-Cruz, 2008).

Los rebrotes de *Q. frutex* son maduros en corto tiempo, es decir no necesitan alcanzar alturas ni diámetros promedio para ser fructíferos, pues se encuentran plantas de 35 cm de altura, con un diámetro de menos de un centímetro que ya producen frutos que alcanzan madurez, esta especie ha desarrollado una estrategia de supervivencia que no solo funciona en campo, si no que se manifiesta también en condiciones de vivero (Luna-Cruz, 2008). Razones por las cuales esta especie puede ser considerada como valiosa para la restauración.

Del mismo modo, de acuerdo con Bonfil (1995), *Q. mexicana* es una especie de amplia distribución en el país, lo que habla de su capacidad para sobrevivir en diversas condiciones ambientales, además de eficiencia de dispersión. Esto favorece su selección para reforestaciones, teniendo claro que las condiciones locales puede tener efectos diversos sobre el desarrollo de esta especie.

4.1 Selección de áreas susceptibles a restaurar con el matorral de *Quercus*

Para la selección de áreas a restaurar, más que valores puntuales, se consideraron intervalos de los indicadores derivados en esta investigación, en los

cuales se observó que el matorral se desarrolla mejor. En el área de estudio, la diversidad geomorfológica expresada a través de los elementos relativamente más estables del paisaje, permite, como se discutió anteriormente, generar indicadores de primer orden los cuales pueden ser expresados de forma cartográfica.

De una superficie total de 934.39 ha que corresponden al área de estudio, la superficie que puede ser restaurada a partir del matorral de *Q. frutex* de acuerdo con este trabajo es de 2.39 ha. Se consideraron superficies en las que la pendiente presentara entre 3 y 11°, en un intervalo altitudinal de 2,600 y 2,700m, con una exposición NE-NO (Figura 13). Dentro de cada sitio se espera que los suelos cumplan con un mínimo de 15 cm de profundidad, que tengan una densidad aparente menor a 1 g/cm³, una porosidad mayor del 50%, pH entre 5.4 y 7 y altas concentraciones de cationes intercambiables.

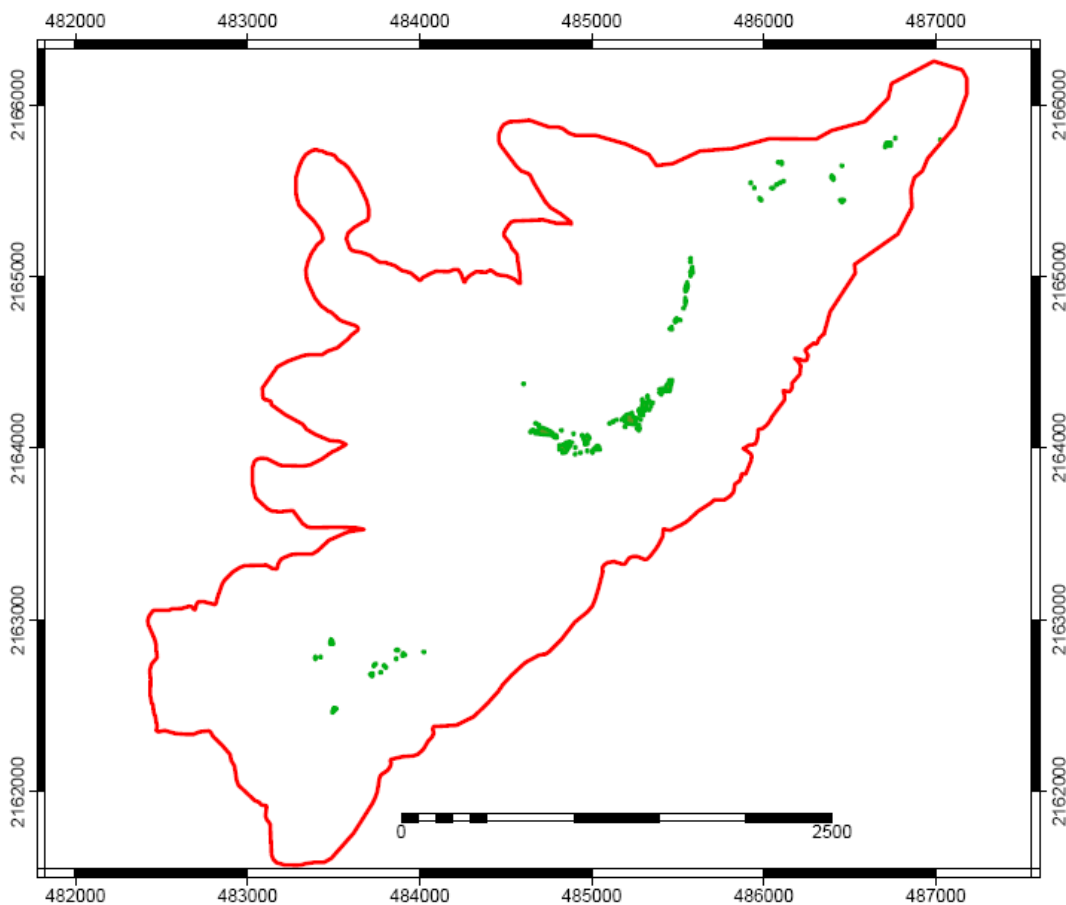


Figura 13 Superficies propuestas para la restauración a través del matorral de *Quercus frutex*

De una superficie total de 934.39 ha que corresponden al área de estudio, la superficie que puede ser restaurada a partir del matorral de *Q. mexicana* de acuerdo con este trabajo es de 7.36 ha. Se consideraron superficies en las que la pendiente presentara entre 20 y 25°, en un intervalo altitudinal que va de los 2,550 a los 2,700m con una exposición NO (Figura 14). Posteriormente los sitios elegidos, deben contar con una profundidad mínima de 25 cm, un volumen de suelo mayor a 2 dm³ de tal modo que permitan un adecuado almacén de agua, así como pH entre 5.4 y 7.

