



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

“Tratamientos mineralógicos para incrementar el éxito de reforestación con *Pinus cembroides* y otras coníferas”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA

Presenta:

ROSA JUDITH AVIÑA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN REYES ÁNGELES CERVANTES

ASESORA EXTERNA:

DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

PROYECTO PAPIIT IN221614



México D.F., Mayo 2015



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.

Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimientos en primer lugar y por toda la importancia que para mí representa a la Universidad Nacional Autónoma de México por la gran oportunidad que me dio de acceder a un mundo de conocimiento y ciencia.

De igual manera agradezco a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por permitirme realizar mis estudios universitarios y completar mi formación profesional.

Al proyecto PAPIIT IN221614 por otorgarme la beca para la realización de esta tesis, muchas gracias.

Le doy las gracias a mi director de tesis Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes por todo su esfuerzo y dedicación. Me brindo su asesoría y sus conocimientos, pero además me enseñó la importancia de la seriedad, responsabilidad y el proceder de forma profesional, por todo eso usted fue un pilar importante en mi formación.

Me gustaría agradecer sinceramente a mi asesora de tesis Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena por el enriquecimiento de este proyecto a través de sus invaluable conocimientos, por compartir conmigo su experiencia y sobre todo por su gran calidad humana.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, en específico al Laboratorio de Génesis y clasificación de suelos por brindarme la oportunidad de realizar todos los análisis. De igual manera agradezco al M. en C. Patricio y a los laboratoristas Laurita, Luis, Juan, Pedro y Mario por la gran disposición de ayudarme.

A mis padres Guillermo Aviña y Juana Hernández, por el amor, la paciencia y todo el apoyo que a lo largo de mi vida me han brindado, MUCHAS GRACIAS. Espero que estén orgullosos de mis logros, y sepan que sin ustedes no serían posibles.

Dra. Fabiola Aviña (mi hermana) por su incondicional apoyo, esfuerzo y ejemplo con el que me acompañó durante mi carrera, te lo agradezco sinceramente.

A Jonathan Arriaga porque estuviste a mi lado aun en los momentos más difíciles y siempre me motivaste a seguir trabajando, gracias por ser el mejor compañero de mi vida.

A todos mis amigos y compañeros Diana Moreno, Juan Carlos Páez, Sergio Revueltas, Daniel, Maleny y Sandra por su apoyo y colaboración en el trabajo de campo y laboratorio de esta tesis, además de los buenos momentos que compartimos, Gracias. Al Biol. Jonathan Hernández por su apoyo y todos los consejos que me brindó durante el desarrollo de mi trabajo.

Quisiera dar un agradecimiento especial a mi amigo Javier Mirón Rivera, tú me apoyaste en este proyecto de principio a fin y eso para mí es invaluable, gracias por brindarme una amistad tan grata y fiel.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Concepto de suelo.....	3
2.2 Degradación de suelos.....	3
2.3 Andosoles.....	4
2.4 Rendzinas.....	5
2.5 Propiedades químicas del suelo.....	6
2.6 Propiedades hídricas del suelo.....	8
2.7 Micromorfología y porosidad el suelo.....	12
2.8 Cultivo de papa y su efecto en las propiedades de Andosoles.....	13
2.9 Efectos del fuego sobre rendzinas.....	14
2.10 Restauración ambiental y programas nacionales de reforestación.....	15
2.11 Estrategia PUMATL.....	16
Fase de diagnóstico.....	16
Fase de alternativas de solución.....	16
Aplicación de la estrategia PUMATL para restauración de suelos.....	17
3. PROBLEMÁTICA.....	18
Preguntas de investigación.....	18
4. HIPÓTESIS.....	19
5. OBJETIVOS.....	20
6. MÉTODO.....	21
6.1 Zonas de estudio.....	21
6.2 Descripción de las coníferas presentes en las reforestaciones.....	24

6.3 Aplicación de la estrategia PUMATL	28
<i>Selección de sitios de estudio</i>	28
<i>Evaluación de propiedades hídricas y físicas del suelo</i>	29
<i>Análisis micromorfológico</i>	32
<i>Toma de muestras de suelo y análisis químicos de suelo</i>	33
<i>Corrección de acidez del suelo con Hidróxidos</i>	36
<i>Aplicación del tratamiento con el hidróxido propuesto en campo</i>	37
<i>Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos sobre el desarrollo de las reforestaciones</i>	37
<i>Evaluación de la adición de hidróxidos sobre la microestructura y porosidad a través de secciones delgadas</i>	37
<i>Evaluación de infiltración e hidrofobicidad en suelos del bosque de pino piñonero de Cardonal, Hidalgo</i>	38
<i>Evaluación de supervivencia en reforestaciones con Pinus en Cardonal, Hidalgo</i>	39
6.4 Análisis estadístico	39
7. RESULTADOS	40
7.1 Diagnóstico de las propiedades hídricas y físicas	40
7.2 Diagnóstico de las propiedades químicas	44
7.3 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos sobre el pH del suelo	55
7.4 Evaluación del efecto de la adición de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm) sobre la micromorfología y porosidad de los terrenos agrícolas reforestados	56
7.5 Evaluación del efecto de la adición de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm) en supervivencia y crecimiento de reforestaciones	62
7.6 Evaluación de infiltración, hidrofobicidad y pH	68
7.7 Evaluación de supervivencia de Pinus en reforestaciones	68
8. DISCUSIÓN	70
8.1 Diagnóstico general caso I Parque Nacional Cofre de Perote	70
8. 2 Efectos de los tratamientos con KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm)	73
<i>Efectos de los tratamientos con KOH y Al(OH)₃ sobre sobre la microestructura y porosidad</i>	73

<i>Efectos de los tratamientos con KOH y AlOH3 sobre el crecimiento de los árboles.....</i>	<i>74</i>
8.3 Diagnóstico general caso II municipio de Cardonal, Hidalgo.....	76
9. CONCLUSIONES.....	79
10. LITERATURA CITADA.....	80
Anexo I.....	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Clases de infiltración ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).....	9
2. Clasificación del tiempo de penetración de una gota de agua (WDPT).....	10
3. Clasificación de pH.....	34
4. Porcentaje de materia orgánica.....	34
5. Nitrógeno inorgánico en el suelo (%).....	34
6. Fosforo disponible, método de Bray.....	35
7. Cationes intercambiables.....	35
8. Capacidad de intercambio catiónico.....	36
9. Corrección de acidez del suelo.....	37
10. Propiedades hídricas del suelo en bosques de coníferas y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.....	43
11. Propiedades químicas del suelo de los bosque de coníferas y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.....	53
12. Concentraciones de hierro y aluminio y porcentajes de materiales amorfos y cristalinos en suelos del Parque Nacional Cofre de Perote.....	54
13. Efecto de la adición de KOH (200 ppm) y $\text{Al}(\text{OH})_3$ [25 ppm] en porosidad y agregación en suelos de bosque de coníferas y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.....	58
14. Efecto de la adición de KOH (200 ppm) y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) en supervivencia y crecimiento de reforestaciones del Parque Nacional Cofre de Perote.....	63
15. Infiltración e hidrofobicidad en suelos y supervivencia de reforestaciones con <i>Pinus</i> en Cardonal, Hidalgo.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de localización de la región terrestre prioritaria 122, Pico de Orizaba-Cofre de Perote.....	21
2. Mapa de localización del municipio de Cardonal, estado de Hidalgo.....	23
3. Individuo de <i>Pinus cembroides</i> con desarrollo deficiente en zona reforestada de Parque Nacional Cofre de Perote.....	25
4. Individuo de <i>Abies religiosa</i> con escaso desarrollo en reforestación del Parque Nacional Cofre de Perote.....	26
5. Individuo de <i>Pinus ayacahuite</i> con desarrollo escaso de zona con reforestación en el Parque Nacional Cofre de Perote.....	28
6. Ubicación de Reforestaciones evaluadas del Parque Nacional Cofre de Perote.....	29
7. Diagrama del permeámetro Guelph 2800KI.....	30
8. Evaluación de las propiedades hídricas con Permeámetro Guelph en el Parque Nacional Cofre de Perote.....	31
9. Evaluación de hidrofobicidad con método WDPT en campo.....	31
10. Ubicación del cerro La Soledad y los sitios afectados por incendio Cardonal, Hidalgo.....	38
11A. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.....	46
11B. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.....	50
12. Efectos de la adición KOH (200 ppm) como alcalinizante.....	55
13. Muestras de sección delgada sin tratamiento de bosque de coníferas, TAAR, TAPA y TAPC.....	59
14. Muestras de sección delgada con adición de tratamiento KOH (200 ppm) de Bosque de coníferas, TAAR, TAPA y TAPC.....	60
15. Muestras de sección delgada con adición de tratamiento KOH (200 ppm) complementado con Al(OH) ₃ de bosque de coníferas, TAAR, TAPA y TAPC.....	61
16A. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200 ppm) y Al(OH) ₃ [25 ppm] de <i>Pinus ayacahuite</i>	64

16B. Evaluaciones sobre el crecimiento y supervivencia de la reforestación en árboles sin tratamiento de <i>Pinus ayacahuite</i>	65
17. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200 ppm) y Al(OH) ₃ [25 ppm] de <i>Pinus cembroides</i>	66
18. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200ppm) y Al(OH) ₃ [25ppm] de <i>Abies religiosa</i>	67

RESUMEN

Los bosques de coníferas del Parque Nacional Cofre de Perote, se sustituyen por el cultivo de papa y cuando disminuye su productividad son abandonados, generando la degradación del suelo. Algunos ejidatarios han reforestado los terrenos agrícolas abandonados (TAA); sin embargo, las plántulas de coníferas (*Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite* y *P. cembroides*) tienen baja supervivencia y desarrollo. Por otra parte los bosques de pino piñonero (*P. cembroides*) en el municipio de Cardonal, Hidalgo, fueron afectados por incendios en 2011 y posteriormente se reforestaron, de igual manera la supervivencia de plántulas es nula. La aplicación de hidróxidos en Andosoles ha mostrado efectos benéficos en el crecimiento y desarrollo de plántulas en zonas con reforestación; sin embargo, se desconoce sus efectos en TAA y zonas post-incendio, por lo anterior este trabajo tiene como objetivos: 1) Evaluar las propiedades edáficas de los suelos de TAA y zonas post-incendio; 2) Proponer estrategias de recuperación del suelo a partir del mejoramiento de su estructura con adición de hidróxidos y 3) Evaluar el efecto del mejoramiento de la estructura del suelo con hidróxidos, sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas de reforestaciones. En el Parque Nacional Cofre de Perote se localizaron 4 sitios: uno con bosque conservado y tres TAA con plantaciones de *A. religiosa*, *P. ayacahuite* y *P. cembroides*. Las tasas de infiltración y la hidrofobicidad se evaluaron *in situ*. Además, se tomaron tres muestras de suelo en cada sitio, para análisis químicos (pH, M.O, P, N, K, Ca, Mg, Na, Fe, Al, CIC y PSB) y tres muestras inalteradas, con cajas tipo Kubiena, para evaluar la microestructura. En Cardonal Hidalgo; además, se registró la supervivencia de reforestaciones para sitios afectados con distintos tipos de incendio, con evaluaciones en 60 cuadrantes de un metro en cada sitio. Los resultados muestran que los suelos de los TAA son fuertemente hidrófobos, moderadamente ácidos, con bajos valores de tasas de infiltración, materia orgánica, fósforo, nitrógeno, calcio y CIC. Por otra parte los suelos post-incendio del municipio de Cardonal mostraron suelos básicos, fuertemente repelentes, con disminuciones en la tasa de infiltración y retención de humedad lo que explica la nula supervivencia de las plántulas. Con base en los resultados anteriores se

diseñó un tratamiento con hidróxidos y se evaluó su efecto sobre la hidrofobicidad, infiltración y microestructura del suelo para los TAA. La aplicación de tratamientos de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ [25 ppm] produjeron la formación de microestructura granular y migajosa e incrementaron el pH hasta 6.8 y los porcentajes de porosidad aumentaron en más de 20%. Este mejoramiento de las propiedades favoreció el crecimiento de los individuos en reforestaciones de *P. cembroides*, *P. ayacahuite* y *A. religiosa* significativamente. La adición de Al(OH)₃, mejoro la microestructura del suelo, promovió la agregación, la porosidad y retención de humedad, lo cual brindo mejores condiciones para el establecimiento y crecimiento de las plantas en los terrenos reforestados; por lo cual se sugiere utilizar este tratamiento en los suelos básicos afectados por incendio bajo bosque de *Pinus cembroides*.

Palabras clave: reforestaciones, hidrofobicidad del suelo, hidróxidos, microestructura del suelo, incendios forestales.

1. INTRODUCCIÓN

En México, 44.9% de los suelos presentan algún nivel de degradación en donde la degradación química asociada a la deforestación y cambios de uso del suelo para actividades agrícolas y pecuarias representa 17.8%, seguida por la erosión hídrica con 11.9% del área total (SEMARNAT-CP, 2002).

La pérdida de bosques y selvas en el país, para el periodo 2005-2010 fue de 155,000 hectáreas anuales, siendo la principal causa el cambio de uso de suelo forestal a infraestructura básica y uso agrícola (Ulrich *et al.*, 2013).

Un factor asociado al cambio de uso del suelo son los incendios forestales, al utilizar el fuego como práctica para eliminar la vegetación original. Los incendios forestales durante el periodo 2012-2013 afectaron 15,618.06 ha (en 887 eventos) en el centro de la república y a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (CONAFOR, 2013).

Una alternativa de solución en estos sitios afectados es la reforestación; no obstante, en muchos casos la supervivencia de las plantas se ve reducida u ocurre un escaso desarrollo de las que sobreviven. Por lo que se requiere varias líneas de investigación para comprender los fenómenos involucrados e incrementar la tasa de supervivencia.

En este trabajo se ubicaron dos zonas contrastantes con Bosques de Coníferas:

1) Parque Nacional (P.N) Cofre de Perote, Veracruz, con Andosoles bajo bosque de coníferas con *Abies hickelii*, *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*, de clima templado semifrío y templado, con parcelas desmontadas para cultivo de papa y abandonadas. Esta zona fue reforestada con *Pinus cembroides*, *Abies religiosa* y *Pinus ayacahuite*, hace respectivamente 3, 5 y 8 años y presentan problemas de desarrollo y supervivencia

2) Cerro "La soledad" del Municipio de Cardonal, Hidalgo, con Rendzinas bajo bosque de *Pinus cembroides*, de clima semiárido, con franjas afectadas por incendios forestales en 2011 (aproximadamente 230 ha.), en las que se han

realizado reforestaciones con la misma especie, pero se desconoce el éxito de estas.

Estudios recientes han utilizado el tratamiento mineralógico en suelos para incrementar la supervivencia y el desarrollo de plántulas en reforestaciones basados en la estrategia propuesta por Ángeles-Cervantes (2010) denominada PUMATL (“puma” por su origen universitario y del Náhuatl “atl” agua). Este método consiste en el diagnóstico de las propiedades hídricas y químicas de los suelos degradados, con el objetivo de aplicar diferentes concentraciones de hidróxidos. Sin embargo, se desconoce los efectos de su aplicación en Andosoles afectados por uso agrícola, así como en Rendzinas afectadas por incendios forestales.

A partir de esto surgen las siguientes interrogantes para el P.N Cofre de Perote:

- ❖ ¿Qué valores presentan las propiedades hídricas del suelo (hidrofobicidad, infiltración, porcentaje de porosidad, porcentaje de retención de humedad y densidad aparente) en los sitios de estudio?
- ❖ ¿Qué valores presentan las propiedades químicas del suelo en los sitios de estudio?
- ❖ ¿La aplicación de hidróxidos permitirá mejorar el desarrollo (supervivencia, crecimiento, densidad y longevidad foliar) de las especies de importancia forestal de las reforestaciones?

Por otra parte, las interrogantes para los bosques afectados por incendios forestales en Cardonal Hidalgo son:

- ¿Qué porcentaje de éxito tienen las reforestaciones con *Pinus cembroides* en las diferentes condiciones post-incendio?
- ¿Qué valores de infiltración e hidrofobicidad presenta el suelo de los sitios en diferentes condiciones post-incendio zona con sequía y zona no afectada por incendio?

La respuesta a estas interrogantes permitirá determinar el grado de deterioro de las propiedades hídricas y químicas del suelo en estos sitios y establecer alternativas de solución para incrementar la restauración forestal, por medio del desarrollo de *Pinus cembroides*, *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*.

2. ANTECEDENTES

2.1 Concepto de Suelo

Dokuchaev (1899) define al suelo como un cuerpo natural formado por la acción común del material parental, el relieve, el clima, los organismos (vivos o muertos) y la edad de la superficie geológica. En tanto, la IUSS Working Group WRB (2006) brinda una definición más compleja del suelo: *“Cuerpo natural continuo que tiene tres dimensiones espaciales y una temporal. Los tres rasgos principales que gobiernan al suelo son los siguientes:*

- *Está formado por constituyentes minerales y orgánicos e incluye fases sólida, líquida y gaseosa.*
- *Los constituyentes están organizados en estructuras específicas para el medio pedológico. Estas estructuras forman el aspecto morfológico de la cubierta edáfica y de su dinámica y propiedades actuales. El estudio de las estructuras de la cubierta edáfica y de su dinámica facilita la percepción de las propiedades físicas, químicas y biológicas; permite también comprender el pasado y el presente del suelo, así como predecir su futuro.*
- *El suelo está en constante evolución, dando así su cuarta dimensión, el tiempo.”*

En México se presentan 26 tipos de suelo, que representan 87% de los suelos del mundo según INEGI (2015).

2.2 Degradación del suelo

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios (FAO, 2014).

Las intervenciones humanas que han provocado la degradación de los suelos son: deforestación y explotación de bosques, sobrepastoreo, manejo impropio de suelos agrícolas, sobreexplotación de la vegetación para usos domésticos y actividades industriales.

Los factores de degradación de los suelos se agrupan, según Lal y Steward (1990) y Lal *et al.* (1998), en físicos, químicos y biológicos. Ortiz-Solorio *et al.* (2011) en su estudio “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana” indica que 45% de los suelos en el país son terrenos que presentan algún grado de degradación, 25.86% sin uso aparente pueden estar degradados en forma natural y tan sólo el 28.6% son suelos estables. Señala también que la degradación química (principalmente como una disminución de la fertilidad del suelo por prácticas agrícolas) ocupa el primer lugar con 34.04 millones de hectáreas (17.8% del territorio nacional), seguida por la erosión hídrica en 22.72 millones de hectáreas (11.9%), eólica en 18.12 millones de hectáreas (9.5%) y la degradación física en 10.84 millones de hectáreas (5.7%).

Los suelos de tipo Andosol generalmente muestran una alta resistencia a la erosión hídrica, fuertemente relacionada con sus propiedades físicas como: alta porosidad, tasas de infiltración rápidas y alta estabilidad de agregados, siempre que se mantenga la cubierta vegetal original (Poulenard *et al.*, 2001). No obstante cuando un Andosol ha sido sometido al cambio de uso de suelo forestal a agrícola incrementa su posibilidad de sufrir procesos erosivos severos.

2.3 Andosoles

Son suelos que se caracterizan por propiedades muy específicas como carga variable, alta retención de fosfatos, baja densidad aparente, sistema de poros inter e intra-agregados bien definido, alta conductividad hidráulica, agregados del suelo estables y gran capacidad de contracción (Dörner *et al.*, 2011).

La formación de un Andosol es un proceso muy rápido resultante de la gran área superficial de la ceniza volcánica. El proceso inicial es la hidrólisis que intemperiza la ceniza volcánica inicialmente en palagonita amarilla, parda o anaranjada. La ceniza volcánica está compuesta de minerales fragmentados y de ellos predomina el vidrio volcánico, el cual muestra muy poca resistencia al intemperismo químico. Los minerales secundarios que se forman son aluminosilicatos no cristalinos en los que predominan alófano ($\text{Al}_2\text{SiO}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$),

imogolita, ferrhidrita y complejos de humus-aluminio. Los suelos con alófono conservan una carga eléctrica permanente baja y una carga eléctrica alta subordinada al pH, por lo que se les califica de carga eléctrica variable (Fitzpatrick, 1993).

En el P.N Cofre de Perote, los Andosoles úmbricos cubren 83% de la superficie y la vegetación predominante es de Bosques de Coníferas. Campos-Cascaredo (2004) menciona que estos bosques presentan una alteración ecológica grave debido a la conversión a tierra agrícola. En esta región la papa se ha cultivado desde 1930. Actualmente, la zona ha perdido la productividad como tierra agrícola presentando grandes extensiones de suelos degradados (Núñez-Sánchez *et al.*, 2003).

Los Andosoles húmicos pueden tener un horizonte úmbrico de textura migajón limosa o más fina. En condiciones naturales se encuentra en su superficie hojarasca suelta que descansa sobre un horizonte superior Ah, muy humoso, de color pardo oscuro a negro, migajoso o granular. Ese horizonte pasa en forma gradual al horizonte medio B cámbico, de color pardo o pardo amarillento de estructura angular a subangular de bloques. Con la profundidad, el horizonte medio pasa gradualmente a ceniza volcánica relativamente inalterada (Fitzpatrick, 1993)

En suelos de tipo Andosol el proceso de erosión es muy acentuado, pues es considerado un suelo frágil una vez que la vegetación original es removida y éste queda expuesto (Krasilnikov *et al.*, 2013).

2.4 Rendzinas

Son suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad; por tanto su nombre proviene del polaco rzedzic: ruido. Estos suelos se presentan en climas semiáridos, tropicales o templados. Para la WRB (2007), estos suelos están dentro del grupo de los Leptosoles.

Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente, las Rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos por debajo

de los 25 cm sobre la roca. Si se desmontan se pueden usar en la ganadería con rendimientos bajos a moderados pero con gran peligro de erosión en laderas y lomas. El uso forestal de estos suelos depende de la vegetación que presenten, pero llegan a soportar vegetación de bosques de pino-encino, así como en selva baja y selva alta perennifolia.

Su pH varía entre grados ligeros de acidez y alcalinidad, y la capacidad de absorción va de moderada a muy alta, con cationes intercambiables de calcio y magnesio en cantidades altas y bajas de potasio. La materia orgánica que aporta la vegetación forma con el material parental intemperizado un complejo calcio humus, de color oscuro. Tienen textura de migajón arenoso, migajón arcilloso o de arcilla; estructura granular, migajosa o en bloques sub-angulares, de tamaño fino a grueso, que permite una rápida infiltración (WRB, 2007).

2.5 Propiedades químicas del suelo

El estudio de las propiedades químicas es necesario para conocer la calidad del suelo en relación con la sostenibilidad de las funciones de los ecosistemas forestales (Schoenholtz *et al.*, 2000). En Andosoles estas propiedades son determinadas por la naturaleza de su fracción coloidal. En ambientes fríos y húmedos se ha observado que la fracción coloidal de estos suelos está constituida por complejos de humus-aluminio o por alófono/imogolita los cuales se clasifican como minerales de rango corto.

a) *El potencial de hidrógeno (pH)*: es la medida de la acidez o alcalinidad de la solución del suelo. Esta propiedad puede influir en la absorción nutritiva y crecimiento de las plantas. Los valores reportados para Andosoles son de 5.84 en el P.N Desierto de los Leones (González-Vargas, 2011), 4.64 a 5.97 en el P.N Cofre de Perote (Cruz y Geissert, 2000), y 6.5 a 7.5 en las Islas Canarias (Armas *et al.*, 2003). Por otra parte, para Rendzinas en Cardonal, Hidalgo (Ángeles-Cervantes, 1984) registró pH de 7.0 a 7.7.

b) *Materia orgánica (MO)*: es el conjunto de restos de origen animal o vegetal que se incorporan al suelo y que están sujetos a la biodegradación, mineralización y producción de compuestos orgánicos sencillos. Los Andosoles

húmicos se presentan en áreas forestales poco alteradas y cuando los contenidos de materia orgánica son altos hay formación de complejos húmicos con alófano o complejos órgano-metálicos de Fe y Al (Ortiz-Solorio, 2010). En Rendzinas bajo bosque de pino piñonero se registró 32% de materia orgánica (Ángeles-Cervantes, 1984).

c) *Nitrógeno total (Nt)*: las fuentes de nitrógeno en suelos son la materia orgánica y el nitrógeno de la fase gaseosa del suelo. Este elemento se encuentra en forma de Nitrógeno orgánico, Nitrógeno amoniacal, Nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). El nitrógeno orgánico ingresa al suelo por restos orgánicos en descomposición y representa 83% de N total del suelo. El nitrógeno amoniacal retenido en las arcillas del suelo es lentamente disponible para las plantas; mientras que los nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) son aprovechables inmediatamente por las plantas. Meza y Geissert (2006) determinaron mayor abundancia de N total en horizontes superficiales (0.34%) contra suelos cultivados (0.27%). Ángeles-Cervantes (1984) encontró valores de 0.35 a 1.5% de nitrógeno total en Rendzinas bajo bosque de Pino piñonero.

d) *Fósforo disponible (P)*: el poder de fijación del fósforo en muchos suelos es tan grande que la regulación del aprovechamiento del fósforo es uno de los problemas más difíciles en el manejo del suelo y los cultivos. Hernández-Ordoñez (2004) registró 0.22 ppm en zona erosionada y 2.31 ppm en zona con bosque. Por su parte Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) obtuvieron 0.05 ppm de fósforo disponible en tepetates, mientras que en Rendzinas, bajo bosque de pino piñonero, Ángeles-Cervantes (1984) registró hasta 440 ppm.

e) *Cationes intercambiables*: los cationes aprovechables por las plantas se encuentran en la solución del suelo y adsorbidos por los coloides minerales y orgánicos y determinan la fertilidad del suelo. Para el P.N el Chico (Ángeles-Cervantes, 2010) determinó para Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , valores de 16.68; 3.16; y 0.01 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. Para K^+ se reporta 0.11 y 0.85 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Cofre de Perote (Campos-Cascaredo *et al.*, 2001; Meza y Geissert 2006). En bosque de pino piñonero con suelo Rendzina se registró 190 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Ca^{2+} , 35 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Mg^{2+} y 1.6 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Ángeles-Cervantes, 1984).

f) *Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Porcentaje de saturación de bases (PSB)*: Los suelos contienen cantidades variables y clases diferentes de arcilla y materia orgánica, de modo que la CIC total varía ampliamente. La materia orgánica tiene una CIC alta, por lo que los suelos con un alto contenido de materia orgánica presentan por lo general una CIC mayor que la de los suelos con un bajo contenido de materia orgánica. Ángeles-Cervantes (1984) encontró una CIC de $99 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Rendzinas de Hidalgo bajo bosque de pino piñonero.

g) *Fe y Al intercambiables*: Cruz y Geissert (2000) menciona que los Andosoles del Cofre de Perote exhiben carga variable la cual está relacionada principalmente con los contenidos de Fe^{3+} y Al^{3+} activos y porcentajes de Al^{3+} extractable en ditionito de 0.41 a 2.35 y Fe de 0.29 a 2.39%. Campos-Cascaredo (2004) con esta metodología determinó que el porcentaje de Al^{3+} es de 2.16 a 3.45% y de Fe^{3+} de 1.13 a 2.94%.

Las propiedades químicas del suelo varían dependiendo del tipo de suelo y su historia ecológica y de manejo.

2.6 Propiedades hídricas del suelo

La vitalidad y el crecimiento forestal se relacionan con la disponibilidad de agua y por lo tanto con las propiedades hídricas del suelo, las cuales determinan la capacidad del suelo para transmitir, conducir y almacenar agua; además, son las responsables de la retención de humedad y el flujo hídrico pluvial hacia los mantos acuíferos.

Estas propiedades son la conductividad hidráulica saturada (Kfs), tasa de infiltración, tamaño y distribución de poros, densidad aparente y retención de humedad (Lipiec *et al.*, 2009). El déficit hídrico es el factor limitante de mayor importancia para los bosques y sus plántulas ya que tiene influencia en la disponibilidad de los nutrientes y en su pérdida por lixiviación (Van der Salm *et al.*, 2007).

Las vinculaciones entre las plantas y el ambiente abiótico es a partir del ciclo hidrológico (Peters *et al.*, 2005), y la relación entre el clima y las propiedades

del suelo es a través de las propiedades hídras del mismo, lo que se conoce como Ecohidrología (Diez-Hernández, 2008).

a) *Infiltración*: es el proceso de entrada de agua al suelo; y la capacidad de infiltración es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de tiempo, expresada en $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ (Maderey, 2005). A nivel internacional el departamento de agricultura de los Estados Unidos ha generado una clasificación, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clases de infiltración ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)

Clase	$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Muy rápida	>508
Rápida	152.4 a 508
Moderadamente rápida	50 a 152.4
Moderada	15.24 a 50
Moderadamente lenta	5.0 a 15.24
Lenta	1.524 a 5.0
Muy lenta	0.038 a 1.524
Impermeable	< a 0.038

Fuente USDA 2001.

En suelos del Cofre de Perote, Muñoz-Villers *et al.* (2011) obtuvieron que la transformación de bosque a pastizal reduce la capacidad de infiltración de $292 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y la tasa de infiltración pasó de rápida a moderadamente rápida. Por su parte, Meza y Geissert (2006) reportaron una tasa de infiltración de $600 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y de $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ para suelos forestales y no forestales respectivamente pasando de la clase muy rápida a muy lenta. Estos estudios indican que el cambio de uso de suelo de bosque a terrenos de cultivo afecta la infiltración, el ciclo del agua y la recarga de acuíferos y puede limitar la regeneración de los bosques.

A nivel internacional, Harden y Scruggs (2003) evaluaron infiltración en un bosque mixto en las montañas Apalaches y encontraron un intervalo de 16 a $117 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; es decir, de lenta a moderadamente lenta. Zehetner y Miller (2006) determinaron una infiltración moderadamente rápida de $56.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en un bosque de Ecuador.

En Rendzinas se desconocen las tasas de infiltración y los efectos del fuego sobre las mismas. Los trabajos realizados en suelos bajo Bosque de Pino piñonero son escasos y se han descrito tasas de $667.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, correspondiente a la clase muy rápida (Shukla *et al.*, 2006).

Autores como Morgan *et al.* (1997) afirman que la vegetación representa un factor importante en el incremento de la capacidad de infiltración del suelo.

b) *Hidrofobicidad*: es la repelencia al agua por parte del suelo cuando un suelo no se moja de manera espontánea (Müller *et al.*, 2010). La clasificación para los niveles hidrofobicidad, por el método de Water Drop Penetration Time (WDPT), fue establecido por Dekker y Jungerius (1990) revisado en Duque *et al.* (2004) como se reporta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación del Tiempo de penetración de una gota de agua (WDPT).

Segundos	Nivel de repelencia al agua	Clase/ Persistencia
< 5	No repelente	0
50-60	Ligeramente repelente	1
60-600	Fuertemente repelente	2
600-3600	Severamente repelente	3
>3600	Extremadamente repelente	4

Fuente Dekker y Jungerius (1990) en (Duque *et al.*, 2004).

La hidrofobicidad está presente en muchos tipos de suelo y dependiendo de su severidad puede reducir la tasa de infiltración y favorecer el flujo superficial aumentando el riesgo de erosión (Letey *et al.*, 2000; Zavala *et al.*, 2010). La repelencia al agua es generada principalmente por compuestos orgánicos producidos por plantas vivas o en descomposición y microorganismos, por las tasas de mineralización del suelo y por incendios forestales (Doerr *et al.*, 2000; Jordan *et al.*, 2009).

En los suelos afectados por incendios se ha encontrado que la tasa de infiltración se reduce debido a la formación de capas repelentes o hidrófobas

(DeBano, 1989), a las partículas de ceniza que obstruyen los poros superficiales (Mallik, *et al.*, 1984) o a la generación de costras impermeables (Fox *et al.*, 2004).

Un componente no biótico que origina o destruye la hidrofobicidad es el fuego. DeBano (1981) menciona que después de un incendio la repelencia al agua puede manifestarse como una capa de espesor y continuidad variable en la superficie del suelo o a unos pocos centímetros de profundidad.

Aldana-Pérez (2012) evaluó hidrofobicidad por este método en Andosoles del Parque Nacional Izta-Popo y obtuvo un tiempo de 8.66 segundos ligeramente repelente. Por otra parte, Jiménez-Cruz (2011) reportó para el P.N Cumbres de Ajusco hidrofobicidad severamente repelente con un tiempo de 1690.8 segundos y Hernández-Ordoñez (2014) registro desde 1.5 segundos en zona erosionada hasta 825 en bosque, correspondientes a las clases no repelente y severamente repelente.

En España, Zavala *et al.* (2009) registraron una hidrofobicidad extremadamente repelente en muestras de suelo colectadas bajo pinos y eucaliptos.

No se han encontrado estudios sobre hidrofobicidad en Rendzinas.

c) *Densidad aparente (DA)*: es definida como la relación de la masa de suelo entre el volumen total del mismo, considerando el espacio entre las partículas del suelo. Es un indicador de la compactación del suelo y se calcula con el peso seco del suelo dividido por su volumen ($DA=ms/Vt$), se expresa en $g \cdot cm^{-3}$.

En México, Meza y Geissert (2006) indicaron una DA de $0.7 g \cdot cm^{-3}$ para una zona de uso forestal en el volcán Cofre de Perote; en tanto, Ángeles-Cervantes (2010) registró una DA de $0.65 g \cdot cm^{-3}$ en Andosoles del P.N El Chico, Hidalgo. Thomas *et al.* (1999) evaluaron densidad aparente para un Leptosol úmbrico bajo bosque de pino de $0.67 g \cdot cm^{-3}$ en zona afectada por incendio y encontraron una DA de $0.63 g \cdot cm^{-3}$ en zona no afectada por incendio.

e) *Textura*: se refiere a la distribución de tamaños de partículas minerales que componen el suelo. Meza y Geissert (2006) reportan una textura de tipo

migajón-limoso, con predominio de los limos gruesos (26% a 63%) para Andosoles del Cofre de Perote. Los horizontes superficiales forestales tienen una proporción de 20% arena; mientras que en zonas cultivadas es de 28% y la proporción de arcilla es menor (14.1% y 6.7%). Ángeles-Cervantes (1984) evaluó la textura de Rendzinas bajo bosque de pino piñonero y encontró los tipos texturales arcilloso, franco arcilloso y franco arenoso. Thomas *et al.* (1999) describieron la textura de un Leptosol úmbrico como franco arenoso a franco arcilloso.

2.7 Micromorfología y porosidad del suelo

La micromorfología se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes de los suelos a un nivel microscópico (Gutiérrez y Ortiz, 1999). Ofrece datos exactos *in situ* de la zona de estudio a través de muestras inalteradas y resulta útil para observar y valorar el grado de perturbación o efectos ecológicos sobre un sitio en particular.

Estructura y porosidad se refieren a la distribución espacial y a la organización total del sistema del suelo, expresados por el grado y tipo de agregación y por la naturaleza y distribución de los poros y espacios porosos. En la mayoría de los suelos las partículas individuales no existen como entidades discretas sino que están agrupadas en agregados o pedos de formas y tamaños bastante característicos. El grado y tipo de agregación determinan la aireación y la permeabilidad y, por tanto, la capacidad de infiltración y de movimiento del agua (Fitzpatrick, 1985).

La porosidad incluye a todos los espacios vacíos del suelo. Los poros están relacionados con el arreglo de los constituyentes primarios del suelo, los patrones de enraizamiento, madrigueras de animales o algunos otros procesos de formación de suelos, como agrietamientos, translocaciones y lixiviaciones. Los poros se pueden dividir por: modo de formación, tamaño, forma, arreglo y continuidad (Pape y Lager, 1994). En relación al tamaño existen, microporos (< 30 μm) que no se pueden ver a simple vista y que se presentan en todos los suelos., los cuales determinan en gran medida el almacenamiento de humedad. Los

macroporos que se observan a simple vista, se clasifican en los siguientes tipos: intersticiales, vesículas, cavidades, canales y planos (Ortiz-Solorio, 2010).

Estudios micromorfológicos realizados en Andosoles han sido llevados a cabo en Cofre de Perote por Campos-Cascaredo *et al.* (2001); Meza y Geissert (2006) para estudiar la estructura y la porosidad. Estos autores describieron agregados granulares finos y muy finos además de bloques subangulares y una porosidad de 65% en suelos de uso forestal. Ángeles-Cervantes (2010) realizó estudios micromorfológicos en el Parque Nacional el Chico y encontró agregados en bloques subangulares y poros tipo fisura y un porcentaje de porosidad total de 49.6%. No se ha encontrado registros de micromorfología y porosidad en suelos de tipo Rendzina bajo bosques de pino piñonero.

2.8 Cultivo de papa y su efecto en las propiedades de Andosoles

El monocultivo de papa es una práctica muy extensa en Andosoles del P.N Cofre de Perote que se realiza desde hace más de 50 años. Meza y Geissert (2003) estudiaron los efectos del cambio de uso del suelo de forestal a agrícola en Andosoles del Cofre de Perote sobre la estabilidad y distribución de los agregados de acuerdo al tamaño, así como porcentajes de porosidad. Sus resultados mostraron una reducción de 18% en la estabilidad estructural (EE) en suelo cultivado con respecto al suelo forestal y porcentajes de microporosidad de 28% y 30% en suelos cultivados y forestales respectivamente.

Volker (2012) monitoreó en Suiza los efectos negativos de los monocultivos sobre los procesos erosivos en los suelos y encontró que el cultivo de trigo genera una erosión promedio de $3.05 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, que representa una pérdida total de suelo de 33%. El segundo cultivo con mayor erosión fue la papa con 26% con una media de $2.87 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Neumann *et al.* (2012) realizaron un estudio para determinar las pérdidas de nitrógeno (N) y fósforo (P) por lixiviación en suelos arenosos cultivados con papa. Las pérdida anual de N, entre mayo (2007) y abril (2008), varió entre 13 y 72 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la rotación de papa-cereal-triticale. En esta misma rotación de cultivos las pérdida anual de P estuvo entre 0.04 y 0,24 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Estos estudios demuestran que las prácticas agrícolas de monocultivo de papa realizadas en P.N Cofre de Perote pueden generar afectaciones a las propiedades químicas del suelo; sin embargo, aún se desconocen los efectos sobre las propiedades hídricas y micromorfológicas (estructura y porosidad) en terrenos agrícolas abandonados que actualmente se encuentran reforestados con especies forestales.

2.9 Efectos del fuego sobre Rendzinas

El fuego es un factor de perturbación importante en muchos ecosistemas, ya que puede generar modificaciones en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Los efectos más típicos de incendios de alta severidad son: 1) pérdida de materia orgánica y nutrientes a través de la volatilización, la lixiviación y la erosión; 2) alteraciones cuantitativas y cualitativas de las comunidades microbianas; y 3) el deterioro de la estructura del suelo al afectar la estabilidad de agregados (Mataix-Solera *et al.*, 2011)

Los efectos del fuego sobre la erosión del suelo dependen de factores como: 1) la intensidad y la duración del fuego, 2) la cantidad de materia orgánica fresca (litter), 3) la cubierta de ceniza (espesor y tipo de ceniza), que puede variar sustancialmente dependiendo del grado de combustión de la vegetación y las especies quemadas (Zavala *et al.*, 2009).

Un estudio realizado por Inbar *et al.* (2014) en Rendzinas de Israel describen el comportamiento de las propiedades en suelos sin disturbio y suelos afectados por incendio; sus resultados no mostraron modificaciones en el pH siendo de 7.4 y 7.5 respectivamente y la capacidad de intercambio catiónico pasó de 23.5 a 20.9 $\text{Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las tasas de infiltración presentaron diferencias significativas con valores cercanos a $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en zona quemada y $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en suelo sin disturbio. Los suelos se clasificaron como no repelentes en ambos sitios ya que presentaron persistencia a la repelencia de menos de 5 segundos. En cuanto a la estabilidad de agregados se observó que el calentamiento del suelo produjo la deshidratación de arcillas 2:1 y la transformación de compuestos de hierro y óxidos de aluminio que actuaban como agentes de cementación.