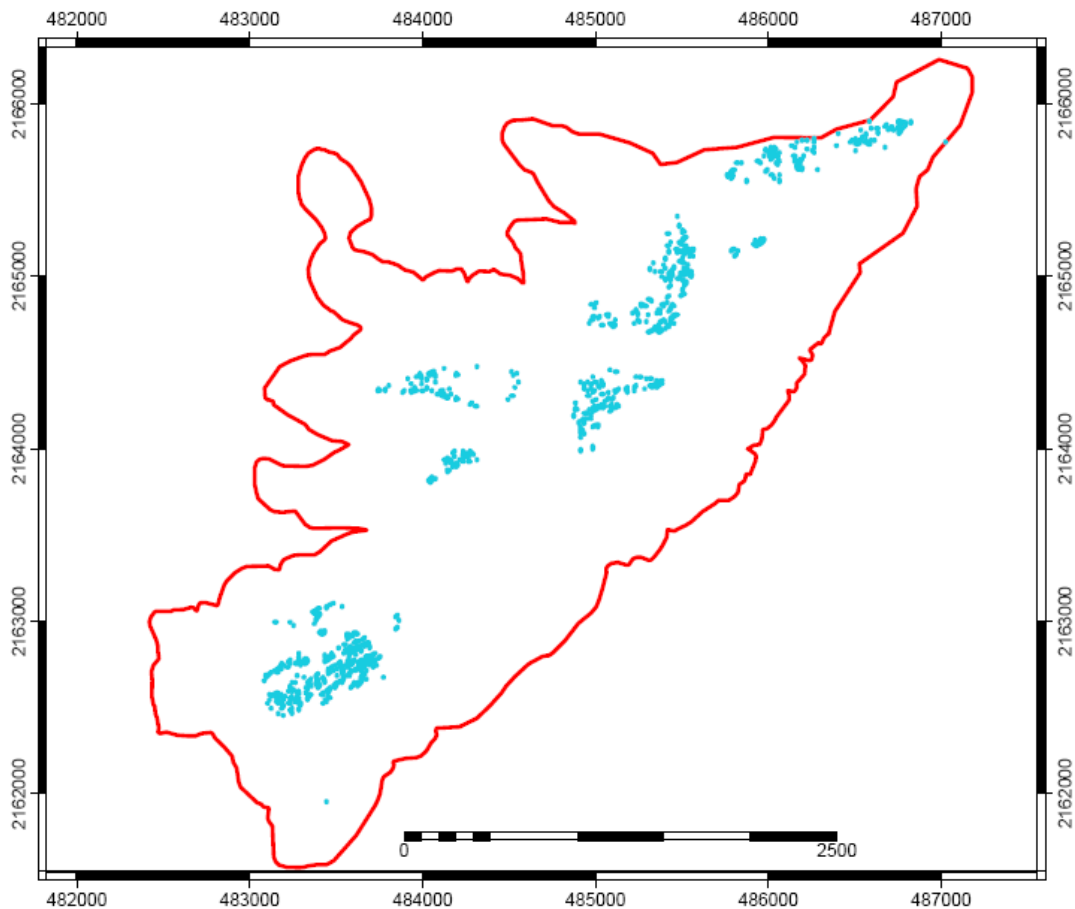


Figura 14 Superficies propuestas para la restauración a través del matorral de *Quercus mexicana*

De una superficie total de 934.39 ha que corresponden al área de estudio, la superficie que puede ser restaurada a partir del matorral de *Q. deserticola* de acuerdo con este trabajo es de 3.15 ha. Se consideraron superficies en las que la pendiente presentara entre 13 y 20°, en un intervalo altitudinal de 2,650 a 2,700m, con una exposición NO (Figura 15).

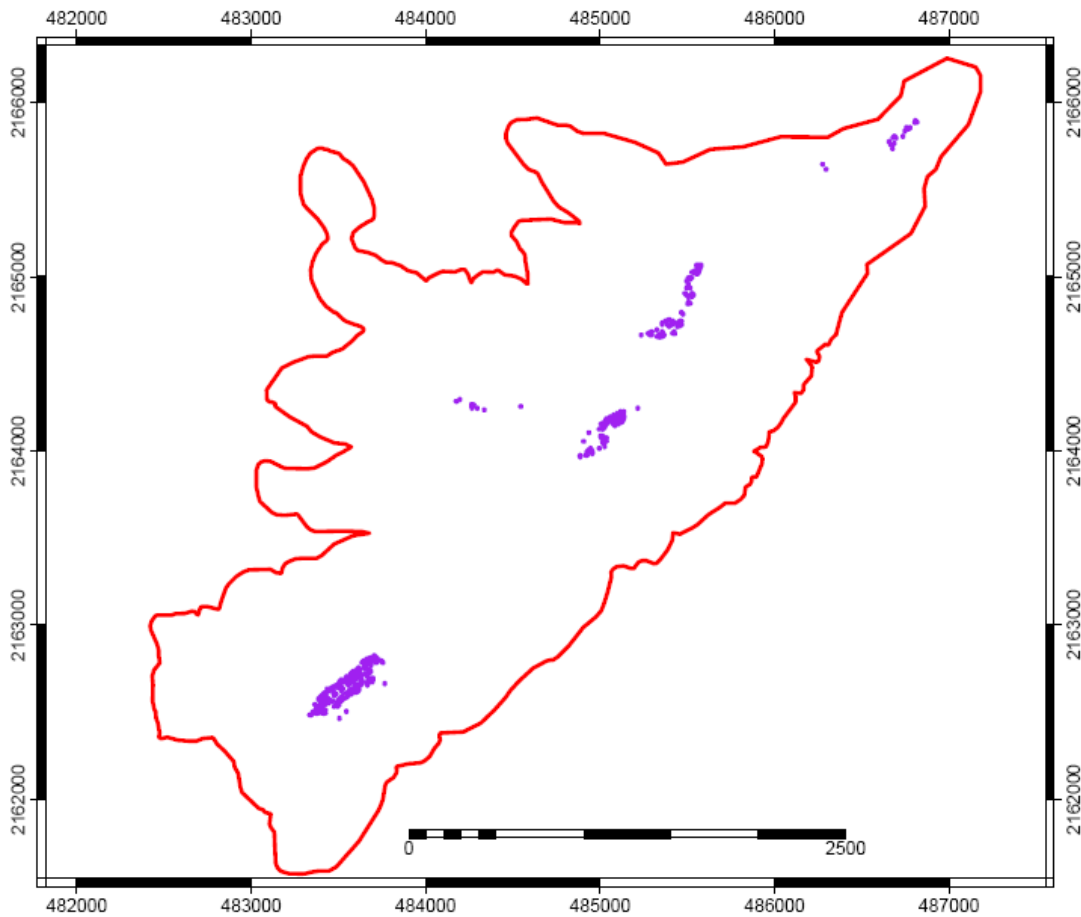


Figura 15 Superficies propuestas para la restauración a través del matorral de *Quercus deserticola*

En la Figura 16 se presentan las áreas con condiciones óptimas, donde se espera, de acuerdo con los resultados obtenidos, un mejor desarrollo del matorral de *Quercus*, incluyendo las tres especies aquí consideradas. Estos sitios tienen ventajas respecto de los factores limitantes para el adecuado desarrollo de este matorral