Granged *et al.* (2011) realizaron un estudio en un Leptosol de España y registraron un incremento del pH en condiciones post-incendio pasando de 6.2 a 7.5 respecto al suelo no quemado; sin embargo, el pH tiende a acidificarse hasta los niveles originales tres años después del incendio. La repelencia al agua medida en porcentaje fue mayor antes del incendio con 15.4% y disminuyó hasta 2.2% después de la exposición al fuego. Esta propiedad también regresa a los valores originales luego de tres años.

Estos estudios indican que las Rendzinas son susceptibles a la modificación de las propiedades químicas e hídricas del suelo cuando son sometidos a incendios forestales. Sin embargo, se desconoce los efectos de los incendios en la capacidad de regeneración de la cobertura vegetal de Rendzinas.

2.10 Restauración ambiental y programas nacionales de reforestación

La restauración ambiental es un proceso de asistencia instrumentado y dirigido por el ser humano para disminuir o mejorar las condiciones de degradación, daño o destrucción de los ecosistemas, con la finalidad de conducirlos a un estado arbitrariamente escogido que se considera presenta mejores condiciones ambientales. En este proceso se trata de restablecer la estructura y las funciones que permiten recuperar los servicios ambientales de suministro, de regulación o culturales, e incluso la salud e integridad del ecosistema (Cervantes *et al.*, 2008).

En México, existe el programa PRONAFOR referente a conservación de ecosistemas, el cual proporciona incentivos a los poseedores de recursos forestales para actividades de protección, conservación, restauración y sanidad forestal así como para su aprovechamiento sustentable, dando énfasis al mantenimiento de los árboles plantados (CONAFOR, 2013).

Los factores más importantes que inciden en la supervivencia de las plantas reforestadas son, en orden de importancia: a) condiciones de sequía (déficit hídrico del suelo) en un 30% de los casos, b) fecha inapropiada de plantación 18.7% y c) mala calidad morfológica de la planta 9.0% (COLPOS-SEMARNAT, 2008).

La superficie reforestada en México, en el año 2011, fue de 226,838 hectáreas (Ulrich, 2013); sin embargo la supervivencia fue nula en estas reforestaciones, lo que se atribuyó a que fue el año más seco dentro del periodo denominado la sequía del milenio (Giner y Fierro, 2012), por ello es importante investigar como restaurar las propiedades hídricas del suelo, sobre todo la retención de humedad ya que el déficit hídrico es la causa más importante de mortalidad en las reforestaciones. Estos estudios permitirán proponer estrategias para incrementar la supervivencia y el desarrollo de las plantas.

2.11 Estrategia PUMATL

La estrategia PUMATL ha sido desarrollada en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza en el laboratorio de Ecología de Bosques e Hidrología, a cargo del Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes y consiste en:

Fase de diagnóstico

- Detección de los sitios con problemas de crecimiento arbóreo debido a la baja supervivencia de plántulas en las reforestaciones, menor crecimiento de plantas con respecto a las plantas que crecen en bosque y menor densidad y longevidad foliar.
- Evaluación de propiedades hídricas: infiltración, conductividad hidráulica, potencial de flujo mátrico e hidrofobicidad.
- Colecta de muestras de suelo alteradas en estructura para el análisis de las propiedades químicas y físicas y muestras inalteradas en estructura para análisis micromorfológico y de porosidad.

Fase de alternativas de solución

- Obtención de tipo y concentración del hidróxido necesario para la corrección de acidez del suelo.
- Aplicación de tratamiento propuesto, tanto en campo como en muestras inalteradas.
- Evaluación del efecto de la adición del tratamiento sobre el desarrollo de las reforestaciones.

- Evaluación de la adición del tratamiento sobre la microestructura y porosidad a través de secciones delgadas.
- Análisis estadístico y conclusiones.

Aplicación de la estrategia PUMATL para restauración de suelos

La adición de hidróxidos es una alternativa que incrementa el pH, promueve la agregación, la retención de humedad y disminuye la hidrofobicidad en Andosoles (González-Vargas 2011; Aldana-Pérez 2012).

McMurry (2008) señala que los hidróxidos son bases fuertes, que incrementan el pH; mientras que los iones OH^- que se encuentran presentes en la solución básica reaccionan con los aceites orgánicos dando lugar a un proceso de saponificación debido a la hidrolización de los ésteres, eliminando la hidrofobicidad e incrementando la disponibilidad de agua.

Al respecto González-Vargas (2011) reportó para Andosoles del P.N. Desierto de los Leones que la adición de KOH en (30 ppm) incrementó el pH del suelos de 5.8 a 6.8, el tratamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en (10 ppm) incrementó los niveles de fósforo disponible de 3.15 a 5.46 ppm y la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) triplicó la producción de biomasa de yemas apicales en reforestaciones de *Abies religiosa*.

Por su parte, Aldana-Pérez (2012) en el Parque Nacional Izta-Popo encontró que la aplicación de hidróxidos como KOH (30 ppm) favorece la agregación del suelo y por lo tanto incrementan su retención de humedad registrando aumentos en la porosidad de 22 a 34.5% y la retención de humedad de 1.4 a 2.9%.

Farrell *et al.* (2010) realizaron un proyecto de restauración ecológica sensible para la degradación de tierras cultivadas que han sufrido cambios en la composición y estructura del suelo. Observaron que un método convencional de compostaje con la adición de hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) incrementó el pH de 4.5 a 8.5 y redujo la retención de fosfatos mediante la formación de compuestos solubles de P en el suelo.

3. PROBLEMÁTICA

Las laderas húmedas frías del P.N Cofre de Perote se encuentran entre 2600 y 4000 msnm y desempeñan un importante papel en la interceptación de la lluvia y la niebla, por lo que es importante el mantenimiento, protección y recuperación de las propiedades hídricas y químicas de los suelos en estas áreas.

Los principales problemas que ocurren en la región son el incremento de la frontera agrícola, la deforestación, el pastoreo y la quema de bosques. En la actualidad, son cada vez más las áreas deforestadas que se utilizan principalmente para el cultivo de papa. Derivado de estos factores en los últimos años se han incrementado los niveles de erosión en las zonas deforestadas.

Otro problema importante es el abandono de los terrenos agrícolas que han perdido su productividad, muchos de los cuales se convierten en pastizales que no benefician al servicio ambiental hidrológico de la región. Por otra parte, en algunos de los TAA se ha intentado reforestar con especies de importancia forestal como algunas coníferas; sin embargo, el desarrollo de las plantas es deficiente debido a que no se realizan labores de restauración ecológica previas a la reforestación.

En 2011 en el cerro La Soledad, estado de Hidalgo ocurrieron incendios que afectaron 230 hectáreas de bosque de *Pinus cembroides*. Las zonas afectadas fueron reforestadas pero sin éxito, por lo que surgen las siguientes:

Preguntas de investigación

¿Cuáles son los valores de las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas de los suelos bajo bosque de coníferas?

¿Qué valores de las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas presentan los suelos en los terrenos agrícolas reforestados?

¿Qué valores presenta la infiltración e hidrofobicidad en sitios post-incendio y sitio no afectado de Cardonal, Hidalgo?

¿El tratamiento con hidróxidos puede incrementar el éxito de la reforestación con *Pinus cembroides* y otras coníferas tanto en suelos erosionados como afectados por incendio?

4. HIPÓTESIS

La aplicación de hidróxidos en los suelos afectados por la deforestación para el uso agrícola en Andosoles del Parque Nacional Cofre de Perote modificará las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas del suelo, lo que permitirá el incremento del desarrollo de tres especies de importancia forestal en los terrenos reforestados.

En bosques afectados por incendios las propiedades hídricas son alteradas y contribuyen a la baja supervivencia de *Pinus cembroides*.

5. OBJETIVOS

1. Determinar las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas de los suelos bajo bosque de coníferas y en suelos de terrenos agrícolas reforestados.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de hidróxidos sobre las propiedades en los suelos de terrenos agrícolas reforestados, como parte de la estrategia PUMATL.
3. Evaluar el efecto de la aplicación de hidróxidos (estrategia PUMATL) en el desarrollo (supervivencia y crecimiento longitudinal) de tres especies de importancia forestal en los terrenos agrícolas reforestados.
4. Determinar la infiltración e hidrofobicidad en sitios post-incendio y sitios sin disturbio.
5. Evaluar la supervivencia de reforestaciones con coníferas en sitios post-incendio y sitios sin disturbio.

6. MÉTODO

6.1 Zonas de estudio

1. El Parque Nacional Cofre de Perote, se encuentra en el estado de Veracruz de acuerdo con la carta de la Región Terrestre Prioritaria 122 de CONABIO (Arriaga *et al.*, 2000) (Figura 1). Es un parque que está en contacto entre las zonas tropicales húmedas del este, templadas al norte y semiáridas al oeste. Esta zona es importante por su gran diversidad ecosistémica e incluye el ANP Pico de Orizaba.

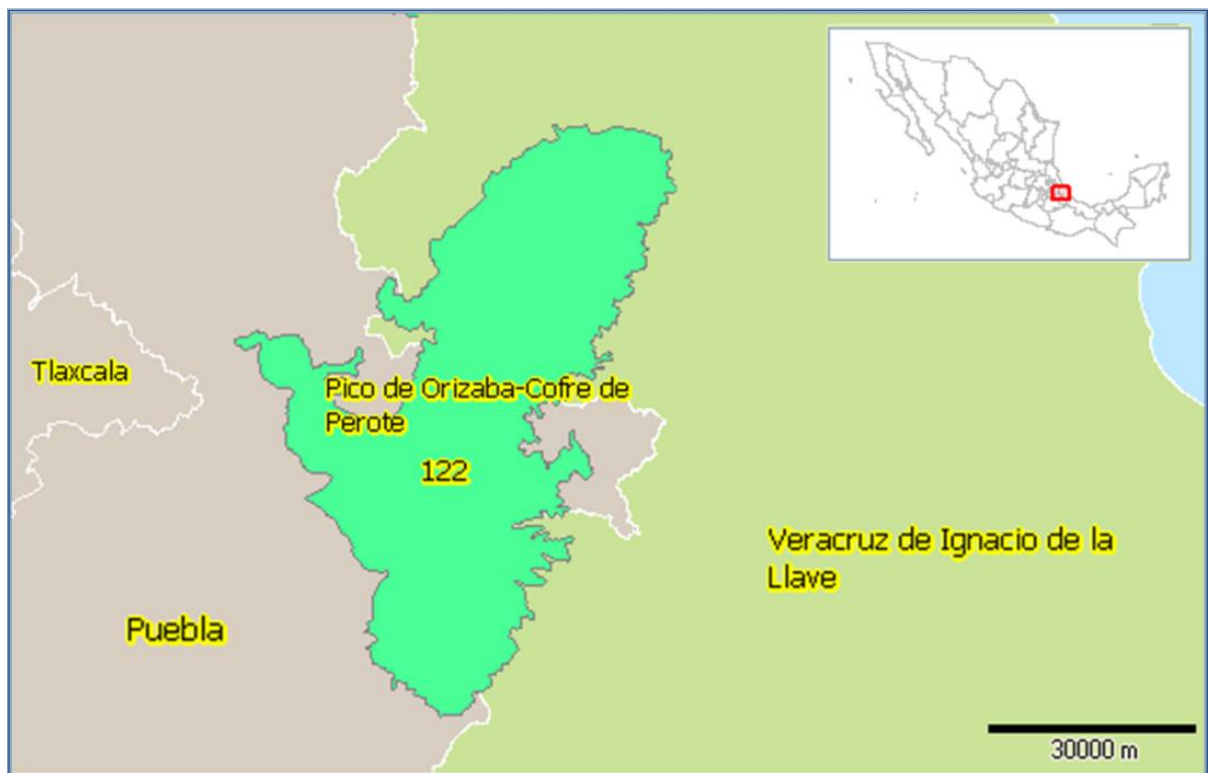


Figura 1. Mapa de localización de la Región Terrestre Prioritaria 122, Pico de Orizaba-Cofre de Perote.

a) *Edafología*: los suelos son Andosoles úmbricos que cubren 83% de la superficie del P.N Cofre de Perote, tienen una proporción relativamente alta de hierro y aluminio en la fracción de tierra fina y una alta retención de fosfatos hasta una profundidad de 35 cm. El subtipo úmbrico tiene una textura franco limosa y no

se satura de agua en ninguna época del año; posee un horizonte A con grado de saturación menor de 50% y con relativamente alto nivel de contenido de carbono orgánico y un horizonte B de alteración, color claro y bajo contenido de materia orgánica (WRB, 2007).

b) *Clima*: se clasifica en dos tipos de acuerdo con García (1998) 1) Cb'(w2) templado, semifrío, con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, menos de cuatro meses con temperatura mayor a 10°C, subhúmedo, precipitación anual entre 200 y 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual; 2) C(m)(f) templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente 12°C a 22°C, precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano mayores al 10.2 % anual.

c) *Vegetación*: los principales tipos de vegetación y uso del suelo representados en esta región, así como su porcentaje de superficie son: agricultura, pecuario y forestal (42%), bosque de pino (38%), bosque mesófilo de montaña (7%), bosque de oyamel (6%), otros (7%). El tipo de vegetación predominante a altitudes de 3000-3600 msnm es zacatonal, que es un pastizal mixto dominado por pastos *Muhlenbergia macroura*, *Calamagrostis tolucensis* y *Stipa ichu* bajo un dosel abierto de *Pinus montezumae* y *Pinus hartwegii*.

d) *Hidrología*: la cuenca del río Nautla se encuentra situada geográficamente entre los 19° 29' y 20° 15' latitud norte, y entre 96° 46' y 97° 27' longitud oeste. Tiene un área aproximada de 2,376 km², la cual está distribuida en una pequeña porción en el estado de Puebla y la mayor parte en el estado de Veracruz. El río Nautla nace en la Sierra Madre Oriental, en el Cofre de Perote, a una altitud de 4,150 m. Al inicio se le conoce con el nombre de arroyo Borregos y su curso sigue un rumbo hacia el norte a través de una topografía accidentada.

2. La zona de estudio Cerro “La Soledad” ubicado en el municipio de Cardonal (Figura 2) se localiza al noroeste del estado de Hidalgo; entre los paralelos 20° 37" de latitud norte y 99° 07" longitud oeste; con una altitud de 2040 metros sobre el nivel del mar. Pertenece a la Sierra Madre Oriental y tiene una fisiografía de altiplano.

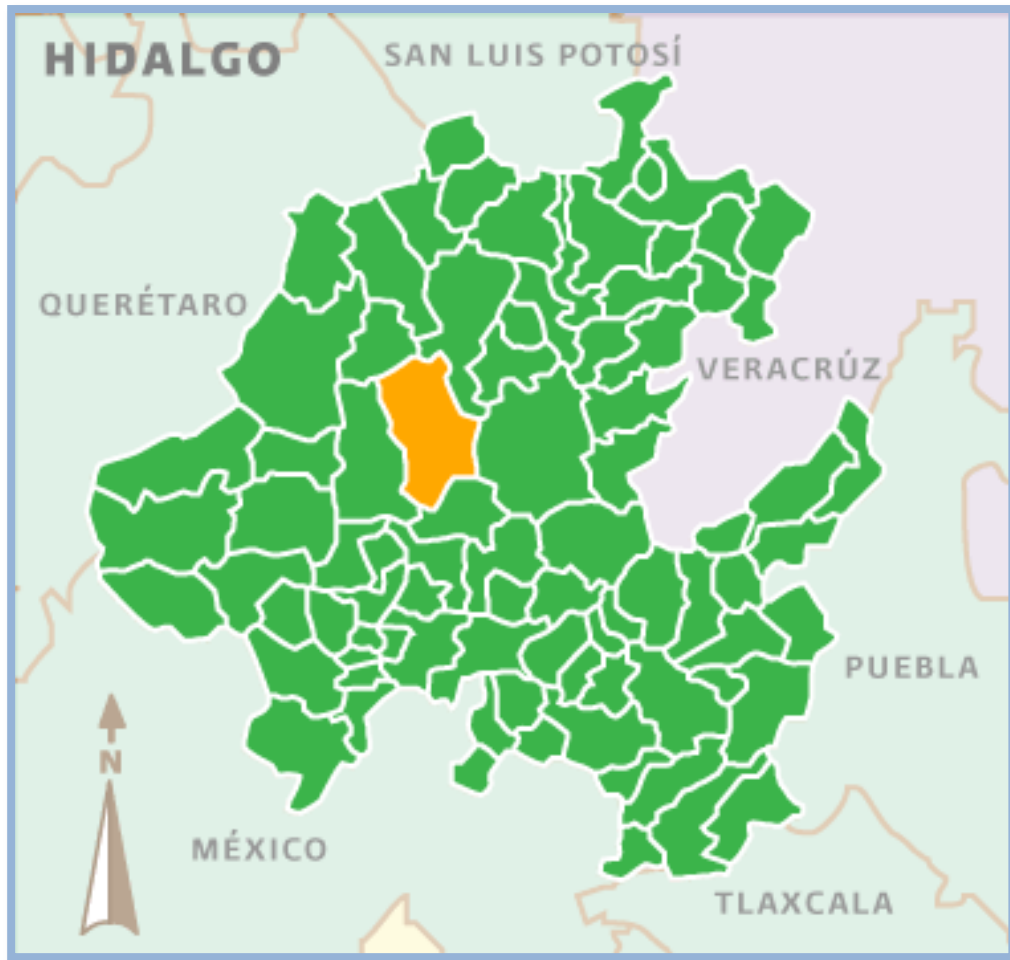


Figura 2. Mapa de localización del municipio de Cardonal, estado de Hidalgo.

a) Edafología: su suelo es de la era mesozoica, de tipo semidesértico, pardo rojizo, rico en materia orgánica; es un suelo de regular calidad, conformado por suelos del tipo rendzina 50%, litosol 30% y regosol 20%.

b) Clima: en el municipio de Cardonal se registran dos tipos diferentes de climas. La zona central tiene un clima C(w1) templado subhúmedo con lluvias en verano; mientras que los extremos oriental y occidental del territorio tienen un

clima BS1kw semiseco templado con escasas lluvias todo el año. La temperatura media anual es de 16°C y una precipitación media anual de 430 milímetros.

c) Vegetación: Las características edafológicas, climáticas, topográficas y geomorfológicas de la región ofrecen un marco en el que contrastan diferentes tipos de vegetación y, por ende, una gran riqueza de flora y fauna. Los tipos de vegetación que se encuentran son: bosque de piñón, bosque de pino-encino, bosque de piñón-*Juniperus*, bosque de encino-pino, bosque de *Juniperus*, matorral crasicaule, matorral desértico microfilo, matorral desértico rosetofilo y matorral submontano.

d) Hidrología: el territorio de Cardonal pertenece a la Cuenca del río Moctezuma y la región hidrológica Pánuco, siendo todas sus corrientes tributarias primeramente del río Tula y luego del río Moctezuma. Las principales fuentes hidrológicas de este municipio son el río Pánuco, cuenca río Moctezuma con tres corrientes de agua, río Chicvasco, río Quetzalapa y río Carrizal.

6.2 Descripción de las coníferas presentes en las reforestaciones

Las descripciones de *Pinus cembroides* Zucc, *Abies religiosa* (Kunth) Schlecht y Cham y *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii* (Roezl) fueron tomadas de (CONAFOR, 2011).

1) *Pinus cembroides* Zucc. (Figura 3) la copa puede ser redonda o piramidal; el tronco suele ser corto y retorcido, con corteza cenicienta, delgada, agrietada y dividida en placas cortas e irregulares. Ramas grandes que comienzan desde poca altura, son extendidas y en su mayoría verticiladas o irregularmente dispuestas. Ramillas grisáceas y ásperas mostrando las cicatrices foliares.

Hojas, rígidas y encorvadas; tamaño de 2.5 a 3.5 cm; color verde oscuro, algo azulado pálido, a veces amarillento y frecuentemente glaucas en las caras internas; grupos de tres (dominante) a veces 2, 4 o 5; vainas de color café claro y caen pronto dejando en la base una diminuta roseta, dientes ausentes, canales resiníferos externos.

Hábitat y distribución: crece en laderas de cerros y lomeríos de lugares áridos y rocosos, o al pie de montañas. Es una especie típica de suelos con poca materia orgánica, secos, delgados, pedregosos, calizos o calcáreos con alto contenido de yeso; en lomeríos y aluviones en los valles de muy buen drenaje y con pH de 4 a 8; normalmente prefiere los suelos de neutros a alcalinos.

Esta especie crece en clima templado seco (Bsk) hasta templado subhúmedo (Cwb) con precipitaciones de 365 a 450 mm anuales y con 7 u 8 meses secos y con temperaturas que oscilan entre 7 °C hasta 40 °C con promedios de 18 °C; alcanzando mínimas extremas de menos 7 °C y máximas de 42 °C.



Figura 3. Individuo de *Pinus cembroides* con desarrollo deficiente en zona reforestada de P.N Cofre de Perote.

2) *Abies religiosa* (Kunth) Schlecht y Cham., (Figura 4) árbol perennifolio, desde 35 hasta 60 m de alto; con tronco de 1-1.80 m de diámetro. Corteza externa de color café-rojizo, grisácea, con pequeñas placas irregulares, de 1-5 mm de grosor. La corteza interna de color rojizo y de 6-7 mm de grosor. Ramas extendidas o ligeramente ascendentes y verticiladas, que se acortan gradualmente hasta formar una copa cónica. Las ramillas son colgantes, comúnmente opuestas en cruz, de color que varía del café oscuro a café pálido violáceo, cubiertas con pelos largos más o menos separados, en árboles jóvenes.

Hojas alternas dispuestas en espiral, lineares, derechas o en forma de hoz, más o menos en dos hileras, torcidas en la base, de 20 a 30 mm de largo por 1.5 mm de ancho; con las puntas agudas, de color verde oscuro en el haz y de color verde claro, ligeramente azulado en el envés. Yemas con el contorno en forma ovoide, de 6 a 10 mm, color amarillento y protegidas por pequeños folíolos delgados.

Hábitat y distribución: se encuentra formando bosques entre los 1600 y 3600 msnm, solo o junto con especies de *Pinus*. Habita zonas de alta humedad principalmente cañadas o exposiciones húmedas y regularmente en suelos profundos.



Figura 4. Individuo de *Abies religiosa* con escaso desarrollo en reforestación del P.N Cofre de Perote.

3) *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii* (Roezl), (Figura 5) árboles de 20 a 35 m de alto, por 90 cm de diámetro a la altura del pecho. Ramas extendidas y verticiladas. Ramillas grisáceas o rojizas, a veces en verticilos dobles. Corteza grisácea y lisa en los árboles jóvenes, áspera de color moreno rojizo en los viejos dividida en placas irregulares. Hojas en fascículos presentes en grupos de 5, algo espaciadas colocadas en la extremidad de las ramillas, tamaño de 8 a 15 cm., delgadas, de color verde oscuro, marcadamente glauco en sus caras internas. Vainas no persistentes, amarillentas, apergaminadas, escamosas, brillantes, de 10 a 15 mm. Yemas oblongas, de color castaño rojizo, de unos 15 mm. Brácteas no decurrentes, bases de las brácteas caedizas, dientes presentes. Canales resiníferos externos.

Conillos subterminales, casi cilíndricos, de ápice redondo, en pedúnculos de 15 a 23 mm, con escamas anchas. Conos ligeros, subcilíndricos, gradualmente atenuados y bastante encorvados, de 20 a 40 cm de largo y 5 cm de ancho, hasta 10 cm cuando están abiertos; se encuentran en pares o en grupos de tres, pocas veces solitarios; colgantes y caedizos, de color café amarillento, opaco o muy levemente lustroso, resinoso, sobre todo en la base del cono y en la punta de las escamas. Semillas oscuras de 8 mm de largo, con manchas claras, alas de 30 a 35 mm por 8 mm de ancho, enteramente adheridas a las semillas.

Hábitat. Frecuente en bosques de pino en altitudes entre 1800–2500 msnm, generalmente asociado con otras especies. En bosques de pino-encino se encuentra entre los 2000–3000 msnm. Es más frecuente en exposiciones norte y noreste, en lugares húmedos, preferiblemente cañadas. Requiere sitios con precipitaciones entre 1200–3100 mm por año y temperaturas promedio anuales entre 13–17 °C. Es más común en suelos areno-limosos, profundos y con pH ácidos.

Su distribución se extiende: en el norte, principalmente en los estados de Sonora, Chihuahua y Durango; en el centro, en los estados de Morelos, Hidalgo, Puebla y el Distrito Federal; en el sur, en los estados de Guerrero, Chiapas y Oaxaca.



Figura 5. Individuo de *Pinus ayacahuite* con desarrollo escaso de zona con reforestación en el P.N Cofre de Perote.

6.3 Aplicación de la Estrategia PUMATL

Selección de sitios de estudio

En el sitio 1 Parque Nacional Cofre de Perote, se trabajó en tres parcelas que fueron cultivadas con papa durante un periodo de 50 años y se abandonaron al perderse la productividad. Esta zona fue reforestada con especies de importancia forestal (*Pinus cembroides*, *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*) cuyos individuos presentan deficiencia en el desarrollo y escasa supervivencia. Además de las parcelas con reforestaciones, se tomó como testigo un área conservada de bosque de coníferas. Todos estos sitios están dentro del P.N Cofre de perote.

Los puntos de muestreo fueron reconocidos en este trabajo como TAAR, TAPA, TAPC, que representan al terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*, terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*, terreno agrícola

con reforestación de *Pinus cembroides* respectivamente y el sitio sin tratamiento o bosque de coníferas. Los sitios con reforestación evaluados se observan en la Figura 6.



Figura 6. Ubicación de reforestaciones evaluadas del P.N Cofre de Perote. (Tomado de Google earth 2015)

Evaluación de propiedades hídricas y físicas del suelo

En cada uno de las parcelas con reforestación y en la zona de bosque conservado se realizaron tres registros de infiltración con permeámetro de Guelph modelo 2800KI (Figura 7), el cual opera bajo el principio del sifón de Mariotte. También se determinó la persistencia a la repelencia al agua con 10 registros en cada sitio, por el método WDPT descrito a continuación. Las propiedades físicas del suelo que se relacionan con las propiedades hídricas evaluadas en esta investigación son: textura, densidad aparente y porcentaje de humedad.

Para la evaluación de infiltración se requirió utilizar una barrena con la cual se formó un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro y 10 cm de profundidad en el que se colocó el permeámetro y se ajustó la válvula del reservorio. Posteriormente, se niveló el agua a 5 cm y la velocidad de descenso se registró por medio de una escala graduada en intervalos constantes de tiempo; cuando la velocidad de descenso se volvió constante se obtuvo R1. Para obtener R2 se niveló el agua a 10 cm y se repitió la operación. Con estas mediciones se obtuvo la tasa de infiltración (Figura 8).

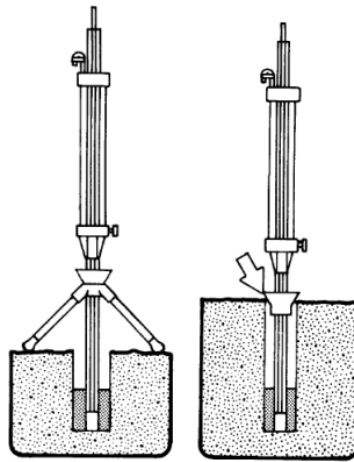


Figura 7. Diagrama del permeámetro Guelph 2800KI

Tasa de infiltración: cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo.

$$\text{Tasa de infiltración} = \frac{L1 - L2}{t} = \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Dónde:

L1 = lectura a 5 cm

L2 = lectura a 10 cm

t = tiempo en minutos



Figura 8. Evaluación de las propiedades hídricas con permeámetro Guelph en el Parque Nacional Cofre de Perote.

Nivel de hidrofobicidad o de persistencia a la repelencia al agua se determinó aplicando en campo el método WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo), descrito por Dekker y Jungerius (1990) y revisado en Duque *et al.* (2004) (Figura 9).



Figura 9. Evaluación de hidrofobicidad con método WDPT en campo.

Se colocó una gota de agua en la superficie del suelo y se registró el tiempo, en segundos, que tardó en penetrar completamente en el suelo; posteriormente, se clasificó este suelo con respecto a su nivel de hidrofobicidad con base en el Cuadro 2.

Textura: se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Para su determinación se utilizó el procedimiento de Bouyoucos.

Densidad aparente y porcentaje de humedad: se determinaron por medio del método del cilindro. Tres muestras en cada sitio fueron colectadas de 0-5 cm de profundidad; posteriormente, en laboratorio se registró el peso inicial (peso húmedo) y se secó en un horno a temperatura constante, tomando lectura de su peso cada 24 horas hasta que fue constante.

$$\text{Densidad Aparente (DA)} = \frac{\text{masa del suelo seco}}{\text{volumen total del suelo}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{Porcentaje de Humedad} = \frac{\text{masa del suelo seco}}{\text{peso inicial del suelo}} \times 100 \text{ (\%)}$$

Análisis micromorfológico

En cada parcela se colectaron 3 muestras inalteradas de suelos de manera aleatoria, utilizando cajas tipo kubiena. Las cajas se introdujeron en el suelo húmedo, de forma vertical aplicando una presión pareja sobre todos los bordes y se dejaron secar lentamente a la sombra durante 4 semanas.

El procesamiento de las muestras se realizó en el taller de micromorfología del Colegio de Posgraduados, como se describe a continuación. A las muestras de suelos se les aplicó resina poliéster insaturada y monómero-estirenos con una relación 7:3 para su endurecimiento. Una vez endurecidas, las muestras se retiraron de la caja y se cortaron con un disco de punta diamante. Posteriormente, se pulió el corte para obtener una superficie uniforme. Se adhirió la muestra a un portaobjetos (6 x 9 cm) y se pulió hasta llegar a 30 μm de espesor. Las secciones delgadas fueron cubiertas con un cubreobjetos.

La descripción de los componentes del suelo, observados en las secciones delgadas, se realizó con el método propuesto por Bullock *et al.* (2004) y Stoops (2003). En específico se determinó la porosidad y la estructura del suelo, además de rasgos como residuos de carbón resultado de incendios forestales.

La cuantificación del espacio poroso se llevó a cabo a través del análisis de imágenes de las secciones delgadas escaneadas, utilizando para el conteo de poros el programa Imagen Pro. Versión 5.

Toma de muestras de suelo y análisis químicos de suelo

En cada parcela se tomaron tres muestras alteradas de suelos de alrededor de un kilogramo, de los primeros 10 cm de profundidad. Posteriormente se dejaron secar a temperatura ambiente y se tamizaron con una malla de 2 mm.

Todos los análisis realizados en este estudio se basaron en los métodos descritos por Van Reeuwijk (1999). Las propiedades químicas del suelo que se evaluaron fueron las siguientes: pH (relación 1:1), porcentaje de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na y K^{+}), porcentaje de saturación de bases. Asimismo se determinó la presencia de Fe y Al intercambiables. Para el análisis de resultados se llevó a cabo una comparación de los datos obtenidos con la NOM-021-RECNAT-2000.

a) *pH*. Se determinó por medio del método electrométrico, basado en la determinación de la actividad del ion H^{+} mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H^{+} . El pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación 1:1 suelo:agua. Posteriormente se clasificó tomando como parámetro el Cuadro 3 presente en la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 3. Clasificación de pH.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

b) *Materia orgánica del suelo*. Se evaluó a través del contenido de carbono orgánico con el método Walkley y Black, el cual se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclar con ácido sulfúrico concentrado. Para la interpretación de resultados se tomaron los valores de referencia presentes en la NOM-021-RECNAT-2000, Cuadro 4.

Cuadro 4. Porcentaje de materia orgánica.

Clase	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1-6.0	0.6-1.5
Medio	6.1-10.9	1.6-3.5
Alto	11.0-16.0	3.6-6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

c) *Nitrógeno total*. Se determinó por el procedimiento micro-Kjeldahl y se utiliza como índice de disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Se basa en la extracción de amonio intercambiable por equilibrio de la muestra de suelo con KCl y su determinación por destilación por arrastre de vapor en presencia de MgO. Los resultados de los análisis de nitrógeno inorgánico pueden interpretarse con respecto al Cuadro 5 de la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 5. Nitrógeno inorgánico en el suelo.

Clase	Nitrógeno %
Bajo	Menor a 0.30
Medio	0.30-0.80
Alto	Mayor a 0.80

d) *Fósforo disponible*. Se determinó por el método de Bray para suelos ácidos. La solución extractora de P consiste en una combinación de HCL y NH_4F la cual remueve formas de P ácido solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. Los resultados del análisis pueden interpretarse con base en el Cuadro 6 también reportado en la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 6. Fósforo disponible, método de Bray.

Clase	P mg Kg ⁻¹
Bajo	< 5.5
Medio	5.5-11
Alto	> 11

e) *Cationes intercambiables*. El método consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, en este caso el ion amonio, posteriormente debe lavarse el excedente de saturación de amonio con alcohol al 96 %, se realiza la destilación con NaOH con la cual se determina la concentración de amonio. La interpretación de los resultados se realizó con base en el Cuadro 7 presente en la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 7. Cationes intercambiables.

Clase	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
	Cmol (+) Kg ⁻¹		
Muy baja	< 2	< 0.5	< 0.2
Baja	2-5	0.5-1.3	0.2-0.3
Media	5-10	1.3-3.0	0.3-0.6
Alta	> 10	> 3.0	> 0.6

h) *Capacidad e intercambio catiónico y bases intercambiables*. La CIC se determinó a partir del método de acetato de amonio el cual se usa para remover las bases intercambiables. El exceso de sal es drenado con etanol al 80 %, la muestra completa es destilada y el amoniaco producido es cuantificado. El porcentaje de saturación de bases es obtenido a partir de la suma de las

concentraciones de los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+). Con respecto a la reserva nutrimental se considera que esta es abundante cuando la CIC es mayor a 25 Cmol kg^{-1} , La interpretación de los resultados se realizó con base en el Cuadro 8 presente en la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 8. Capacidad de intercambio catiónico.

Clase	CIC Cmol Kg^{-1}
Muy alta	> 40
Alta	25-40
Media	15-25
Baja	5-15
Muy baja	< 5

f) *Hierro y Aluminio*. Los compuestos de hierro y aluminio “libres” pueden ser extraídos del suelo con una solución de ditionito-citrato de acuerdo al procedimiento de Mehra y Jackson; mientras que para los compuestos “activos” se utiliza una solución de oxalato ácido.

Corrección de acidez del suelo con hidróxidos

La concentración de hidróxidos de ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ y KOH) para mejorar el pH del suelo se basó en la metodología de Velasco (1983). Se utilizaron siete ensayos con distintas proporciones de hidróxido-agua en muestras de cada sitio de estudio. Se colocaron 10 g de suelo en matraces Erlenmeyer y se adicionaron las cantidades de hidróxido y agua destilada de acuerdo con el Cuadro 9.

Los matraces se dejaron reposar tapados por un periodo de 4 días, agitándolos una vez al día. Al término de este tiempo se determinó el pH de las suspensiones. Después, se procedió a construir una curva de equilibrio utilizando la ordenada para los diversos valores de pH obtenidos y la abscisa para los volúmenes de KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$. Con base en esta curva se determinó la concentración y cantidad necesaria del hidróxido para elevar el pH del suelo.

Cuadro 9. Corrección de acidez del suelo

Número de matraz	mL de hidróxido	mL de agua destilada
1	0	20
2	2	18
3	5	15
4	8	12
5	11	9
6	14	6
7	17	3

Aplicación del tratamiento con el hidróxido propuesto en campo

En cada parcela se seleccionaron entre 15 a 30 árboles recién trasplantados; en cada árbol se aplicó un litro de tratamiento de hidróxido en un diámetro de 30 cm y se etiquetaron para diferenciarlos de los árboles sin tratamiento.

Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos sobre el desarrollo de las reforestaciones

La supervivencia y crecimiento de verano, la supervivencia del periodo invierno-primavera y el crecimiento de primavera de las plantas se evaluaron midiendo en los distintos periodos el crecimiento longitudinal; así como, la densidad y longevidad foliar de las tres especies. Lo anterior también se realizó con individuos sin tratamiento.

Evaluación de la adición de hidróxidos sobre la microestructura y porosidad del suelo a través de secciones delgadas

Para cada sitio se colectó una muestra inalterada en un punto con tratamiento de KOH (200 ppm), en otro con tratamiento de KOH (200 ppm) y también en uno sin tratamiento. Las secciones delgadas se observaron en microscopio petrográfico y se realizó la descripción con el manual de Bullock *et al.* (2004). La cuantificación de la porosidad se llevó a cabo con el software Image Pro Plus 6. A partir de esto se realizó una comparación entre la porosidad y grado de agregación de las muestras a las que se aplicó tratamiento y las que permanecieron en condiciones naturales.

Evaluación de infiltración e hidrofobicidad en suelos del bosque de pino piñonero de Cardonal, Hidalgo

En el sitio 2, Bosque de pino piñonero afectado y no afectado por incendios “La Soledad” (Figura 10) se seleccionaron cinco sitios de estudio:

1. Bosque no afectado por incendio (BNA),
2. Bosque afectado por incendio superficial (BAIS),
3. Bosque afectado por incendio de copa (BAIC),
4. Bosque afectado por incendio de copa severo (BAICS) y
5. Bosque afectado por sequía (BAS).

En cada sitio se realizaron tres pruebas de infiltración superficial con permeámetro de Guelph modelo 2800KI y 10 registros del nivel de hidrofobicidad o de persistencia a la repelencia al agua, aplicando en campo el método WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo). Posteriormente, se clasificaron las tasas de infiltración y el nivel de hidrofobicidad en las distintas zonas.



Figura 10. Ubicación del cerro La Soledad y los sitios afectados por incendio, Cardonal, Hidalgo.
(Tomado de Google earth 2015)

Evaluación de supervivencia en reforestaciones con Pinus en Cardonal, Hidalgo.

En cada zona se evaluaron 60 cuadrantes de un metro, en los cuales se registró el número de plántulas de reforestaciones con *Pinus cembroides* y *Pinus greggii* y su estado (1= superviviente y 2 =muerto).

6.4 Análisis estadístico

Para detectar diferencias significativas entre las propiedades hídricas, químicas y físicas del suelo de los terrenos agrícolas reforestados y el bosque de coníferas, se realizaron pruebas T-Student (distribución de probabilidad para estimar la media de una población normalmente distribuida de tamaño de muestra pequeño), se consideraron diferencias significativas para valores menores a $P=0.05$.

Para evaluar diferencias significativas de los efectos del tratamiento mineralógico sobre el desarrollo arbóreo, respecto a los arboles si tratamiento, se realizó también una prueba T-Student ($P=0.05$).

Para detectar diferencias significativas en las propiedades hídricas del suelo (infiltración e hidrofobicidad) y la supervivencia de plántulas entre los sitios afectados por incendio y bosque no afectado se realizó prueba T-Student ($P=0.05$).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS. Los resultados obtenidos en las pruebas se reportan en el Anexo I.

7. RESULTADOS

Sitio 1 Parque Nacional Cofre de Perote

7.1 Diagnóstico de las propiedades hídras y físicas

Los valores de las propiedades hídras del horizonte Ah del Andosol bajo bosque de coníferas, así como del horizonte sub-superficial endurecido (tepetate con piedra pómez) con reforestaciones de *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa* y *Pinus cembroides* (TAAR, TAPA, TAPC) se reportan en el Cuadro 10.