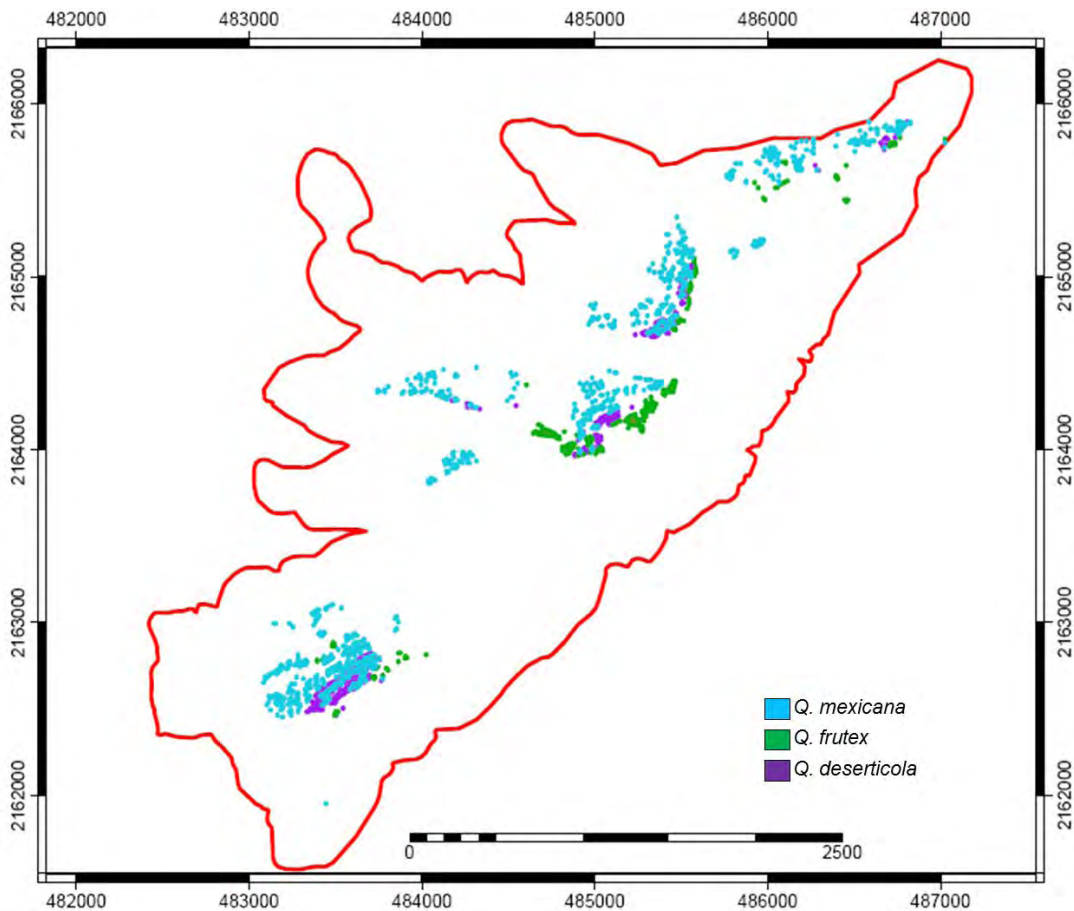


Figura 16 Superficies propuestas para la restauración a través del matorral de *Quercus*

Del mismo modo, se encontró que el *Q. frutex* se puede presentar, aunque con menores diámetros y alturas, en otras condiciones de relieve y suelo del área de estudio (Figura 17) que corresponden a 139.33 ha, por lo que se sugiere que en estas zonas, se explore el potencial que tiene esta especie como facilitadora de microambientes para otras especies vegetales nativas del área y con esto aumentar la diversidad vegetal del área, como puede ser el caso de *Quercus rugosa*.

Los encinos se han sugerido como especies clave en la rehabilitación y restauración, pues aunque no se consideran especies pioneras, pueden reclutarse en etapas tempranas de sucesión secundaria (Paredes-Rojas, 2010), ya que, aunque las causas que determinan el éxito de la sobrevivencia difieren entre sitios, la falta de humedad durante la época seca podría ser determinante en el éxito del

desarrollo de especies utilizadas en la restauración. De acuerdo con Bonfil (1998), en determinadas zonas, las plántulas de encinos podrían registrar una mayor sobrevivencia en micrositos parcialmente sombreados en comparación con micrositos abiertos o totalmente sombreados.

Incluso bajo las condiciones antes mencionadas para el área de estudio, de acuerdo con Matus-Matías (2005) varias especies de encino con potencial para la restauración ecológica, han sido reportadas como tolerantes a condiciones de estrés hídrico, con estrategias como defoliación; mejoramiento de la eficiencia fotosintética; alta producción de biomasa radical; etc. Potencial que puede ser logrado a partir del conocimiento integral de las especies y del entorno natural al cual pertenecen.

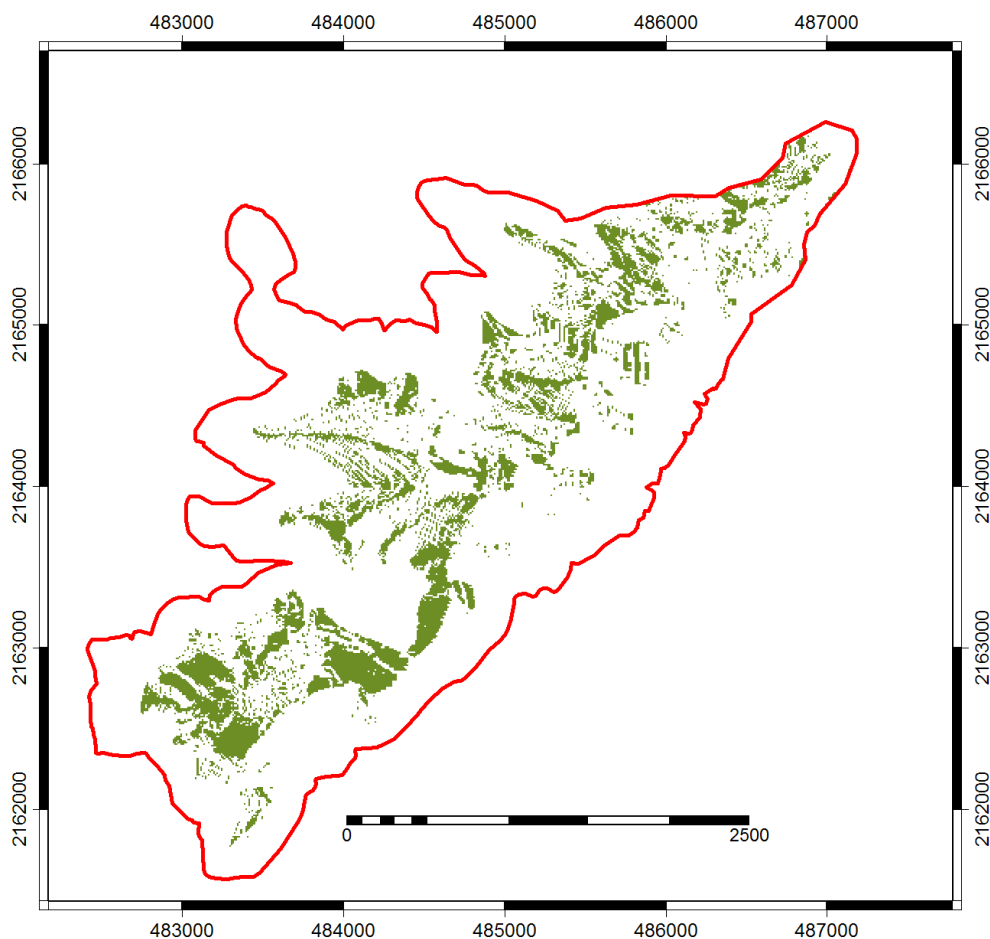


Figura 17 Áreas con potencial para la restauración a través de *Quercus frutex*

En estas áreas, también se recomienda probar reforestaciones con otras especies de buena aptitud potencial, como *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (1806) y *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq, en especial esta última puede ser importante, al igual que *Q. mexicana*, para la reforestación en las laderas de mayor inclinación, con la ventaja que esta *Dodonaea viscosa* se puede establecer también en áreas de suelos con presencia de tepetates o capas endurecidas, que son someros y pedregosos.