Infiltración. En el bosque de coníferas la infiltración superficial pertenece a la clase rápida ($504 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), a mayor profundidad (5 cm) se reduce a $110.4 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. En los terrenos agrícolas se registró $643 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $426 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y $82.8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en TAPA, TAPC y TAAR respectivamente y se ubican en la clase muy rápida, rápida y moderadamente rápida. A mayor profundidad la tasa de infiltración se incrementa en todos los sitios con reforestación y se clasifican como muy rápida en TAPC y TAPA, rápida en TAAR.

Densidad aparente. En el bosque de coníferas se registró $0.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$. En los terrenos agrícola reforestado los valores tienden a incrementarse de $0.78 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y $1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ para TAPA, TAPC y TAAR respectivamente, los últimos dos valores presentan diferencias significativas con respecto a bosque de coníferas. Estos datos son similares con lo reportado por Meza y Geissert (2006) quienes determinaron $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en una zona de uso forestal en el volcán Cofre de Perote y se ubican dentro del intervalo registrado a nivel nacional e internacional. Se ha reportado $0.89 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en Michoacán (Bravo *et al.*, 2006), $0.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en el P.N El Chico (Ángeles-Cervantes, 2010), $0.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en el Parque Nacional Desierto de los Leones (González-Vargas, 2011) y $0.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en el Parque Nacional Izta-Popo (Aldana-Pérez, 2012).

A nivel internacional se han reportado valores que van de 0.68 a $0.82 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en Argentina (Broquen *et al.*, 2000), 0.85 a $1.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en Costa Rica (Alvarado y Forsythe, 2005) y de $0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ a $0.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ en Alemania (Kleber *et al.*, 2004).

Porcentaje de Humedad. En bosque de coníferas se observó un 39.3%. Por su parte, en los terrenos agrícolas se registraron valores menores de 21.4%, 27.5% y 35.16% en TAAR, TAPC y TAPA respectivamente. Este último no presenta diferencias significativas ($p=0.18$) respecto a lo descrito para bosque de coníferas.

En México se ha descrito un intervalo que va desde 1.43% en el Parque Nacional Izta-Popo (Aldana-Pérez, 2012), hasta 64% en sitios con bosque y con formación de río en Villa del Carbón, Estado de México (Hernández-Ordoñez, 2014). Otros autores han reportado valores intermedios como Jiménez-Cruz (2011) quien reportó 15% para el P.N Cumbres del Ajusco.

Hidrofobicidad. El suelo bajo bosque de coníferas se clasifica como no repelente con un tiempo de dos segundos de repelencia. En los terrenos agrícolas se observó una modificación importante con tiempos de 66, 173 y 197 segundos para TAPC, TAAR y TAPA respectivamente, por lo que se clasifican como fuertemente repelentes. Estos valores se encuentran dentro del intervalo descrito a nivel nacional.

Algunos registros en México muestran un amplio rango de hidrofobicidad en Andosoles desde ligeramente repelentes en el P.N Izta-Popo (Aldana-Pérez, 2012), fuertemente repelente en Pico de Orizaba (Mora-Santiago *et al.*, 2011), hasta severamente repelente en el P.N Cumbres del Ajusco (Jiménez-Cruz, 2011).

Porosidad total. El bosque de coníferas en estado natural presentó 40% de porosidad total. En el horizonte endurecido de los terrenos agrícolas reforestados se observaron valores menores desde 9.7% para TAAR, 13.3% y 18.3% en TAPC y TAPA respectivamente.

Las reforestaciones con *Pinus ayacahuite* y *Pinus cembroides* presentaron valores intermedios lo que indica que han tenido efectos positivos en la recuperación de esta propiedad.

Estos resultados se encuentran dentro de lo registrado a nivel nacional por autores como Hernández-Ordoñez (2014), quien encontró una porosidad total de 52.36 % para un Andosol en bosque de Villa del Carbón. Jiménez-Cruz (2011)

17.8 % en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco y se reportó que la adición de hidróxidos incrementó el porcentaje de espacio poroso en 45%.

Textura. El suelo en bosque de coníferas exhibió una clase textural limosa mientras que los terrenos con reforestación son de la clase limosa y franco limosa. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con Yamada *et al.* (1975), quienes señalan que el limo es la fracción dominante en la textura de los Andosoles, Hernández-Ordoñez (2014) describe la presencia de la clase textural franco limosa en Andosoles con bosque de *Quercus*, y una modificación a la clase arcillosa en zonas erosionadas con tepetates. Stoops *et al.* (2010) menciona que los horizontes de cenizas volcánicas compactadas “Tepetates” presentan generalmente la clase textural franca.

Cuadro 10. Propiedades hídricas del suelo en bosques de coníferas y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.

Sitio	Infiltración		Densidad aparente g·cm ⁻³	Humedad (%)	Hidrofobicidad superficial		Porosidad total (%)	Textura
	Superficial mm·h ⁻¹	A 5 cm			t (s)	Nivel		
B. de Coníferas	504(±62.3) ^a	110.4 (±49.1) ^a	0.73 (±0.042) ^a	39.37 (±1.52) ^a	2 ^a	No repelente	39.91	Limoso
TAAR	82.8 (±31.9) ^b	235.2 (±143.8) ^a	1.05 (±0.08) ^b	21.41(±1.71) ^b	173.83 ^{bc}	Fuertemente repelente	9.68	Limoso, Franco limoso
TAPA	643.2 (±302.6) ^a	807.6 (±55.41) ^b	0.78 (±0.08) ^{ac}	35.16 (±6.22) ^a	197.33 ^b	Fuertemente repelente	13.34	Limoso, Franco limoso
TAPC	426 (±163.3) ^a	1239.6 (±802.7) ^b	0.9 (±0.092) ^{bc}	27.52 (±4.79) ^a	66.33 ^c	Fuertemente repelente	18.31	Franco limoso

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con P=0.05. (±D.E): desviación estándar. TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*; TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*; TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*.

7.2 Diagnóstico de las propiedades químicas

En el Cuadro 11 se reportan los valores de las propiedades químicas del horizonte Ah de un Andosol bajo bosque de coníferas, así como del horizonte sub-superficial endurecido (Tepetate con piedra pómez) con reforestaciones de *Pinus ayacahuite*, *Abies religiosa* y *Pinus cembroides*. En la Figura 11 A y Figura 11 B se observa la relación entre los parámetros químicos con respecto a los citados por la NOM-021-RECNAT-2000.

Cabe mencionar que las reforestaciones se encuentran en las distintas parcelas desde hace 8 años para TAPA (*Pinus ayacahuite*), seis años TAAR (*Abies religiosa*) y tres años *Pinus cembroides* (TAPC). Los árboles de *Pinus ayacahuite* tienen entre 1 y 2 metros de altura, *Abies religiosa* 0.5 a 1.5 metros y *Pinus cembroides* 0.3 a 0.6 metros.

Porcentaje de materia orgánica. En el bosque de coníferas se registró 19.3%. En las reforestaciones se redujo hasta 1.71%, 2.18% y 3.11% respectivamente para TAPA, TAPC y TAAR. El suelo de bosque de coníferas se encuentra en la clase muy alta respecto a la NOM-021-RECNAT-2000; mientras que los terrenos agrícolas corresponden a la clase muy baja.

Cuando los bosques están en condición natural, la materia orgánica se acumula y se incrementa su contenido hasta más de 20% y es cuando alcanzan la designación de un horizonte orgánico (WRB, 2007). Alcalá *et al.* (2009) menciona que en Andosoles, la M.O en el horizonte superficial, va de 5% a más de 20% y disminuye de 1% a 5% en el horizonte subyacente. El epipedón del bosque de coníferas prácticamente alcanza el requisito de un horizonte orgánico; no obstante, el cultivo de papa genera la pérdida del horizonte Ah, de ahí que se reduzca su contenido en la capa arable.

Las reforestaciones tienen el objetivo de volver a restaurar las funciones del suelo y generalmente se usan plantas maderables como pino, encino y oyamel. Sin embargo, Avila *et al.* (2011) encontraron que los pinos no contribuyen a la acumulación de materia orgánica ni a la formación de suelos. En contraparte, reforestaciones de *Pinus massoniana* registraron un incremento en las

concentraciones de C y N únicamente en plantaciones mayor de 18 años (Xiaolin *et al.*, 2013).

Con relación al tiempo de las plantaciones observamos que *Pinus ayacahuite* está aportando una menor cantidad de materia orgánica que las otras plantaciones. Asimismo, estos resultados muestran que las reforestaciones no han acumulado restos orgánicos en la superficie del suelo y por tanto no influyen a corto plazo en el incremento del contenido de M.O.

pH. Todos los suelos estudiados presentan un pH de moderado a ligeramente ácido con valores de 6.1 en bosque de coníferas, y se reduce a 5.6 y 5.9 en los terrenos agrícolas reforestados. Estos valores se ubican dentro del intervalo registrado por varios autores. Para Andosoles de México, la mayoría de los autores registran pH ácidos bajo distintos tipos de bosque; 5.3 en el P.N El Chico, Hidalgo (Ángeles-Cervantes, 2010); 5.5 en el P.N Cofre de Perote (Campos *et al.*, 2001), 5.88 en P.N Desierto de los Leones (González-Vargas, 2011) y 5.06 en una reforestación con *Pinus hartwegii* en P.N Cumbres del Ajusco (Jiménez-Cruz, 2011). Algunos investigadores a nivel internacional indican también valores que van de fuertemente ácidos a neutros 4.5 en Indonesia y 6.8 en Islandia (Van Ranst *et al.*, 2008 y Gudmundsson *et al.*, 2004).

En Andosoles los horizontes superficiales presentan un pH ácido cuando son ricos en humus y contenidos de Al^{3+} mayores a $2 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y se puede incrementar hasta 6 o más cuando hay cenizas relativamente inalteradas y en horizontes profundos (FitzPatrick, 1993). Ortiz-Solorio (2010) menciona que el Al^{3+} e H^+ , así como la pérdida de cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ están involucrados en el desarrollo de la acidez del suelo. En el caso del pH de los tepetates, Etchevers *et al.* (1992) reportaron un pH ligeramente alcalino. En cuanto al tipo de vegetación, Brady y Weil (1999) indican que las coníferas tienden a acidificar al suelo.

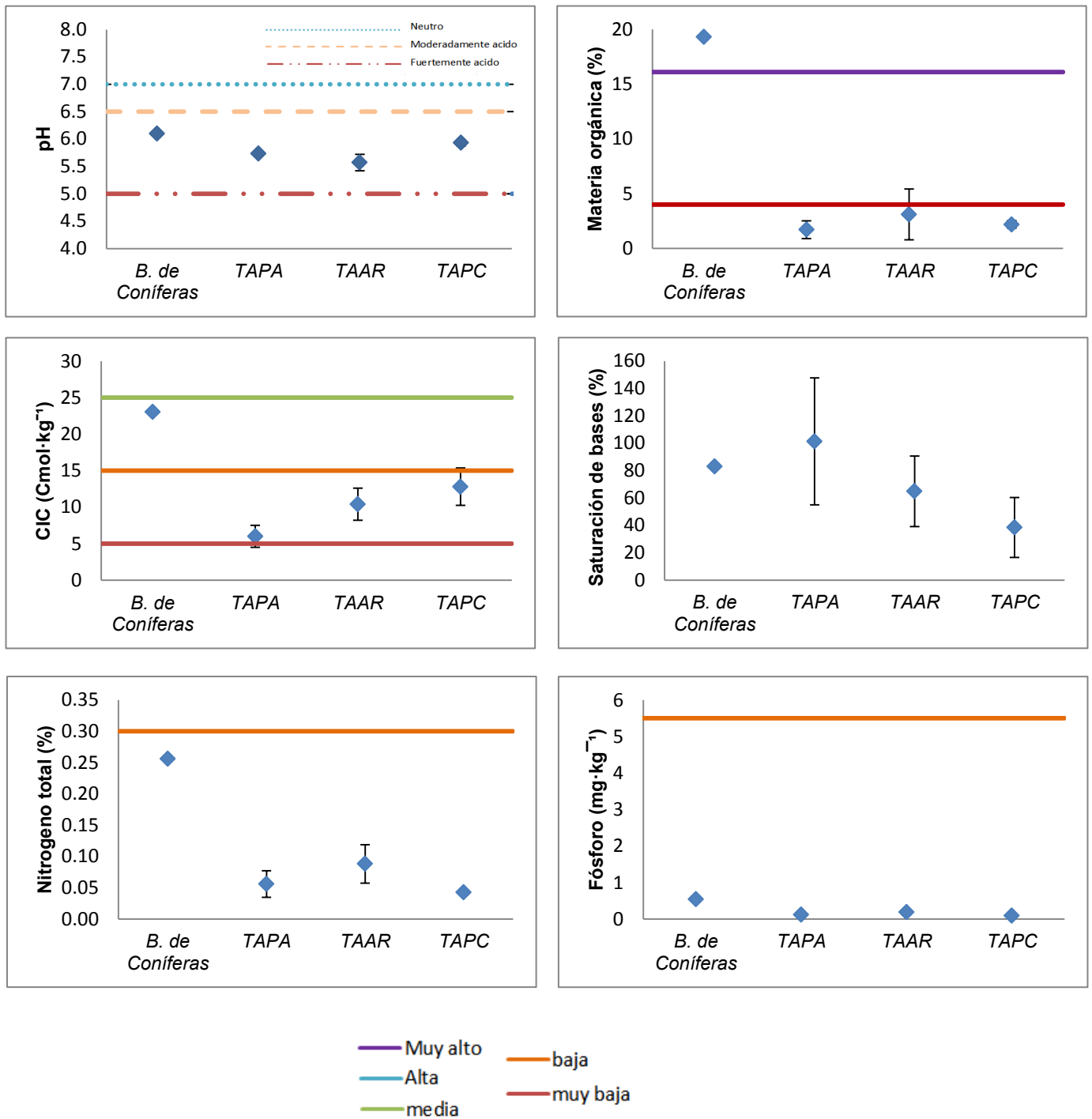


Figura 11 A. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, en los diferentes sitios de estudio TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*, TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*, TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*.

Dadas las observaciones anteriores se puede inferir que el pH moderadamente ácido y con valores de seis que ocurre en el bosque de coníferas se atribuye a la mayor concentración de Ca^{2+} , el cual disminuye en los terrenos reforestados y por ello estos son más ácidos.

Es necesario mencionar que los valores obtenidos en este trabajo pueden representar una limitante para el establecimiento de la reforestación con *Abies religiosa*. Según la investigación realizada por López (1993), el pH óptimo es de 6.4; sin embargo, las mayores densidades y crecimientos de regeneración de *Abies religiosa* ocurren a pH=5.7 (Ángeles-Cervantes, 2010).

Capacidad de intercambio catiónico. En bosque de coníferas se registró un valor de $23.04 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; el cual resulta un 70% mayor que en las reforestaciones donde se encontró 6.01 , 10.4 y $12.8 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para TAPA, TAAR y TAPC respectivamente. La capacidad de intercambio catiónico pertenece a la clase media en bosque de coníferas, pasando a la clase baja en TAAR y TAPC y muy baja en TAPA.

Ortiz-Solorio (2010) menciona que entre más alto sea el contenido de arcilla y de humus en un suelo mayor será su capacidad de intercambio catiónico. Por su parte, FitzPatrick (1993) indica que en Andosoles la CIC es alta en el horizonte superficial incluso hasta $35 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, por la presencia de materia orgánica y materiales amorfos y puede descender en los horizontes subyacentes hasta 10 y $15 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Esto explica el comportamiento de los resultados encontrados en este estudio.

La CIC registrada en el horizonte Ah es similar a lo reportado por Cruz y Geissert (2000) quienes reportaron $27.36 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ dentro del P.N Cofre de Perote. En dicho estudio no se mencionan valores para terrenos agrícolas. Allen y Hajek (1989) indican que el vidrio volcánico, principal constituyente de la piedra pómez, es un material de baja estabilidad. El intemperismo de este material volcánico genera sílice amorfa, la cual puede tener cargas dependientes del pH. En pH ácidos las cargas están neutras, de ahí que no contribuyan con la capacidad de intercambio catiónico.

Como resultado de la presencia de Tepetates y piedra pómez en TAAR, TAPA Y TAPC la capacidad de intercambio catiónico se ve afectado representando una limitante en el desarrollo de las reforestaciones. Asimismo observamos que aun cuando las reforestaciones con *Abies religiosa* y *Pinus cembroides* aportan una mayor cantidad de materia orgánica que *Pinus ayacahuite*, esta no ha generado un incremento a la CIC.

Porcentaje de saturación de bases. El bosque de coníferas mostró un PSB de 83%. En el caso de los terrenos reforestados se registraron valores mayores 100% en TAPA y menores en TAAR (65%) y en TAPC 38.5%.

Estos valores indican que en bosque de coníferas y en TAPA todos los sitios de intercambio están ocupados por cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) siendo el Ca^{2+} el catión dominante en los sitios de intercambio. Resulta importante mencionar que en TAPC los procesos de lavado de bases han removido gran parte de los cationes intercambiables, dejando así valores muy bajos del PSB.

Cationes. En el horizonte Ah del Andosol bajo bosque de coníferas se encontraron valores correspondientes a la clase alta en Ca^{2+} y K^+ , y media para Mg^{2+} ; en sodio se registró un valor de $0.325 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

La concentración de calcio, en los sitios con reforestaciones, corresponde a la clase baja. En cuanto a Mg TAPA y TAAR están en la clase media, mientras que TAPC se encuentra en la clase baja. Con respecto al contenido de K^+ , todas las plantaciones pertenecen a la clase baja.

Campos *et al.* (2007) reportaron diferencias significativas en las concentraciones de Ca^{2+} por efectos del cambio de uso de suelo en el P.N Cofre de Perote con valores de 2.07 y $0.49 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para bosque de pino y zona de cultivos abandonada respectivamente. Por su parte, López (1993) indica que para el desarrollo de *Abies religiosa* los valores óptimos de Ca^{2+} son de $11.1 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y la deficiencia es por debajo de $7.25 \text{ Cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, en el caso de Mg^{2+} la deficiencia es de $1.62 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Lara *et al.* (2011) mencionan que se requieren $24,000 \text{ mg}\cdot\text{m}^2$

de K^+ en suelo para el crecimiento óptimo de *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus cembriodes*.

Según lo mencionado la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ observada en los terrenos agrícolas reforestados representa una limitante para el desarrollo de la reforestación de *Abies religiosa*.

Nitrógeno total. En bosque de coníferas y en los terrenos reforestados el porcentaje de nitrógeno encontrado corresponde a la clase baja respecto a la NOM-021-RECNAT-2000, ya que los valores no superaron 0.25% de Nt.

Otras investigaciones realizadas en Andosoles de México reportan valores correspondientes a las clases media y baja. Ángeles-Cervantes (2010) indica 0.77%, Meza y Geissert (2006) registraron 0.27% y González-Vargas (2011) encontró 0.14%.

Gama *et al.* (2007) mencionan que los tepetates tienen características físicas y químicas altamente restrictivas para el desarrollo de la vegetación debido a su alta densidad, baja conductividad hidráulica y retención de humedad, trazas de C, N y P disponible, así como la reducción del número de micro-organismos del suelo. En tepetates se han registrado concentraciones de N de 0.03% y de 0.02% a 0.37% (Gama *et al.*, 2007; y Acevedo *et al.*, 2003).

Con respecto a los requerimientos nutricionales de *Abies religiosa*, López (1993) ha reportado que se requiere al menos 0.40% de nitrógeno en suelo. Los resultados encontrados en este estudio indican que existe una deficiencia de este nutrimento.