También se debe considerar por razones de biodiversidad que las especies utilizadas favorezcan el establecimiento de las especies nativas, tanto de flora como de fauna, proporcionando hábitat y alimento (Vázquez-Yanes y Batis, 1996). De esta manera, a partir de la recopilación de la vegetación reportada por Reiche (1914); Agustina-Batalla y Ramírez-Cantu (1939) y Bopp (1956) en la sierra de Guadalupe, se propone considerar algunas especies reportadas en la sierra por su potencial para la restauración ecológica de acuerdo con Vázquez-Yanes *et al.*, (1999), estas especies se enlistan a continuación:

- *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg. (1892). Se puede presentar como árbol o arbusto caducifolio, de 3 a 6 m (hasta 9 m). Esta especie está ampliamente distribuida en el país; es una especie de vegetación secundaria, de selva baja caducifolia en un intervalo altitudinal de 150 a 3,000 m; puede prosperar en lugares perturbados, así como en terrenos pedregosos y de suelo somero; además puede estar asociada a *Tecoma stans*.
- *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth (1819). Es un árbol pequeño o arbusto bajo, perennifolio o caducifolio, de 1 a 10 m (hasta 20 m) de altura, originaria de México. Es una especie de vegetación secundaria que abunda en el ecotono entre la selva baja caducifolia y el bosque de encino. El establecimiento de esta especie puede favorecer la conservación de suelo a partir de su efecto en control de la erosión, es resistente a las sequías.
- *Schinus molle* L. (1753). Es un árbol perennifolio, de 4 a 8 m (hasta 15 m) de altura. Es una especie de vegetación secundaria que se le puede encontrar de manera silvestre en zonas perturbadas. Esta especie se

recomienda principalmente para zonas secas. Dentro de los principales efectos restauradores que presenta, esta la conservación de suelo a partir del control de la erosión, se trata de uno de los pocos árboles que prosperan en pedregales y lomeríos; contribuye a mejorar la calidad del suelo ya que sus hojas, ramas y frutos se caen abundantemente y al caer constituyen una buena materia orgánica por lo que puede ser una buena opción para la recuperación de suelos degradados.

- *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (1806) Es un arbusto espinoso o árbol pequeño, perennifolio o subcaducifolio, de 1 a 2 m de altura, la forma arbustiva y de 3 a 10 m la forma arbórea. Es un elemento importante de la vegetación secundaria. Esta especie tiene potencial para reforestación productiva en zonas degradadas y ha sido exitosamente plantada para la fijación de nitrógeno.
- *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (1825). Es un árbol o arbusto espinoso, caducifolio, de 2 a 12 m (hasta 15 m) de altura. Especie originaria de México, distribuida en casi todo el país; crece en gran variedad de suelos. Esta es una especie de vegetación secundaria considerada para los procesos de regeneración ya que facilita el establecimiento de otros elementos.
- *Opuntia*, *Sedum* y *Senecio*, Boop (1956), indica que estos géneros presentan adaptaciones relevantes para las condiciones de estrés hídrico propias de la sierra, por lo que en esta investigación se considera que se pueden suponer como especies con potencial para restablecerse en el área de estudio.

En esta investigación, más que una metodología simplificada, se propone un muestreo basado en las condiciones específicas del área de estudio para buscar los mejores indicadores de calidad de suelo con miras a la restauración ecológica del ANP Sierra de Guadalupe. Estos indicadores se generaron como base para el diagnóstico y monitoreo de las condiciones ambientales del área.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El matorral de *Quercus* se localiza en un intervalo altitudinal entre los 2,568 y 2,703 msnm en pendientes que van desde los 3° en superficies cumbreles, 11° en hombros de ladera y 26° en dorso de ladera. Se encuentran en relieves planos en sentido longitudinal y convexos en sentido transversal, con exposiciones NE, NW, E y SW.

Las condiciones de calidad de suelo que permiten la presencia del matorral de *Quercus* spp., en el ANP Sierra de Guadalupe son: la porosidad; el volumen del suelo; el pH; las relaciones C:N y Ca:Mg.

Las condiciones de relieve que permiten la presencia del matorral de *Quercus* spp., en el ANP Sierra de Guadalupe son: la posición en el relieve, la pendiente, la exposición y la geometría de la ladera y la relación evaporación-precipitación.

Los atributos del relieve limitantes para rehabilitar suelos a partir de la reintroducción de *Quercus* spp., son: la exposición sur-suroeste, la geometría cóncava de las laderas, y de acuerdo con las especies, las diferentes posiciones en la ladera pueden representar deficiencias para el establecimiento y óptimo desarrollo para el establecimiento del matorral de *Quercus* en el ANP Sierra de Guadalupe.

Q. frutex es la especie de mayor distribución en el área de estudio por lo que existen respuestas funcionales de esta especie sobre las condiciones evaluadas, mismas que tienen un efecto sobre parámetros estructurales como son la distribución de frecuencias así como en los diámetros y alturas de esta especie.

Con *Q. mexicana*, los resultados sugieren que su establecimiento está determinado por la exposición, la pendiente y el volumen del suelo. Esta especie en el área de estudio, parece estar condicionada a sitios en los que se almacena y

retiene el agua de mejor forma.

RECOMENDACIONES

Para realizar una buena selección de especies para la restauración de los sistemas forestales en México, además de conocer sus características de crecimiento en función de las características climáticas y topográficas, se requiere de un bagaje suficiente sobre su biología y ecología, de manera que ello permita la identificación de sus limitaciones de establecimiento en dichos ecosistemas

Se recomienda estudiar las respuestas espaciales desde el punto de vista ecofisiológico, considerando la complejidad del suelo como cuerpo natural, para así, contar con el conocimiento de las relaciones específicas entre los factores que determinan el establecimiento de la vegetación y el éxito de las prácticas de restauración en el área de estudio.

El entendimiento de los aspectos anteriores, facilita la identificación de las variables de mayor influencia sobre los parámetros estructurales del matorral de *Quercus* y el éxito de las prácticas de restauración, además, permiten el conocimiento sobre el funcionamiento de los suelos en el ecosistema, y de este modo, el papel que desempeñan en el cumplimiento de los objetivos de restauración ecológica.

6. REFERENCIAS

- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L. de L., Almaraz-Sánchez, A., Tlapal-Bolaños, B., Trejo-Ramírez, O., Davidson, J. M., Kliejunas, J.T., Oak, S. O'Brien, J.G., Orozco-Torres, F. y D. Quiroz-Reygadas. 2007. Agentes asociados y su papel en la declinación y muerte de Encinos (*Quercus*, Fagaceae) en el centro-oeste de México. *Polibotanica* 23:1-21
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M y Etchevers-Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Bautista, C., Etchevers, B., del Castillo, R y Gutiérrez, C. 2004. La calidad de los suelos y sus indicadores. *Ecosistemas*. Año XIII, No. 2 Mayo-Agosto.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-365. In: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Bonfil S. C. 1995. Establecimiento, sobrevivencia y crecimiento de plántulas de dos especies de encino en el Ajusco, D. F. III Seminario Nacional sobre utilización de encinos, 1992. Memorias, Tomo I, pp. 350-365. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 380 p.
- Bonfil S. C. 1998. Dinámica poblacional y regeneración de *Quercus rugosa*: implicaciones para la restauración de bosques de encinos. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Doctorado. Facultad de ciencias UNAM.
- Boop, M. 1956. Contribución al estudio de la flora fanerogámica de los cerros situados al norte de la Ciudad de México: Sierra de Guadalupe, cerros Chiquihuite, Ticomán y Zacatenco. Tesis de professional (Biología). Facultad de ciencias UNAM.
- Brady, N. 1990. *The nature and properties of soils*. Macmillan. New York, NY. US.
- Brown, D. , R.G. Hallman, Ch.R. Lee, J.G. Skogerboe, K. Eskew, R.A. Price, N.R. Page, M. Clar, R. Kort y H. Hopkins. 1986. Reclamation and Vegetative restoration of problem soils and disturbed land. *Pollution technology review* 139. New Jersey, EE.UU. 1: 166-181.
- Burt R. (Ed.). 2004. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service. United