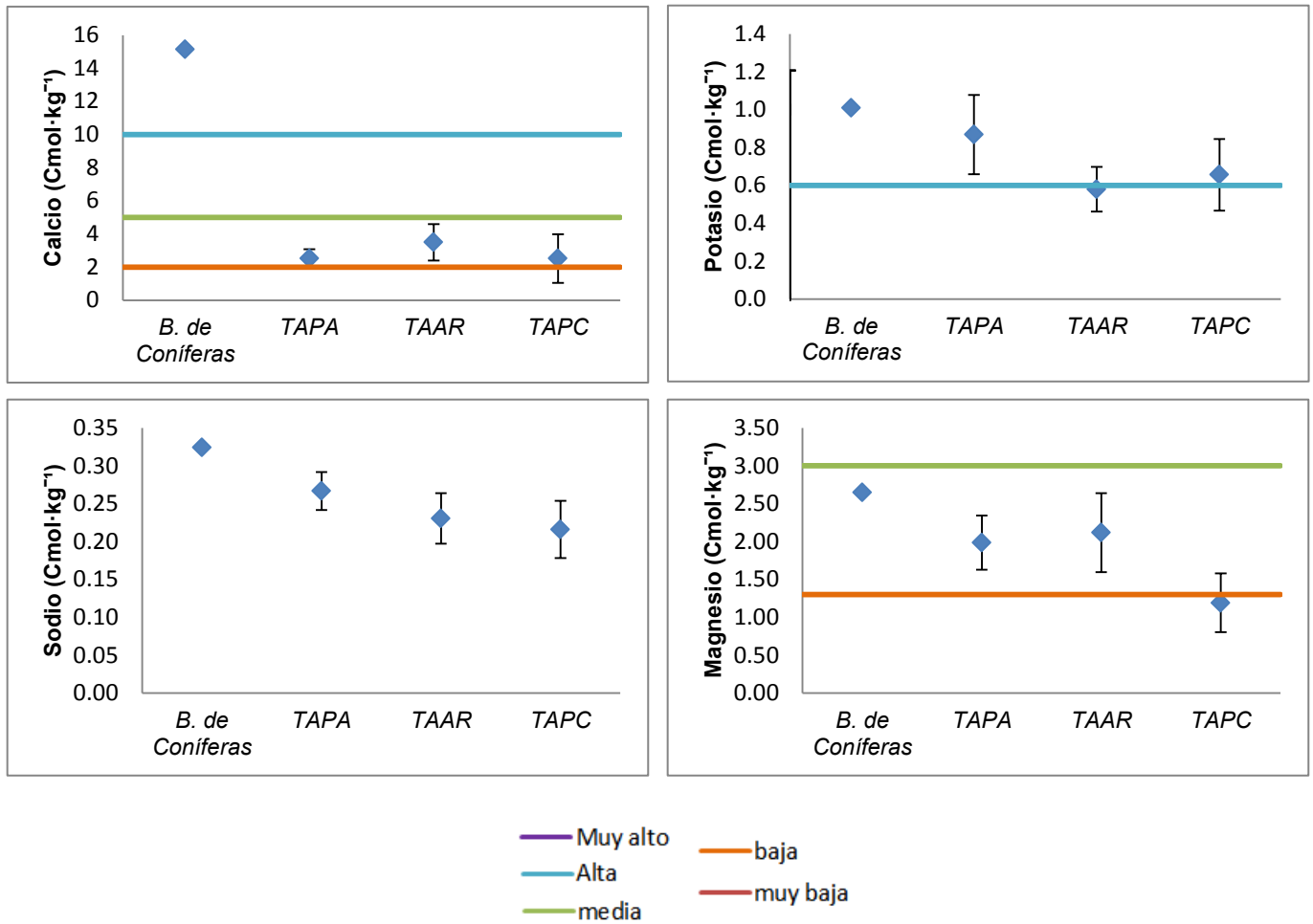


Figura 11 B. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-REC NAT-2000, en los diferentes sitios de estudio TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*, TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*, TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*.

Fósforo disponible. La concentración en bosque de coníferas fue de 0.54 mg·kg⁻¹; mientras que las reforestaciones presentaron menores concentraciones: 0.19 mg·kg⁻¹, 0.12 mg·kg⁻¹ y 0.094 mg·kg⁻¹ para TAAR, TAPA y TAPC respectivamente. Estas concentraciones de fósforo pertenecen a la clase baja evaluada con la NOM-021-REC NAT-2000 (Cuadro 7).

Estudios realizados en Andosoles a nivel nacional reportan un amplio intervalo de fósforo disponible el cual está relacionado con el grado de alteración

de las cenizas volcánicas, la calidad de la materia orgánica y la presencia de materiales amorfos. Es por eso que los valores de este elemento pueden variar desde la clase alta $93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (González-Vargas, 2011) a la clase baja $3.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Aldana-Pérez, 2012). Por otra parte, Acevedo *et al.* (2003) obtuvo $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P en tepetates.

Una característica de los Andosoles es su alta retención de fosfatos. Ortiz-Solorio (2010) menciona que el poder de fijación del P en muchos suelos es tan grande que la regulación del aprovechamiento de este elemento es uno de los problemas más difíciles en el manejo del suelo y los cultivos. En los suelos moderados o fuertemente ácidos, el Al y Fe se vuelven solubles y se combinan con los iones de fosfato para formar compuestos insolubles que son de bajo grado de aprovechamiento por las plantas. Esto puede explicar los bajos niveles de fósforo encontrados en este estudio.

Lara *et al.* (2011) mencionan son necesarios $11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ fósforo disponible en suelos para el desarrollo de especies de importancia forestal como *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus cembroides*. En relación a esto, los bajos niveles de P encontrados en este estudio representarían una limitante para el éxito de las reforestaciones.

Fe y Al. En bosque de coníferas se registraron los mayores porcentajes 0.694% y 0.847% para Fe_o^{3+} y Al_o^{3+} respectivamente. En TAAR se redujeron a 0.588% 0.794% (Fe_o^{3+} y Al_o^{3+}), los menores porcentajes se encontraron en TAPA y TAPC. En bosque de coníferas se encontró 2.31% de Fe_d^{3+} y 0.074% de Al_d^{3+} . Por su parte los suelos en las reforestaciones registraron valores menores en ambos elementos (Cuadro 12).

Materiales amorfos y cristalinos. En el bosque de coníferas se obtuvo 1.22% y 1.19% respectivamente. Para los terrenos agrícolas reforestados el contenido de materiales amorfos fue de 1.35% , 0.61% y 0.49% para TAAR, TAPC y TAPA respectivamente, los materiales cristalinos presentaron valores menores a lo registrado en bosque.

Estudios realizados en Cofre de Perote como el de Cruz y Geissert (2000) reportaron valores de 0.29 a 2.39% de Fe^{3+} y 0.41 a 2.35% de Al^{3+} determinados

por el mismo método, Campos (2004) obtuvo 1.13 a 2.94 % para Fe^{3+} y 2.16 a 3.45 % de Al^{3+} . El porcentaje de Fe^{3+} es similar a lo mencionado por dichas investigaciones, mientras que el porcentaje de Al^{3+} resultó menor.

Los Andosoles son clasificados con base en sus propiedades ándicas, las cuales se definen por el Soil Survey Staff (2010) como materiales que contienen menos del 25% de carbono orgánico y reúnen los siguientes requerimientos en la fracción fina: a) $\% \text{Al} + 1/2\% \text{Fe}$ por medio del método de extracción con oxalato de amonio ácido $\geq 2\%$, b) densidad aparente de $0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y c) retención de fosfatos mayor a 85%.

Cuadro 11. Propiedades químicas del suelo de los Bosque de Coníferas y Terrenos Agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.

Sitio	pH	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Fósforo disponible mg kg ⁻¹	CIC Cmol·kg ⁻¹	Saturación de bases (%)	Cationes intercambiables			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
							Cmol·kg ⁻¹			
B. de coníferas	6.1 ^a	19.30 ^a	0.25 ^a	0.54 ^a	23.04 ^a	82.95 ^a	15.13 ^a	2.65 ^a	0.325 ^a	1.009 ^a
TAAR	5.6 ^b	3.11(±2.32) ^{bc}	0.088(±0.03) ^b	0.190(±0.06) ^b	10.4(±2.20) ^b	64.9(±25.74) ^{ac}	3.49(±1.09) ^b	2.11(±0.52) ^{abc}	0.23(±0.03) ^b	0.58(±0.11) ^b
TAPA	5.7 ^{ab}	1.71(±0.81) ^b	0.056(±0.02) ^c	0.121(±0.04) ^c	6.01(±1.50) ^c	100(±46.4) ^b	2.52(±0.57) ^b	1.98(±0.36) ^b	0.26(±0.02) ^c	0.86(±0.21) ^{ac}
TAPC	5.9 ^b	2.18(±0.34) ^c	0.043(±0.004) ^{bc}	0.094(±0.008) ^{bc}	12.8(±2.55) ^b	38.48(±21.87) ^c	2.52(±1.46) ^b	1.19(±0.38) ^c	0.21(±0.04) ^{bc}	0.65(±0.19) ^{bc}

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas en análisis estadístico con P=0.05. (±D.E): desviación estándar. TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*; TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*; TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*.

Cuadro 12. Concentraciones de Hierro y Aluminio y porcentajes de materiales amorfos y cristalinos en suelos del Parque Nacional Cofre de Perote.

Sitio	Método de ditionito de sodio				Método de oxalato ácido				Amorfos	Cristalinos	Rel Al:Fe
	Al ³⁺	Al ₃ O ₃	Fe ³⁺	Fe ₂ O ₃	Al ³⁺	Al ₃ O ₃	Fe ³⁺	Fe ₂ O ₃	Al _o /Fe _o	Al _d /Fe _d	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}
	%				%				%		
Bosque de Pino	0.074 ^a	0.140 ^a	2.311 ^a	0.277 ^a	0.847 ^a	1.601 ^a	0.694 ^a	0.992 ^a	1.22	0.032	1.194
TAAR	0.05 ^{ab} (±0.021)	0.093 ^{ab} (±0.039)	2.021 ^a (±0.015)	0.306 ^a (±0.021)	0.794 ^a (±0.06)	1.501 ^a (±0.114)	0.588 ^a (±0.07)	0.842 ^a (±0.101)	1.35	0.025	1.088
TAPA	0.014 ^c (±001)	0.025 ^c (±0.002)	1.548 ^{ab} (±0.03)	0.336 ^{ab} (±0.039)	0.188 ^b (±0.026)	0.357 ^b (±0.049)	0.380 ^b (±0.088)	0.543 ^b (±0.126)	0.49	0.009	0.628
TAPC	0.015 ^{bc} (±001)	0.027 ^{bc} (±0.002)	1.122 ^b (±0.02)	0.376 ^b n(±0.028)	0.199 ^b (±0.036)	0.377 ^b (±0.068)	0.326 ^b (±0.071)	0.466 ^b (±0.102)	0.61	0.013	0.432

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas en análisis estadístico con P=0.05. (±D.E): desviación estándar; TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*; TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*; TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*. * Al³⁺ y Fe³⁺ extractables con ditionito de sodio, ** Al³⁺ y Fe³⁺ extractables con oxalato ácido.

7.3 Evaluación del efecto de la adición de hidróxidos sobre el pH del suelo

El pH inicial del suelo en los terrenos agrícolas reforestados fue moderadamente ácido, presentándose valores de 5.5 a 5.9. Además, los suelos de los terrenos abandonados mostraron ser fuertemente hidrófobos (Cuadro 10). Las concentraciones de Ca^{2+} y K^{+} pertenecen a las clases baja y muy baja respectivamente (Cuadro 11). Los resultados anteriores muestran que el factor limitante es la disponibilidad de potasio, por lo cual se sugirió el tratamiento con KOH (200 ppm) como alcalinizante.

Los resultados de la adición de hidróxido mostraron un incremento del pH en todos los sitios (Figura 12). La disolución de 17 mL KOH (200 ppm) / 3 mL H_2O , generó el mayor incremento del pH del suelo; en Bosque de coníferas hasta 6.9, en tanto en los terrenos reforestados con *Pinus ayacahuite* y *Pinus cembroides* fue de 6.8, mientras que el terreno reforestado con *Abies religiosa* solo se incrementó hasta 6.5.

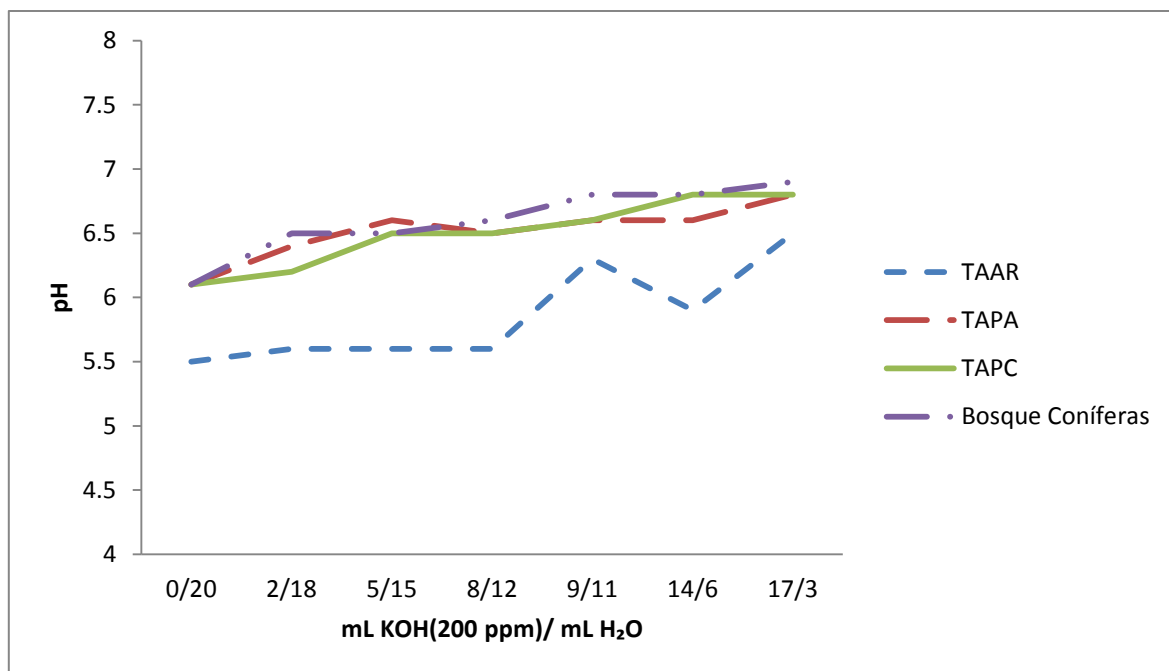


Figura 12. Efectos de la adición KOH (200 ppm) como alcalinizante en Andosoles de bosque de coníferas y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.

7.4 Evaluación del efecto de la adición de KOH (200 ppm) y AlOH_3 (25 ppm) sobre la micromorfología y porosidad de los terrenos agrícolas reforestados.

En el Andosol bajo bosque de coníferas se observó estructura migajosa y porosidad total estimada de 40% constituida por poros cavidad y poros canales (en 39% y 1% respectivamente). Ambos tipos de poros son comunes en suelos forestales ya que son ocasionados por la fauna del suelo (Stoops *et al.*, 2010) y son similares a lo registrado por Hernández-Ordoñez (2014) y González-Vargas (2011) en Andosoles bajo bosques en Villa del Carbón, Estado de México y en el P. N Desierto de los Leones.

La aplicación de KOH (200 ppm) al suelo de bosque de coníferas no generó cambios en la estructura, pero produjo un aumento del tamaño de los agregados, por lo que disminuye en 8% la porosidad total estimada y el sistema poroso se modifica ligeramente con un nuevo tipo de poros cámara en 3%.

En los terrenos agrícolas reforestados la microestructura es similar ya que se observaron dos tipos de estructura: a) apedal de microagregados entre granos de piedra pómez (90%) y b) pedal migajosa (10%) para TAPA y TAPC respectivamente, mientras que en TAAR los porcentajes son de 95% y 5%. El sistema poroso está conformado en su mayoría por poros de empaquetamiento complejo y en menor proporción poros fisura curvados (Cuadro 13, Figura 13). En comparación con el suelo bajo bosque, los terrenos agrícolas presentan menor porcentaje de porosidad total 13% para TAPA, 18% en TAPC y 9.68% para TAAR. Este valor de porosidad es menor al registrado por Hernández-Ordoñez (2014) en zona erosionada donde la porosidad fue del 20% y con poros de empaquetamiento simple y estructura de bloques sub-angulares y angulares.

La adición de KOH, en TAPA disminuyó la estructura apedal de 90 a 25% y se incrementó el porcentaje de estructura pedal granular hasta un 45% y migajosa a 30%. En TAPC la estructura apedal se reduce a 70% y se incrementó hasta un 30% la estructura migajosa; mientras que en TAAR la estructura apedal se reduce a 80% y la estructura migajosa se incrementó hasta 20%.

Estos cambios en la microestructura ocasionaron incrementos en la porosidad hasta 42%, 23% y 21% para TAPA, TAAR y TAPC respectivamente. En el sistema poroso se observó la formación de poros cavidad en 5 y 15% para TAAR y TAPC (Figura 14).

La aplicación de un tratamiento de KOH (200 ppm) más $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) en los terrenos agrícolas modificó la estructura del suelo (Figura 15). En TAPA se elimina la estructura apedal, lo que genera una estructura granular en 45% y se incrementa el porcentaje de estructura migajosa hasta 55%. La porosidad se incrementó de 13 a 40%. Por otra, parte en TAPC ocurre un incremento en el porcentaje de estructura apedal de microagregados entre granos de piedra pómez hasta 85%, se genera estructura granular en 10% y se reduce la estructura migajosa al 5%; sin embargo, la porosidad varía ligeramente de 18 a 16%. Para TAAR se registró el cambio más importante ya que la estructura apedal se reduce a 20% y la migajosa a 10%, porque se genera una estructura pedal granular que ocupa 70%. La porosidad pasó de 9.68 hasta 32%.

Los poros de empaquetamiento complejo se observan para todos los sitios y en menor proporción cavidades (5%) y fisuras (8%) para TAAR y TAPA respectivamente.

Otras investigaciones reportan incrementos en la porosidad del suelo en zonas de Andosoles erosionados como Hernández-Ordoñez (2014) quien registró mayor porosidad (9.5%) con tratamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (12 ppm) respecto a muestras sin tratamiento. González-Vargas (2011) observó ligeros incrementos en la porosidad 2% con tratamiento de KOH (25 ppm) y 4% con $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm); mientras que el sistema poroso y la microestructura no presentaron modificaciones. En el P.N Cumbres de Ajusco, el tratamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (10 ppm) incrementó significativamente la porosidad de 18 a 26% y modificaciones en el tipo de poros de cavidades a empaquetamiento simple y compuesto (Jiménez-Cruz, 2011). Con base en lo anterior, se puede notar que los incrementos en la porosidad obtenidos en esta investigación son superiores hasta en un 20% respecto a lo registrado por otras investigaciones.

Cuadro 13. Efecto de la adición de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm) en porosidad y agregación en suelos de bosque de pino y terrenos agrícolas reforestados del Parque Nacional Cofre de Perote.

Sitio	Porosidad (%)			Tipo de poros			Tipo de Agregación		
	S/T	KOH	KOH+ AlOH ₃	S/T	KOH	KOH+ AlOH ₃	S/T	KOH(200 ppm)	KOH+ AlOH ₃
B. de Coníferas	39.91	32.82	ND	Cavidades 97%, canales 3%	Cavidades 82%, canales 15%, cámara 3%	ND	Pedal Migajosa 100%	Pedal Migajosa 100%	ND
TAAR	9.68	23.05	32.32	Poros de empaquetamiento complejo 99%, fisuras 1%	Poros de empaquetamiento complejo 95%, cavidades 5%	Poros de empaquetamiento complejo 95%, cavidades 5%	Microagregados entre granos de p. pómez 95% y Migajosa 5%	Microagregados entre granos de p. pómez 80% y Migajosa 20%	Granular 70%, Migajosa 10%, Microagregados entre granos de p. pómez 20%
TAPA	13.34	41.89	40.18	Poros de empaquetamiento complejo 100%	Poros de empaquetamiento complejo 85%, cavidades 15%	Poros de empaquetamiento complejo 92%, fisura 8%	Microagregados entre granos de p. pómez 90% y Migajosa 10%	Migajosa 30%, Granular 45%, Microagregados entre granos de p. pómez 25%	Migajosa 55% y Granular 45%
TAPC	18.31	21.26	16.62	Poros de empaquetamiento complejo 85%, fisuras 15%	Poros de empaquetamiento complejo 100%	Poros de empaquetamiento complejo 100%	Microagregados entre granos de p. pómez 90% y Migajosa 10 %	Microagregados entre granos de p. pómez 70% y Migajosa 30%	Microagregados entre granos de p. pómez 85%, Granular 10% y Migajosa 5%

TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*; TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*; TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*; S/T: sin tratamiento; ND: no determinado.