States Department of Agriculture. 700 p

- Callaham, M., Rhoades, Ch and Heneghan, L. 2008. A Striking Profile: Soil ecological knowledge in restoration management and science. *Restoration Ecology* 16(4): 604–607.
- Camargo-Ricalde y García-García. 2001. El género *Mimosa* L. (Fabaceae) y la restauración ecológica. *ContactoS* 39: 34-42
- Campa-Uranga, M. 1965. Breve análisis petrográfico de la Sierra de Guadalupe. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Tesis profesional, 61 p.
- Carlos-Valerio V., García-Palomo A., López-Miguel C. y Galván-García A. 2007. Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo couleé: cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 59 (2): 183-201
- CONSERVA. 2004. Propiedades edáficas y calidad de sitio en áreas reforestadas de la Sierra de Guadalupe, Distrito Federal. Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México SEMARNAT. 94 p.
- Cotler, H., G, Bocco y A, Velázquez, 2005. El análisis del paisaje como base para la restauración ecológica. En: Sánchez, O., E. Peters., R. Márquez-Huitzil., E Vega., G Portales., M Valdez y D Azuara. Temas sobre restauración ecológica. Ed. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat). México 256 p
- Doran, J. W. A., A. Sarrantonio, and M. A. Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56: 1-54.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 2011. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. 28 de enero de 1988. Última Reforma DOF. 30-08-2011
- Encina-Domínguez, J., Zarate-Lupercio, A., Estrada-Castillón, E., Valdés Reyna, A. y Villarreal-Quintanilla, J. 2009. Composición y aspectos estructurales de los bosques. *Acta Botánica Mexicana* 86:71-108
- Fassbender, H.; Bornemisa, E. 1987 Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina 2a ed. IICA, San José, Costa Rica.
- Flores-Román,D., Vela-Correa, G., Gama-Castro, J., Silva-Mora, L. 2009. Pedological

- diversity and the geocological systems of Sierra de Guadalupe, central México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 26(3): 609-622
- Gavande S. A. 1982. Física de suelos. Ed. Limusa. México. 351 pp.
- García-Flores, J. 2008. Diagnóstico ambiental de las unidades naturales de la estación de restauración ecológica “Barrancas del Río Tembembe”, con fines de restauración. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría. Facultad de ciencias.
- Gobat, J, Aagno, M., Matthety, W. 2004. The living soil: Fundamentals of soil science and soil biology.
- Gil-Stores F., Trasar-Cepeda C., Leiros M. C. y Seoane S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 877-887.
- GDF. Gobierno del Distrito Federal. 2009. Áreas Naturales Protegidas del Distrito Federal. <http://www.transparenciamedioambiente.df.gob.mx/index.php?option=comcontent&view=article&id=209%3Aareas-naturales-protegidas-del-distrito-federal-009&catid=70%3Aproblematika-ambiental&Itemid=449>. Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2011
- GODF. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2003. Acuerdo por el que se aprueba el programa de manejo del área natural protegida con la categoría de zona sujeta a conservación ecológica denominada “Sierra de Guadalupe”. 2 de diciembre del 2003.
- GODF. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2000. Decreto de programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal. 1 de agosto de 2000
- González-Elizondo, S., Gonzalez-Elizondo, M., y Cortes-Ortiz, A. 1993. Vegetación de la reserva de la biosfera “La Michilia”, Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*. 22:1-104
- Greenacre, M. 2008. La práctica del análisis de correspondencias. Ed. Fundación BBVA-Rubes. Barcelona España
- Heneghan, L., Miller, S., Baer, S., Callaham, M., Montgomery, J., Pavao-Zuckerman, M., Rhoades, Ch., and Richardson, S. 2008. Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management. *Restoration Ecology*. 16(4): 608–617
- Jordano. P., Zamora, R., Marañón, T. y Arroyo, J. 2000. Claves ecológicas para la

restauración del bosque Mediterráneo. Aspectos demográficos, ecofisiológicos y genéticos. *Ecosistemas X* (1)

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.

Karlen D. L., Ditzlerb C. A. y Andrews S. S. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114: 145–156

Kemmers, R. H., J. Bloem, J. Faber, G. Jagers Op Akkerhuis and S.P.J. Van Delft. 2007. A functional approach to assess soil quality parameters for ecosystem services of soils. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 9.

Krasilnikov, P. V., García Calderon, N.E., Sedov, S.N. Vallejo Gomez, E., Ramos Belloa, R. 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena* 62: 14–44.

Körner, C. 2003. Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems. 2nd Edn. Springer-Verlag, Berlin, 344 p.

Lozano-Barraza, L., 1968. Geología de la Sierra de Guadalupe, México, D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 39 p.

Luna-Cruz, M. 2008. Aspectos ecológicos del encino *Quercus frutex* Trel. (Fagaceae) en tres localidades del Estado de México. Tesis Licenciatura. Facultad de estudios superiores Iztacala. UNAM. 137 p.

Lugo-Hubp, J. 1988, Elementos de geomorfología aplicada. Métodos cartográficos. Instituto de Geografía, UNAM, 128 p.

Lugo-Hubp, J. y Salinas-Montes, A. 1996. Geomorfología de la Sierra Guadalupe (al Norte de la ciudad México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13(2): 240-251

Marañón, T., Villar, R., Quero, J. L. y Pérez, R. I. 2005. Análisis del crecimiento de plántulas de *Quercus ruber* y *Q. canariensis*: Experimentos de campo y de invernadero. Cuad. Soc. Esp. Cien. For. Actas de la reunión sobre ecología, ecofisiología, y suelos forestales. 20:87-92.