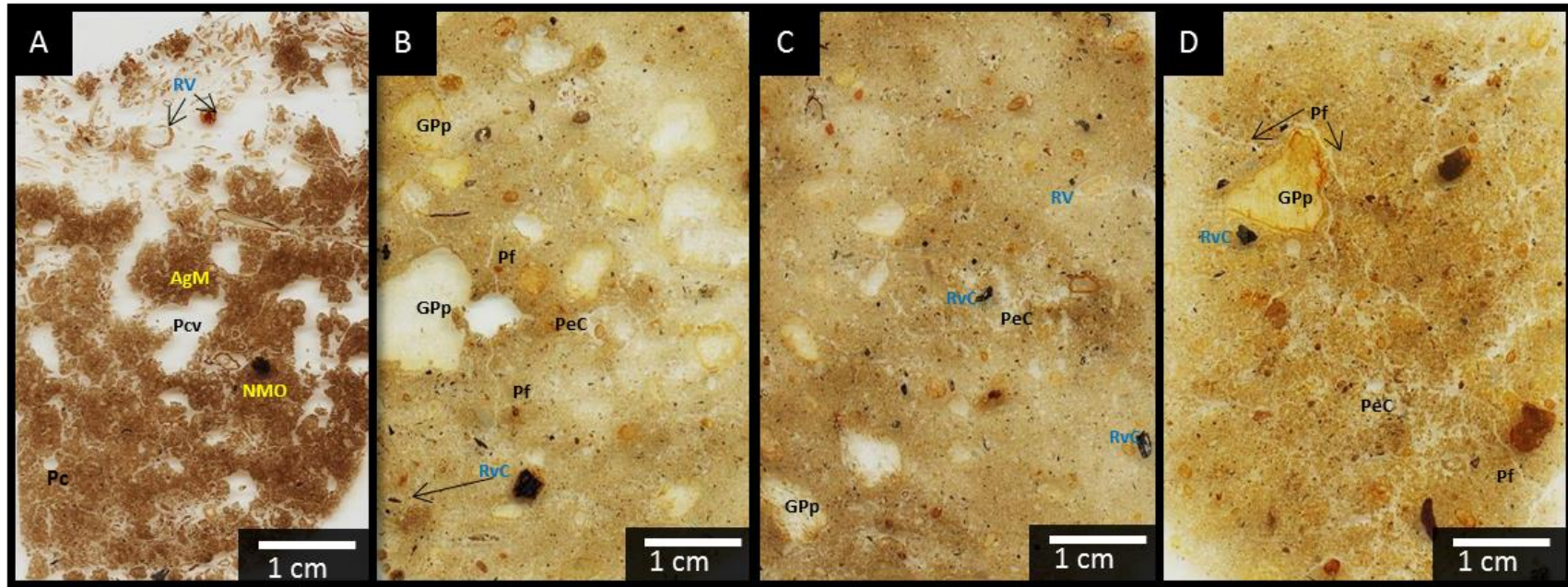


Figura 13. Secciones delgadas sin tratamiento de: A) bosque de coníferas, B) TAAR, C) TAPA y D) TAPC; Parque Nacional Cofre de Perote. Se muestran poros cavidad (PcV), poros canales (Pc), poros de empaquetamiento complejo (PeC), poros fisura (Pf), agregados migajosos (AgM), granos de piedra pómez (GpP). Además de restos vegetales (RV), restos vegetales carbonizados (RvC) y nódulos de materia orgánica (NMO).

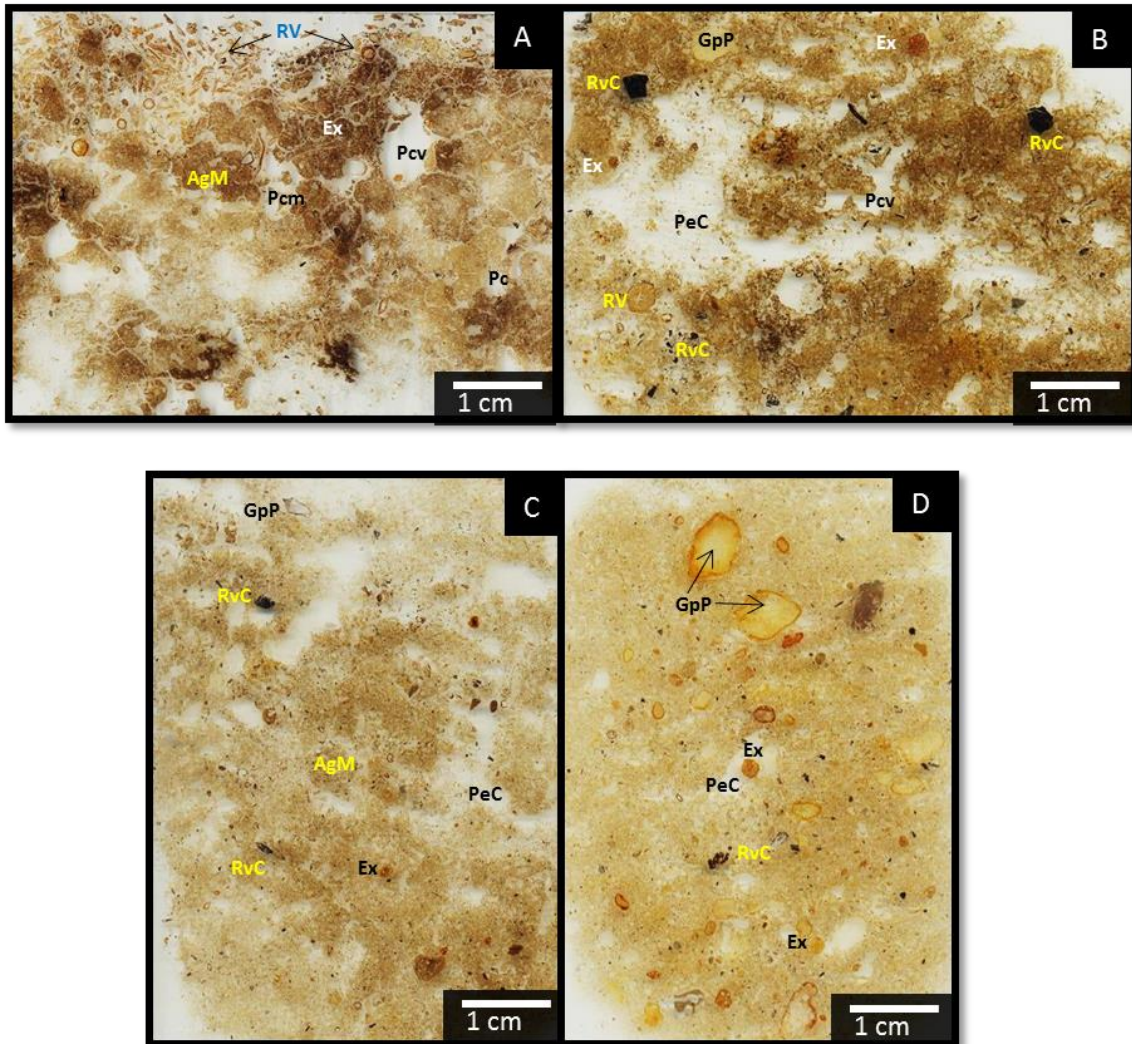


Figura 14. Muestras de sección delgada con adición de tratamiento KOH (200 ppm) de: A) bosque de coníferas, B) TAPA, C) TAAR y D) TAPC; Parque Nacional Cofre de Perote. Se muestran poros cavidad (PcV), poros canales (Pc), poros de empaquetamiento complejo (PeC), poros cámara (Pcm), agregados migajosos (AgM), granos de piedra pómez (GpP). Además de restos vegetales (RV), excrementos (Ex) y restos vegetales carbonizados (RvC).

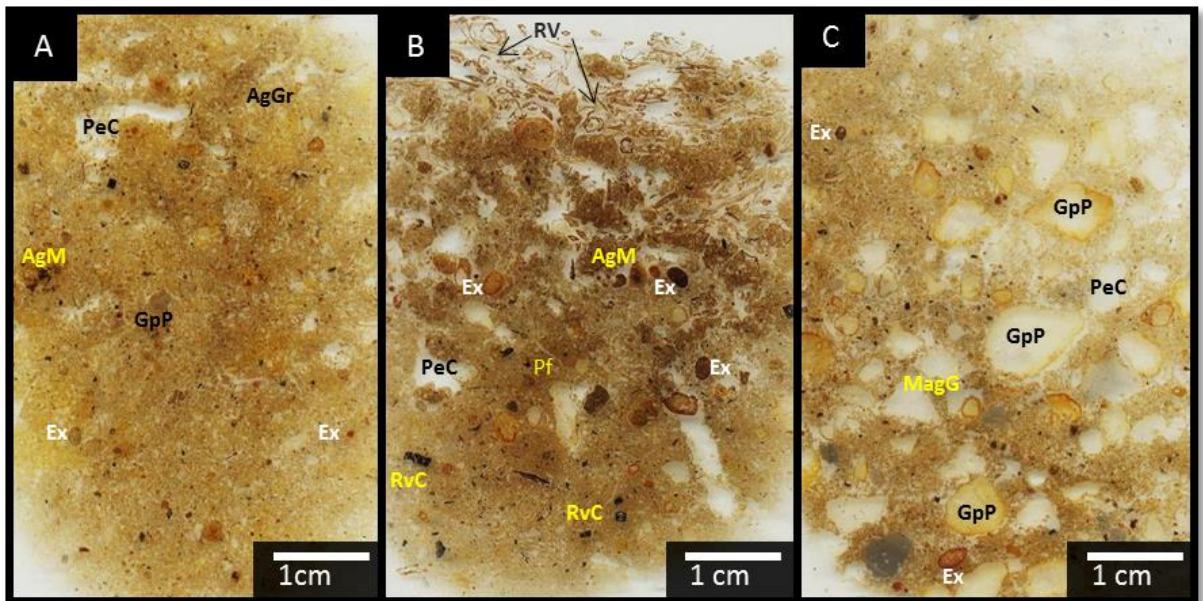


Figura 15. Muestras de sección delgada con adición de tratamiento KOH (200 ppm) complementado con $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) del Parque Nacional Cofre de Perote: A) TAAR, B) TAPA y C) TAPC. Se muestran poros cavidad (PcV), poros canales (Pc), poros de empaquetamiento complejo (PeC), poros cámara (Pcm), agregados migajosos (AgM), granos de piedra pómez (GpP). Además de restos vegetales (RV), excrementos (Ex) y restos vegetales carbonizados (RvC).

7.5 Evaluación del efecto de la adición de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm) en supervivencia y crecimiento de reforestaciones

La adición de hidróxidos tuvo efectos en el crecimiento de verticilos apicales en todos los individuos de las tres especies.

En los individuos de *Abies religiosa* se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el crecimiento con promedios de 33 y 53 mm para individuos sin tratamiento y con tratamiento respectivamente (Figura 18). Efectos semejantes fueron detectados en *P. ayacahuite* (Figura 16 A y 16 B) con crecimientos promedio de 38 y 70 mm para plantas sin tratamiento y con tratamiento respectivamente. Para *P. cembroides* (Figura 17) no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$), aunque el promedio fue de 8.8 y 14 mm en plantas sin tratamiento y con tratamiento respectivamente.

La adición de hidróxidos no tuvo efectos en el número de ramificaciones del verticilo apical en los árboles con y sin tratamiento de las reforestaciones, ya que no se observaron diferencias ($p > 0.05$), con promedios de tres ramificaciones para *Abies religiosa*, cuatro para *Pinus ayacahuite* y dos en *P. cembroides*.

El número de yemas apicales en *Abies religiosa* es igual en plantas con y sin tratamiento con un promedio de cuatro yemas.

En los individuos de *P. ayacahuite* y *P. cembroides* se presentaron brotes (vástagos en estado de desarrollo). Para *Pinus ayacahuite* la adición de hidróxidos incremento significativamente ($p < 0.05$) el número de brotes ya que con tratamiento se registraron en promedio cinco brotes (máx.=8; min=3); mientras que en individuos sin tratamiento el promedio fue de cuatro (máx.=7; min=3). En *Pinus cembroides* no hubo efectos aunque las plantas con tratamiento tuvieron en promedio dos brotes (máx.= 5, min=1), contra un brote (máx.= 5, min=1) en plantas sin tratamiento.

Estos resultados son similares con los de González-Vargas (2011) quien registró diferencias significativas en la biomasa seca de yemas apicales de *Abies religiosa* con 12g en plantas sin tratamiento y 30g en plantas con tratamiento de Al(OH)₃ (25 ppm).

Cuadro 14. Efecto de la adición de KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm) en supervivencia y crecimiento de reforestaciones del Parque Nacional Cofre de Perote.

Sitio	Crecimiento (mm)			No. de ramas verticales			No. de yemas			Supervivencia (%)		
	S/T	KOH	KOH+Al(OH) ₃	S/T	KOH	KOH+Al(OH) ₃	S/T	KOH	KOH+Al(OH) ₃	S/T	KOH	KOH+Al(OH) ₃
TAAR	32.96 ^a (±28.97)	20.8 (±12.6)	53.03 ^b (±40.88)	3 ^a (±1.26)	ND	3 ^a (±1.08)	4 ^a (±1.74)	NP	4 ^a (±2.27)	96	100	100
TAPA	38.12 ^a (±30.48)	52.5 (±44.2)	69.87 ^b (±51.21)	4 ^a (±1.03)	ND	4 ^a (±1.38)	4 ^a (±1.35)	NP	5 ^b (±1.69)	100	100	100
TAPC	8.86 ^a (±15.34)	6.55 (±3.3)	14 ^a (±17.99)	2 ^a (±0.81)	ND	2 ^a (±1.40)	1 ^a (±1.39)	NP	2 ^a (±2.09)	90	100	100

Letras diferentes para un mismo sitio indican diferencias significativas con respecto a S/T (P=0.05); (±D.E): desviación estándar; TAAR: terreno agrícola con reforestación de *Abies religiosa*; TAPA: terreno agrícola con reforestación de *Pinus ayacahuite*; TAPC: terreno agrícola con reforestación de *Pinus cembroides*; S/T: sin tratamiento; ND: no determinado; NP: no presentes en la temporada de evaluación.



Figura 16 A. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200 ppm) y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) sobre el crecimiento y supervivencia de la reforestación de *Pinus ayacahuite*. Aa, Ba y Ca: evaluación inicial en Julio de 2013 (aplicación de KOH), Ab, Bb y Cb: evaluación del tratamiento de KOH en Agosto de 2013, Ac, Bc y Cc: evaluación en Noviembre de 2013 (aplicación de $\text{Al}(\text{OH})_3$), Ad, Bd, Cd: evaluación del tratamiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ en Marzo de 2014.



Figura 16 B. Evaluaciones sobre el crecimiento y supervivencia de la reforestación en árboles sin tratamiento de *Pinus ayacahuite*. Aa, Ba y Ca: evaluación inicial Julio de 2013, Ab, Bb y Cb: evaluación Agosto de 2013, Ac, Bc y Cc: evaluación en Noviembre de 2013, Ad, Bd y Cd: evaluación final Marzo 2014.

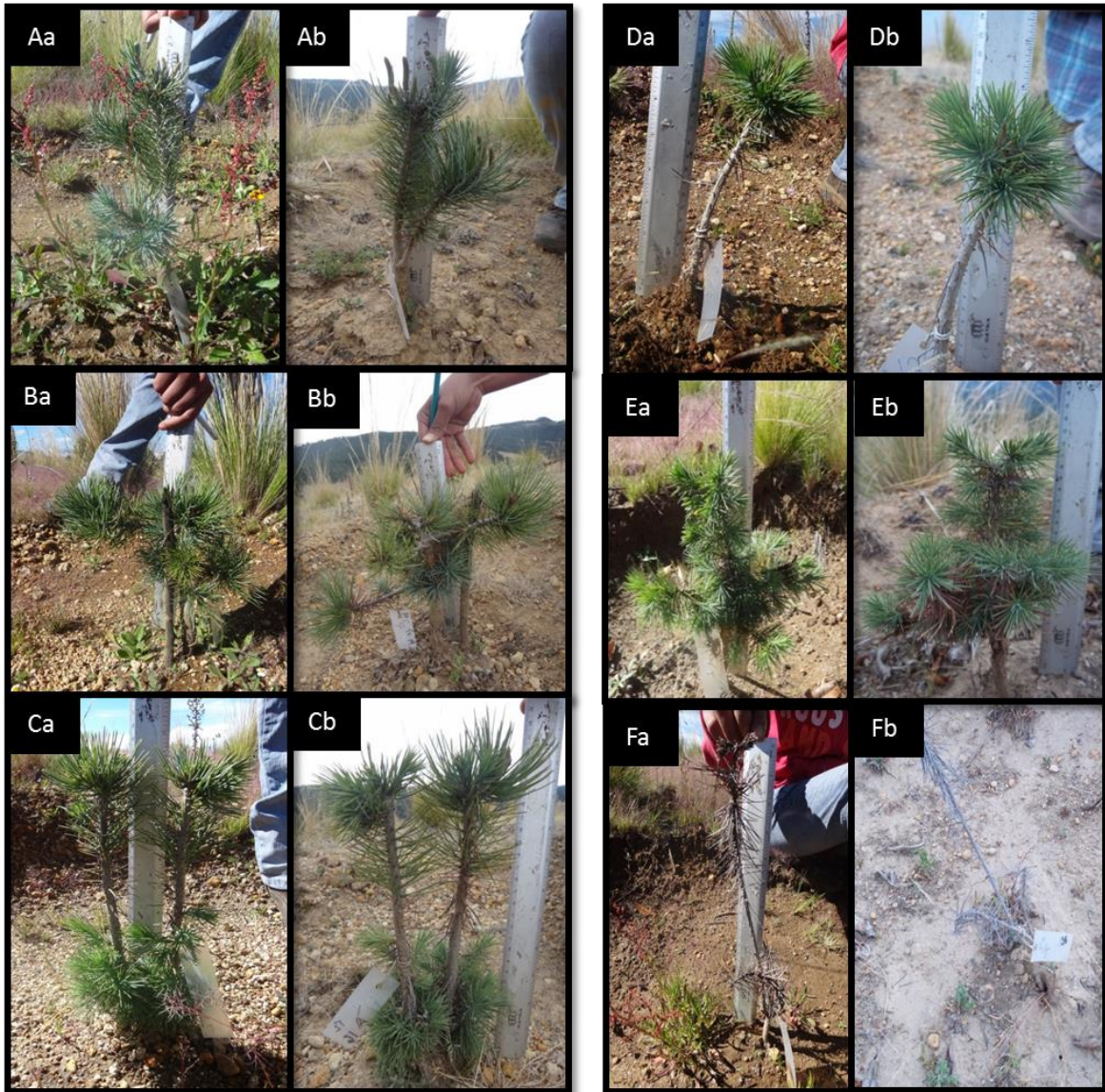


Figura 17. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200 ppm) y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) sobre el crecimiento y supervivencia de la reforestación de *Pinus cembroides*. Aa, Ba y Ca: corresponden a la evaluación en Agosto de 2013 del tratamiento de KOH (aplicado en Julio de 2013), Ab, Bb y Cb: corresponden a la evaluación en Marzo de 2014 del tratamiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (aplicado en Noviembre de 2013). Da, Ea, Fa: evaluación en Agosto de 2013 para árboles sin tratamiento, Db, Eb y Fb: evaluación en Marzo de 2014 en árboles sin tratamiento.