- Matus-Matías, A. 2005. Repuestas del género *Quercus* a condiciones de estrés hídrico. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Iztacala. Tesis profesional.
- McCune, B. and Grace, J.B. 2002. *Analysis of Ecological Communities*. MJM Publishers. 304 p.
- Márquez-Huitzil, R. 2005. Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales. Pp.169-179. En: Sánchez O., E. Peters., R Márquez-Huitzil., E Vega., G Portales., M Valdés y D. Azuara (eds.). *Temas sobre restauración ecológica*. INE-SEMARNAT, U.S. Fish & Wildlife Service, UPC, A.C. México. 255 pp.
- Méndez-de la Cruz, F. R., Camarillo- Rangel, J. L., M. Villagrán-Santa Cruz y R. Aguilar-Cortez. 1992. Observaciones sobre el status de los anfibios y reptiles de la Sierra de Guadalupe (Distrito Federal-Estado de México). *Anales del Instituto de Biología*. UNAM, Serie. Zoología. 63(2):249-256.
- National Resource Conservation Soil (NRCS). 2004. What is soil quality?. Unites States Department Agriculture. [http://soils.usda.gov/sqi/soil_quality/what_is/]. Visitado el 18/09/09
- Ortiz-López, R. 2008. Sinecología del bosque de pino-encino en El Punto, Santa Catarina Ixtepeji, Ixtlán, Oaxaca. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias forestales. Tesis profesional.
- Paredes-Rojas, T. 2010. Influencia de factores edáficos sobre la distribución de las especies de *Quercus* (Fagaceae) y la estructura de un bosque ubicado en los municipios Timilpan y Chapa de Mota, Estado de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Iztacala. Tesis profesional.
- PAOT. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal. 2007. *El Suelo de Conservación del Distrito Federal*.
<http://www.paot.org.mx/centro/programas/suelo-corena.pdf>. Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2011.
- Pritchett, W. 1986. *Suelos forestales. Propiedades, conservación y manejo*. Ed. Limusa. México. 634 p.
- Quero, J., Villar, R., Marañón, T., Murillo, A. y Zamora, R. 2008. Respuesta plástica a la

- luz y al agua en cuatro especies mediterráneas del género *Quercus* (Fagaceae). *Revista Chilena de Historia Natural*. 81: 373-385
- Ramírez-Contreras, A. y Rodríguez-Trejo, D. A. 2004. Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 5-11.
- Romero, S., Ezequiel, C., Rojas, M de L. y Aguilar. E. 2002. El Género *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de México. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 89 (4): 551-593
- Rzedowski, G. C. de y J. Rzedowski, 2001. Flora fanerogámica del Valle de México. 2a ed. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México. 1406 pp.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sánchez, O. 2005. Restauración ecológica: algunos conceptos, postulados y debates al inicio del siglo XXI. En: Sánchez, O., E. Peters., R. Márquez-Huitzil., E Vega., G Portales., M Valdez y D Azuara. Temas sobre restauración ecológica. Ed. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat). México 256 p.
- Salinas-Montes, A. 1994 Geomorfología de la Sierra de Guadalupe y riesgos naturales. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Tesis profesional. 102 p.
- SER. Society for Ecological Restoration International. 2005. Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects, 2nd Edition. Andre Clewell, John Rieger, and John Munro. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group.
- Schoeneberger, P. J; Wysocky, D. A; Benham, E. C. y Broderson, W. D. (Eds), 2002. Field book for describing and sampling soils. Versión 2.0. NRCS, NSSC, Lincoln, NE.
- Siebe, C. 1999. Monitoreo edafo-ecológico multiescalar. En: Siebe, C., H. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y C. Oleshko (eds.) 1999. Conservación y restauración de suelos. UNAM-SEMARNAP, México. p 263-278.
- Siebe, G., Bocco, G., Sánchez, J y Velázquez, A. 2003 Suelos: distribución,

- características y potencial de uso. En : Velázquez, A., Torres, A y Bocco, G. 2003. Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales. INE-SEMARNAT, México. 595 p.
- Siebe, Ch., Jahn, R. y Stahr, K. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Segunda Ed. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial No. 4. México 57 p.
- Schnitzer, M. y Khan, S. U. (1978). "Soil Organic Matter." *Elsevier*, Amsterdam. No 8. 319 pp
- Torres-Soria. 2001. Flora fanerogámica de la zona arqueológica de Teotihuacan, Estado de México. *Polibotanica*. 12: 57-83
- USDA-NRSC-SQI. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute. 2001. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning.
- Valencia, S. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 75: 33-53
- Vázquez-Yanes, C., A. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM.
- Vázquez-Yanes, C. y A. Batis. 1996. "Adopción de árboles nativos valiosos para la restauración ecológica y la reforestación", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 58: 75-84.
- Vela, G. y Flores, D. 2006, Composición mineralógica de la fracción arcillosa de los suelos de la Sierra de Guadalupe, Distrito Federal. *Boletín de Mineralogía*. 17(1), 111-118.
- Vela, G., Rodríguez, Ma de L., y López, J. 2011. Descripción morfológica de perfiles de suelos. Manual para trabajo en campo. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco. Manual 33. México. 50 p.
- Vibrans, H (ed.). 2009. Malezas de México. Fecha de consulta: 2 de enero 2012 <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>
- Wooding, R. G. 1967. Los suelos. Edit. Omega. Barcelona España.

ANEXOS

Anexo 1 Perfiles de suelos analizados en el ANP Sierra de Guadalupe

Información general de los suelos

Suelos someros que tienen como material parental depósitos piroclásticos y coluviales sobre andesitas, presentan rocas superficiales, existen procesos de erosión hídrica de flujo laminar y concentrado favorecidas por la pendiente. De forma general son de color pardo oscuro, son porosos, tienen estructura subangular en bloques gruesa que rompe a fina de grado moderado y estabilidad de moderada a mediana, presentan un drenaje bueno, el espacio radicular efectivo es de 10 a 30 cm, con una profundidad fisiológica de 30 cm, tienen como principal limitante la presencia de rocas tanto en perfil como en superficie.

Sitio1. Perfil de suelo descrito en el paraje El Jaral

En las coordenadas UTM X0484932 y Y2163950 a una altitud de 2689 msnm. El sitio se encuentra en una superficie cumbral, la cual tiene una pendiente de 3°, el sitio presenta de forma local geometría convexa en sentido longitudinal y plana transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color pardo grisáceo muy oscuro, presenta rocas en superficie y en el perfil, desarrollo de estructura en bloques subangulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 15 cm.

Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-15 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) de textura al tacto franco-arcillosa, seco, consistencia dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es poliédrica subangular gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10 mm) de grado moderado y estabilidad mediana, con una pedregosidad del 20%, comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²); Numerosos poros (> 200 por dm ²) de morfología vesicular, intersticial y tubular localizados dentro y fuera de los agregados

Sitio2. Perfil de suelo descrito en el paraje El Jaral

En las coordenadas UTM X0485063 y Y2164072 a una altitud de 2678 msnm. El sitio se encuentra entre una Ladera superior de flujos lávicos (hombro de ladera), la cual tiene una pendiente de 11°, el sitio presenta de forma local geometría convexa en sentido longitudinal y transversal. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

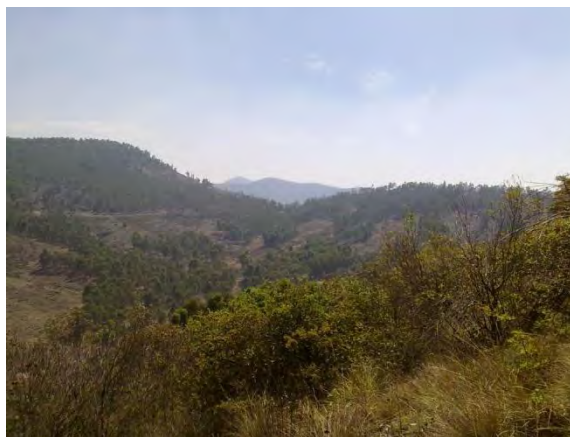
Suelo somero, de buen drenaje, de color pardo grisáceo muy oscuro, no presenta piedras, desarrollo de estructura en bloques subangulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 30 cm.

Descripción de los horizontes

Horizonte	Profundidad	Descripción
A11	0-5 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) de textura al tacto limo-arcillosa, seco, consistencia dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10 mm) de grado moderado y estabilidad alta, con una pedregosidad de menos del 1%, presenta abundantes raíces (100 a 500 por 3dm ²) finas y delgadas (< 1 a 3 mm ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular, intersticial y tubular localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado horizontal.
A12	5-30 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) de textura al tacto franco-arcillosa, consistencia blanda en seco y friable en húmedo, ligeramente húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10 mm) de grado moderado y estabilidad moderada, con una pedregosidad de menos del 1%, presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) de finas a medias (< 1 a 10 mm ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular, intersticial y tubular localizados dentro y fuera de los agregados, límite medio horizontal.
AC	30-49 cm	Horizonte de color pardo oscuro (10YR 3/3) de textura al tacto arcillo-limosa, consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo, ligeramente húmedo, muy adhesivo, plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es angular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10 mm) de grado moderado y estabilidad alta, con una pedregosidad de menos del 1%, presenta muy raras raíces (menos de 1 por 3dm ²) finas (< 1 mm ø); numerosos poros (> 200 por dm ²) de morfología vesicular, intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular.

Sitio3. Perfil de suelo descrito en el paraje Puerto Metate

En las coordenadas UTM X0483929 y Y2163043 a una altitud de 2568 msnm. El sitio se encuentra en una ladera media de montaña (dorso de ladera), la cual tiene una pendiente de 25°, el sitio presenta de forma local geometría convexa en sentido longitudinal y plana transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex* - *Q. mexicana*.



Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color negro, no presenta piedras, desarrollo de estructura en bloques subangulares moderada que rompe en bloques subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a muy fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 25.cm.

Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-25 cm	Horizonte de color negro (10YR 2/1) de textura al tacto franco-limosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y muy friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a muy fina (3-5mm) de grado moderado y estabilidad moderada, con una pedregosidad de menos del 1% de piedras pequeñas (1 a 5 cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) finas (<1 mm ø); numerosos poros (> 200 por dm ²) de morfología vesicular, intersticial y tubular localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular.

Sitio4. Perfil de suelo descrito en el paraje Tokio

En las coordenadas UTM X0485411 y Y2164610 a una altitud de 2680 msnm. El sitio se encuentra en una superficie cumbral, la cual tiene una pendiente de 13°, el sitio presenta de forma local geometría convexa en sentido longitudinal y plana transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex* –*Q. deserticola*.



Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color negro, ligeramente pedregoso, desarrollo de estructura en bloques subangulares moderada que rompe en bloques subangulares, con agregados que van de tamaño medio a muy fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 15 cm.

Descripción de los horizontes

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-15 cm	Horizonte de color negro (10YR 2/1) de textura al tacto franco-limosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques media (5-10 mm) que rompe a muy fina (3-5mm) de grado moderado y estabilidad moderada, ligeramente pedregoso (1 al 5%) de piedras medias (5 a 10 cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) finas (<1 mm ø); numerosos poros (> 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular.
Cqm	>15 cm	Horizonte de color pardo muy claro (10YR 8/4) consistencia dura en seco y muy firme en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), no presenta raíces.

Sitio 5. Perfil de suelo descrito en el paraje Tokio

En las coordenadas UTM X0485463 y Y2164679 a una altitud de 2,701 msnm. El sitio se encuentra en una superficie cumbral, la cual tiene una pendiente de 3°, el sitio presenta de forma local geometría cóncava en sentido longitudinal y es convexa transversalmente. La vegetación es un bosque de *Eucalyptus* asociado a un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color pardo muy oscuro, ligeramente pedregoso, desarrollo de estructura en bloques subangulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a muy fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 23 cm.

Descripción de los horizontes

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-23 cm	Horizonte de color pardo muy oscuro (10YR 2/2) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a muy fina (3-5mm) de grado moderado y estabilidad moderada, ligeramente pedregoso (1 al 5%) de piedras grandes (10 a 20cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) medias (3 a 10 mm ø); numerosos poros (> 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado ondulado.
Cx	>25 cm	Horizonte de color pardo muy claro (10YR 8/4) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y firme en húmedo, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O).

Sitio6. Perfil de suelo descrito en el paraje Jaral-Cola de caballo

En las coordenadas UTM X0484792 y Y2164205 a una altitud de 2703 msnm.

El sitio se encuentra en una superficie cumbral, la cual tiene una pendiente de 4°, el sitio presenta de forma local geometría plana en sentido longitudinal y transversal. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color pardo grisáceo muy oscuro, no presenta piedras, desarrollo de estructura en bloques subangulares media que rompe en bloques subangulares muy finos, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 15 cm

Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-15 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques media (10-20 mm) que rompe a fina (5-10mm) de grado moderado y estabilidad moderada, extremadamente pedregoso (50 al 75%) de piedras grandes (10 a 20cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) finas y delgadas (<1 a 3 mm ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular

Sitio7. Perfil de suelo descrito en el paraje Tokio

En las coordenadas UTM X0485318 y Y2164648 a una altitud de 2685 msnm.

El sitio se encuentra en una ladera superior de montaña (hombro de ladera), la cual tiene una pendiente de 10°, el sitio presenta de forma local geometría plana sentido longitudinal y convexa transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

Suelo medio, drenaje a bueno, de color pardo grisáceo muy oscuro, pedregoso, desarrollo de estructura en bloques sub angulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta dentro de los primeros 32cm.



Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-32 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente alcalino (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10mm) de grado moderado y estabilidad moderada, pedregoso(5 al 20%) de piedras pequeñas (1-5cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) finas y delgadas (<1 a 3 mm ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular

Sitio 8. Perfil de suelo descrito en el paraje Cola de caballo

En las coordenadas UTM X048772 y Y2164121 a una altitud de 2679 msnm. El sitio se encuentra en una ladera media de montaña (dorso de ladera), la cual tiene una pendiente de 26°, el sitio presenta de forma local geometría plana sentido longitudinal y plana transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus*.

Descripción breve del perfil.

Suelo somero, drenaje bueno, de color pardo grisáceo muy oscuro, ligeramente pedregoso, desarrollo de estructura en bloques sub angulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño fino a muy fino, el perfil es poroso, la densidad de las raíces es alta.

Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-24 cm	Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, ligeramente ácido (pH 6 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques fina (5-10 mm) que rompe a muy fina (3-5 mm) de grado moderado y estabilidad moderada, ligeramente pedregoso (1 al 5%) de piedras pequeñas (1-5cm), presenta abundantes raíces (100 a 500 por 3dm ²) finas y delgadas (<1 a 3 mm Ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular

Sitio9. Perfil de suelo descrito en el paraje Tokio

En las coordenadas UTM X0485303 y Y2164347 a una altitud de 2654 msnm. El sitio se encuentra en una ladera media de montaña (dorso de ladera), la cual tiene una pendiente de 20°, el sitio presenta de forma local geometría plana sentido longitudinal y convexa transversalmente. La vegetación es un matorral de *Quercus frutex*.



Descripción breve del perfil.

Suelo de profundidad media, de drenaje bueno, de color pardo amarillento oscuro, ligeramente pedregoso, desarrollo de estructura en bloques sub angulares moderada que rompe en bloques angulares y subangulares, con agregados que van de tamaño grueso a fino, el perfil es poroso.

Descripción del horizonte

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0-50 cm	Horizonte de color pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) de textura al tacto franco-arcillosa, ligeramente húmedo, consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, muy ligeramente ácido (pH 7 en H ₂ O), su estructura es subangular en bloques gruesa (20-50 mm) que rompe a fina (5-10mm) de grado moderado y estabilidad moderada, ligeramente pedregoso(1 al 5%) de piedras pequeñas (1-5cm), presenta comunes raíces (10 a 100 por 3dm ²) finas y delgadas (<1 a 3 mm ø); frecuentes poros (50 a 200 por dm ²) de morfología vesicular e intersticial localizados dentro y fuera de los agregados, límite marcado irregular

Anexo 2 Algunas características edafo-ecológicas de sitio de los perfiles estudiados

	Profundidad	CA	dCC	CC	Kf	
	fisiológica					
	Cm	%	L/m ²	L/m ²	cm/día	
S1	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	15	14	40.8	66	40-100
S2	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	49	12	147	238.2	40-100
S3	Dorso de ladera media de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno (con afloramientos rocosos)	25	12	76.7	126.2	40-100
S4	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	15	14	49.4	80	40-100
S5	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	23	12	67.7	111.4	40-100
S6	Superficie cumbral de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas-dacitas y andesitas del Mioceno	15	14	25.5	41.3	40-100
S7	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	15	12	37.2	61.2	40-100
S8	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	24	8	48	132	40-300
S9	Hombro de ladera superior de montaña de flujos lávicos de riolitas, dacitas y andesitas del Mioceno	50	8	99	272	40-300

CA= capacidad de aireación; dCC=capacidad de retención de agua disponible; CC=capacidad de campo

Anexo 3 a) Variables integradas en el análisis ACP y ACC b) estandarizadas

a)	Orient.	altitud	Pen.	evapo: preci	dCC: evapo	Prof. Fis	Vol. suelo	Piedras	Humedad	Poros	CA	dCC	Arcillas	D.a.	pH	M.O.	C:N	Ca:Mg	Ca:K	CIC	
		msnm	(°)			cm	Kg/dm ³	%	g/cm ³	%	%	%	%	g/cm ³		%					cmol(+) ⁺ kg ⁻¹
Sitio1	-0.643	2689	3	0.97	0.05	15	0.91	20	0.13	65	14	41	18.9	0.75	5.5	9.9	202.6	3.9	16.23	23.3	
Sitio2	0.766	2678	11	0.97	0.19	49	3.99	1	0.22	65	12	147	18.9	0.82	5.4	8	163.8	2.3	15.32	20.5	
Sitio3	0.956	2568	25	1.03	0.1	25	2.2	5	0.2	61	12	77	20.2	0.93	5.6	6.3	94.5	1	21.67	21	
Sitio4	-0.906	2680	13	0.97	0.06	15	1.3	5	0.28	57	14	49	22	0.91	5.7	10.9	77.9	2.7	16.44	27.3	
Sitio5	0.996	2701	3	0.97	0.09	23	1.74	5	0.14	63	12	68	19.4	0.89	5.4	7.3	43.7	1.2	27.38	28.4	
Sitio6	0	2703	4	0.97	0.03	15	0.36	75	0.12	51	14	26	18.9	1.06	5.4	12.9	176.2	2.1	14.44	25.6	
Sitio7	0.087	2685	10	0.97	0.05	15	1.18	20	0.09	52	12	37	17	1.04	5.4	7.1	122.4	2.7	29.29	20.5	
Sitio8	0.276	2679	26	0.97	0.06	24	2.09	5	0.15	58	8	48	19	0.915	6.8	9.3	152.5	2.7	71.58	20.5	
Sitio9	0.99	2654	20	0.97	0.13	50	5.4	1	0.13	55	8	99	19.5	1.0905	7	3.4	55.7	1.8	17.67	28.4	
\bar{x}		2671	13	0.98	0.08	26	2.13	15	0.16	59	12	66	19.31	0.93	5.8	8.3	121.0	2.3	25.6	23.9	
σ		41	9	0.02	0.05	14	1.60	23.6	0.060	5.29	2.33	37.84	1.32	0.11	0.63	2.78	56.27	0.88	18.07	3.51	

b)	Prof. Fis	Humedad	Poros	CA	dCC	Pen.	pH	M.O.	C:N	Ca:Mg	Piedras	altitud	Arcillas	CIC	D.a.	Ca:K	vol. suelo	evapo: preci	dCC: evapo	Orient.
Sitio1	-0.80	-0.57	1.36	1.01	-0.70	-1.15	-0.50	0.59	1.54	1.97	0.22	0.47	-0.34	-0.19	-1.73	-0.55	-0.81	-0.35	-0.70	-1.29
Sitio2	1.75	1.05	1.21	0.10	2.28	-0.21	-0.67	-0.13	0.81	0.01	-0.64	0.19	-0.36	-1.05	-1.07	-0.60	1.23	-0.35	2.28	0.67
Sitio3	-0.05	0.69	0.54	0.10	0.31	1.43	-0.33	-0.79	-0.50	-1.51	-0.46	-2.65	0.74	-0.88	-0.04	-0.23	0.05	2.83	0.31	0.94
Sitio4	-0.80	2.09	-0.28	1.01	-0.46	0.03	-0.17	0.98	-0.81	0.52	-0.46	0.24	2.14	1.01	-0.23	-0.54	-0.55	-0.35	-0.46	-1.66
Sitio5	-0.20	-0.39	0.82	0.10	0.06	-1.15	-0.67	-0.40	-1.46	-1.25	-0.46	0.78	0.10	1.35	-0.41	0.11	-0.26	-0.35	0.06	1.00
Sitio6	-0.80	-0.81	-1.56	1.01	-1.13	-1.03	-0.67	1.73	1.04	-0.20	2.69	0.83	-0.32	0.49	1.19	-0.65	-1.17	-0.35	-1.13	-0.39
Sitio7	-0.80	-1.22	-1.31	0.10	-0.80	-0.33	-0.67	-0.46	0.03	0.55	0.22	0.37	-1.85	-1.05	1.00	0.22	-0.63	-0.35	-0.80	-0.27
Sitio8	-0.12	-0.26	-0.07	-1.72	-0.50	1.55	1.67	0.37	0.59	0.52	-0.46	0.21	-0.27	-1.05	-0.18	2.70	-0.03	-0.35	-0.50	-0.00
Sitio9	1.82	-0.58	-0.71	-1.72	0.93	0.85	2.01	-1.88	-1.23	-0.62	-0.64	-0.43	0.16	1.35	1.48	-0.46	2.17	-0.35	0.93	0.99

Prof. Fis.=profundidad fisiológica; CA= capacidad de aireación; dCC=capacidad de retención de humedad; Pen.=pendiente; M.O.= materia orgánica;
C:N=relación carbono-nitrógeno; Ca:Mg= relación calcio-magnesio; CIC=capacidad de intercambio catiónico; D.a= densidad aparente; Ca:K= relación calcio-potasio
Vol. Suelo= volumen de suelo; evapo:preci= relación evapotranspiración-precipitación; orient.=orientación.