Figura 18. Evaluaciones de los efectos de la aplicación de los tratamientos KOH (200 ppm) y $Al(OH)_3$ (25 ppm) sobre el crecimiento y supervivencia de la reforestación de *Abies religiosa*. Aa, Ba y Ca: corresponden a la evaluación en Agosto de 2013 del tratamiento de KOH (aplicado en Julio de 2013), Ab, Bb y Cb: corresponden a la evaluación en Marzo de 2014 del tratamiento de $Al(OH)_3$ (aplicado en Noviembre de 2013). Da, Ea, Fa: evaluación en Agosto de 2013 para árboles sin tratamiento, Db, Eb y Fb: evaluación en Marzo de 2014 en árboles sin tratamiento.

Sitio 2 Cerro “La soledad” municipio de Cardonal, Hidalgo

7.6 Evaluación de infiltración, hidrofobicidad

La tasa de infiltración en BNA fue de 5256 mm·h⁻¹. Los incendios la redujeron en 21% en BAIS y 50% para BAIC y BAICS. Estas reducciones se relacionan con el nivel de hidrofobicidad superficial, fuertemente repelente con promedios de 210, 236 y 361 en BNA, BAIC y BAICS respectivamente y ligeramente repelente con promedio de 11.36 y 49.75 en BAIS y BAS respectivamente. Todas las tasas de infiltración corresponden a la clase muy rápida (USDA, 2001) y no se presentaron diferencias significativas con (P=0.05). El pH de los suelos fue de 7.6 a 8 que se clasifica como básico.

Inbar *et al.* (2014) registraron diferencias significativas en las tasas de infiltración con valores cercanos a 20 mm·h⁻¹ en zona con incendio y 30 mm·h⁻¹ en suelo sin disturbio. Sin embargo los incendios no tuvieron efecto sobre la hidrofobicidad ya que los suelos se clasificaron como no repelentes en ambos sitios con repelencia al agua de menos de 5 segundos. Tampoco se registraron diferencias significativas en pH 7.4 y 7.5 para sitios afectados y no afectados respectivamente. Por otra parte, Tessler *et al.* (2008) indican que se incrementa la hidrofobicidad de no repelente en zona sin disturbio hasta fuertemente repelente (>300 segundos) después de incendios.

7.7 Evaluación de supervivencia de *Pinus* en reforestaciones

En el cerro “La Soledad” se realizaron reforestaciones posteriores al incendio ocurrido en 2011 con plántulas de *Pinus cembroides* y *Pinus greggii*. Para *P. cembroides* se registraron 10 individuos en BNA y 14 individuos en BAS con una supervivencia nula, en los demás sitios no se registraron individuos.

En la reforestación de *Pinus greggii* se registró 1 individuo para BNA, 4 individuos en BAICS, 6 individuos en BAS. En este caso los individuos se encontraban vivos y en los demás sitios no hubo registro de individuos, por lo que la supervivencia se considera baja debido a los pocos registros obtenidos.

Cuadro 15. Infiltración e hidrofobicidad en suelos y supervivencia de reforestaciones con *Pinus* en Cardonal, Hidalgo.

Sitio	Infiltración superficial	Hidrofobicidad superficial		Reforestación con <i>Pinus cembroides</i>		Reforestación con <i>Pinus greggi</i>	
	mm·h ⁻¹	t (s)	Nivel	# individuos	supervivencia	# individuos	supervivencia
BNA	5256 (±3111) ^a	210.87 ± (383.43) ^a	fuertemente repelente	10	2*	1	1**
BAIS	4113.22 (±2590) ^a	11.36 ± (25.86) ^a	ligeramente repelente	0	.	0	.
BAIC	2531.4 (±754) ^a	236.72 ± (451.72) ^a	fuertemente repelente	0	.	4	1
BAICS	2652 (±326) ^a	361.66 ± (441.99) ^a	fuertemente repelente	0	.	0	.
BAS	ND	49.75 ± (94.61) ^a	ligeramente repelente	14	2	6	1

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con (P=0.05); BNA: bosque no afectado; BAIS: bosque afectado con incendio superficial; BAIC: bosque afectado con incendio de copa; BAICS: bosque afectado con incendio de copa severo; BAS: bosque afectado por sequía; *Individuos muertos; **Individuos vivos; ND: no determinado.

8. DISCUSIÓN

8.1 Diagnóstico general caso I Parque Nacional Cofre de Perote

La historia de los sitios de estudio, contada por el dueño de los terrenos indica que durante la década de 1930-1940, el bosque de coníferas del P.N Cofre de Perote, tuvo un cambio de uso de suelo a tierras de mono-cultivo de papa. Este cultivo se mantuvo durante 50 años, y al reducirse su productividad, fueron abandonados. Recientemente han sido reforestados con coníferas.

En los terrenos reforestados no se presenta el horizonte orgánico, el cual está presente en bosque de coníferas. Lo que se atribuye a la erosión por cambio de uso del suelo, Mielniczuk y Schneider (1984) establecen que en las etapas de degradación del suelo los contenidos de materia orgánica y la estructura se destruyen gradualmente, la erosión se vuelve acelerada y aparecen las capas compactadas de baja fertilidad.

Las propiedades hídricas como la infiltración de los bosques de coníferas del P.N Cofre de Perote presentaron valores muy bajos respecto a lo reportado en estudios de sitios similares. En México se ha registrado hasta $6120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco (Jiménez-Cruz, 2011) y $2672 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en bosque de Villa de Carbón (Hernández-Ordoñez, 2014). Este último también reporta la tasa de infiltración de un Andosol erosionado de $7380 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, que pertenece a la clase muy rápida.

La infiltración a 5 cm de profundidad es mayor (dos, ocho y diez veces) en los terrenos agrícolas reforestados respecto al Bosque.

Sin embargo las tasas de infiltración obtenidas en esta investigación son similares a datos de estudios internacionales para el mismo tipo de suelo. A nivel internacional se ha descrito para Andosoles tasa de infiltración de $569 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en páramos ecuatorianos (Zehetner y Miller, 2006) y corresponden a la clase muy rápida $242 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en la Isla Tenerife (Guerra *et al.*, 2003) y de $117 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en las montañas Apalaches (Harden y Scruggs, 2003) moderadamente rápida.

La reducción en la tasa de infiltración superficial en TAAR está relacionada con el incremento en la hidrofobicidad y la disminución en la porosidad, mientras

que TAPC registró un valor correspondiente a la clase rápida similar a lo observado en bosque, el mayor valor se observó en TAPA correspondiente a la clase muy rápida. En este sitio, los árboles de la reforestación son de 8 años de edad y alturas de 1 a 2 m por lo cual han integrado una capa de hojarasca en la superficie. La incorporación de M.O permite que disminuya la densidad aparente, se incremente el porcentaje de humedad y aumenten los porcentajes de porosidad (Brady y Weil, 1999). Lo que explica el incremento en la tasa de infiltración. Resultados similares, fueron reportados por González-Montiel (2013) quien encontró que en plantaciones de 30 años se recuperan las tasas de infiltración en el horizonte superficial.

El bosque de coníferas registró la menor densidad aparente, caso contrario ocurrió con los suelos reforestados. El paso de maquinaria agrícola para la preparación de siembra y la cosecha generan compactación del suelo disminuyen la porosidad e incrementan la densidad aparente (Américo y Hossne, 2008), lo que explica los valores obtenidos en las zonas de reforestación.

En los terrenos agrícolas reforestados se nota un incremento en la hidrofobicidad de no repelentes a fuertemente repelentes lo que explica los bajos valores de retención de humedad. Al respecto, DeBano (1981) menciona que después de un incendio se forman compuestos hidrófobos debido a la combustión incompleta de la materia orgánica. Por su parte, Wada (1980) explica que en los Andosoles la capacidad de retención de humedad se pierde de manera irreversible cuando estos se exponen a la superficie o bien cuando se encuentran sometidos a incendios forestales.

Las propiedades químicas, como: pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de nitrógeno total, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) en los terrenos agrícolas se registraron valores menores respecto a lo observado en bosque. El cambio de uso de suelo, los procesos erosivos y el monocultivo de papa por un periodo de 50 años, empobrecieron la fertilidad del suelo debido a los altos requerimientos nutricionales del cultivo de papa en K^+ , N y P. Al respecto,

Neumann *et al.* (2012) describieron pérdidas de potasio en suelo de $72 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y de fósforo $0,24 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ por el cultivo de papa. Por su parte, Gómez y Torres (2012) han descrito que los requerimientos nutricionales del cultivo de papa van desde 5.2 a 5.5 kg de nutrimento por tonelada de tubérculos para potasio, 1.9 a 2.5 kg de nutrimento por tonelada de tubérculos de nitrógeno y de 0.52 a 0.97 kg de nutrimento por tonelada de tubérculos en fósforo.

Con base en lo anterior, el cultivo de papa ocasiona modificaciones significativas, con respecto a los valores observados en bosque y según la NOM-021-RECNAT-2000, principalmente en porcentaje de M.O (clase muy alta a clase muy baja), de CIC (clase media a baja), de Ca^{2+} (clase alta a baja) y de K^+ (clase alta a media). Esto ha ocasionado una baja fertilidad del suelo en los alrededores del P.N Cofre de Perote que representa limitantes para el establecimiento y desarrollo de reforestaciones.

A partir del diagnóstico realizado se consideró como mejor opción la aplicación de un tratamiento de hidróxido de potasio ya que el potasio se encuentra en menor proporción que el Ca^{2+} , debido a la demanda de K^+ en los cultivos de papa. El KOH actúa como alcalinizante, al ser una base fuerte; además, al disociarse en los productos K^+ y OH^- los grupos OH^- presentes en la disolución básica reaccionan con los aceites orgánicos, hidrolizando los ésteres en un proceso conocido como saponificación dando lugar a la producción de agua (Mc-Murry, 2008).

El tratamiento de KOH, complementado con $\text{Al}(\text{OH})_3$ puede también tener efectos sobre la micromorfología del suelo. Esto se debe al efecto aglutinante o cementante del Al^{3+} . El mecanismo de cementación ocurre cuando el material con exceso de cargas negativas se enlazan con el Al^{3+} formándose complejos órgano-minerales.

8.2 Efectos de los tratamientos con KOH (200 ppm) y Al(OH)₃ (25 ppm)

Efectos sobre la microestructura y porosidad

La aplicación de KOH (200 ppm) en una dilución de 17 mL KOH (200 ppm) / 3 mL H₂O se escogió como tratamiento debido a que redujo la acidez del suelo, teniendo un mayor efecto en TAPA y TAPC donde se alcanzó pH de 6.8, por su parte TAAR llegó a pH 6.5.

Estos cambios se explican porque la adición de KOH incrementa el pH debido a su disociación en K⁺ y OH⁻, de esta manera el OH⁻ reacciona con un H⁺ formando una molécula de agua, mientras que el K⁺ ocupa el sitio del H⁺ (Munson, 1985).

En bosque de coníferas, el tratamiento no genera modificaciones en estructura e indica que presenta agregados estables con estructura pedal migajosa. En los terrenos agrícolas reforestados se promovió el cambio de estructura de microagregados entre granos de piedra pómez a la formación de estructura migajosa en 30% y granular 45% e incrementaron 28.55% de porosidad en TAPA; mientras que en TAAR y TAPC aumentó la estructura migajosa 20% y 30% y la porosidad en 13.37% y 3% respectivamente.

Otro efecto del incremento en pH, a partir del KOH, es la reducción de la disponibilidad de aluminio. El aluminio y los compuestos orgánicos pueden interactuar para promover la formación de microagregados y estructura del suelo (Tisdall y Oades, 1982). Esto explica los incrementos en estructura migajosa y granular.

Por su parte, la aplicación del tratamiento de KOH (200 ppm) complementado con Al(OH)₃ (25 ppm) produjo mayores modificaciones a la microestructura en TAAR donde se observó la formación de estructura granular en 70%, migajosa 10%; mientras el porcentaje de estructura apedal se disminuyó al 20% y la porosidad se incrementó en 22.6%. En TAPA el tratamiento eliminó la estructura apedal y generó un 55% de estructura migajosa, un 45% granular, además hubo un incremento de 26.84% en porosidad. Esto debido a que TAAR presentó la mayor disponibilidad de aluminio a consecuencia del pH registrado.

Una vez que el hidróxido de potasio incrementa el pH hasta 6.5 la disponibilidad de aluminio es mínima (Huang *et al.*, 2002).

Diversos estudios muestran la efectividad del $\text{Al}(\text{OH})_3$ precipitado para mejorar las propiedades físicas de suelos y arcillas minerales (Hsu, 1989). La adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ promueve la formación de compuestos órgano-minerales y alofanos (aluminosilicatos hidratados amorfos) (Harsh *et al.*, 2002). Los óxidos de aluminio pueden actuar como agentes enlazantes de tres formas: a) por la adsorción de compuestos orgánicos en la superficie de los óxidos, b) atracción electrostática entre las cargas positivas de los óxidos y las cargas negativas de las arcillas, c) la formación de puentes entre partículas primarias y secundarias (Oades, 1989; Six *et al.*, 2000). Los primeros dos procesos ocurren a nivel de microagregados, mientras que el tercer proceso es responsable de la estabilización de macroagregados en suelos ricos en óxidos (Six, 2004)

También se ha comprobado que la adición de hidróxido de aluminio incrementa la disponibilidad de nutrimentos. Al respecto, González-Vargas (2011) observó concentraciones mayores de K^+ y Na^+ luego de la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) en Andosoles de Parque Nacional Desierto de los Leones.

En TAPC la estructura apedal continua siendo dominante, lo que permite inferir que es necesario un tratamiento de mayor concentración de aluminio para lograr la formación de aluminosilicatos e incrementar la agregación y porosidad.

Efectos sobre el crecimiento de los árboles

El suelo de los sitios con reforestación, con base a la NOM-021-RECNAT-2000, presentó deficiencias en Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K^+ y N. Esto concuerda con las descripciones de Lara *et al.* (2011) y López (1993).

La aplicación de los tratamientos incrementó el crecimiento del verticilo apical de los árboles en 45% en TAPA, respecto al crecimiento observado en plantas sin tratamiento y 37% para TAAR y TAPC. Por otra parte, en *Pinus ayacahuite* y *Pinus cembroides* el tratamiento también promovió un mayor desarrollo de brotes con máximos de 8 y 5 brotes respectivamente en plantas con tratamiento contra 7 y 4 brotes en plantas sin tratamiento; sin embargo, estas

diferencias no fueron significativas. El crecimiento de las plantas coincide con los efectos del tratamiento en la micromorfología del suelo: el mejor resultado fue en TAPA, en segundo lugar para TAAR y TAPC.

El incremento en el crecimiento del verticilo apical y un mayor número de brotes en las plantas se atribuye a la recuperación de las propiedades, hídricas, químicas y micromorfológicas del suelo a partir de la aplicación de los tratamientos. Al respecto, Aldana-Pérez (2012) indicó que la aplicación de hidróxidos como KOH (30 ppm) favorece la agregación del suelo e incrementa la retención de humedad de 1.4 a 2.9% y porosidad de 22 a 34.5%. Mc-Murry (2008) indica que el hidróxido de potasio puede incrementar el pH del suelo ya que el K presenta una alta capacidad hidrolítica que provoca la formación de bases fuertes; además, el OH^- presente en el medio básico reacciona con los aceites orgánicos, hidrolizando los ésteres con lo cual se reduce la hidrofobicidad del suelo, también se incrementa la disponibilidad de N, P, K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en condiciones de pH neutro.

Con base en todo lo discutido se puede inferir que el cultivo de papa en Andosoles en el P.N Cofre de Perote, provoca la disminución y alteración de las propiedades hídricas, químicas y micromorfológicas; además de limitar el desarrollo de reforestaciones. A través de la estrategia PUMATL es posible habilitar los Andosoles erosionados a partir de un diagnóstico comparando sitios afectados y una zona conservada, para posteriormente establecer las concentraciones de hidróxidos necesarias. La aplicación de los tratamientos (KOH [200 ppm] y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (25 ppm) en suelos erosionados produjeron la formación de estructura pedal granular y migajosa, agregación del suelo e incrementaron los porcentajes de porosidad, redujeron la acidez del suelo y tuvieron efectos positivos en el crecimiento de los individuos en reforestaciones de *Pinus cembroides*, *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*.

8.3 Diagnóstico general caso II municipio de Cardonal, Hidalgo

En el municipio de Cardonal Estado de Hidalgo se ubica el cerro “La Soledad”, cuyo tipo de vegetación es bosque de *Juniperus fláccida- Pinus cembroides* en el cual se lleva a cabo aprovechamiento forestal maderable y no maderable (principalmente extracción de piñón y producción de carbón).

En el año 2011 ocurrieron incendios forestales que afectaron aproximadamente 230 hectáreas de bosque. Se detectaron tres distintos tipos de incendio: Incendio de Copa, Incendio de Copa severo, Incendio superficial; además, del Bosque no afectado y Bosque afectado por sequía.

El diagnóstico de las propiedades hídricas (Cuadro 15) muestra que la repelencia al agua retrasa el inicio de la infiltración hasta 6 minutos y posteriormente se registraron tasas de infiltración muy rápidas. El retraso en la infiltración está relacionado con la hidrofobicidad ya que en BAIC y BAICS la repelencia persiste por 237 y 362 segundos; mientras que, en BAIS se reduce a 11 segundos. La tasa de infiltración disminuye en relación al tipo e intensidad de incendio con valores menores 21% para BAIS, 50% en BAIC y BAICS con respecto a lo observado en el sitio no afectado.

El BNA presentó niveles de hidrofobicidad fuertemente repelentes relacionados con la liberación de sustancias hidrófobas (éteres, esterres y cetonas) por descomposición de la materia orgánica (Doerr *et al.*, 2000).

En BAIC y BAICS registraron hidrofobicidad similar a la observada en bosque. Como se ha mencionado antes, esto se debe a que después de un incendio se forman compuestos hidrófobos debido a la combustión incompleta de la materia orgánica (DeBano, 1981). Estos resultados concuerdan con Mataix-Solera y Doerr (2004) quienes describieron hidrofobicidad de hasta 600 segundos en suelos con altos contenidos de CaCO_3 bajo bosque de pino en zonas afectadas por incendios forestales en España.

BAS presentó menor hidrofobicidad. Debido a que en este sitio las condiciones de sequía han sido prolongadas y la falta de humedad en el suelo ocasiona una disminución en la microfauna. Al respecto, Schmitt y Glaser (2010) indican que una disminución en el porcentaje de humedad en periodos de sequía puede reducir la microfauna del suelo limitando la descomposición de la M.O y por tanto es menor la liberación de sustancias hidrófobas presentes en la hojarasca. Lo anterior también explica los valores obtenidos en BAIS donde además el incendio y las temperaturas que se alcanzaron disminuyeron la capa hidrófoba.

El diagnóstico de la supervivencia de reforestaciones indicó que en las distintas condiciones post-incendio la supervivencia es nula en las plántulas de *Pinus cembroides*, lo que se relaciona con la hidrofobicidad ya que con ello se reduce la disponibilidad de agua y explica el déficit hídrico que presentan las plántulas. Por otra parte, las plántulas de *Pinus greggii* tuvieron mayor supervivencia en BAICS y BAS lo que sugiere su mayor resistencia a las condiciones de sequía, hidrofobicidad y bajas tasas de infiltración.

Con base en lo anterior, se recomienda realizar todos los análisis químicos para calidad de suelos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000, en específico análisis de pH, Na^{2+} , K^+ y Al^{3+} . Además, es necesario realizar la prueba para obtener los requerimientos de hidróxidos para mejorar el pH. Una vez que se establece el tratamiento deberá realizarse su adición en muestras alteradas e inalteradas en estructura para las evaluaciones de micromorfología y parámetros químicos con las cuales se reconoce los efectos del tratamiento. En campo se debe evaluar el efecto de los tratamientos sobre la infiltración, hidrofobicidad y retención de humedad.

Esta zona presenta tepetate cálcico o Caliche, el suelo es alcalino, con altos contenidos de Ca^{2+} y considerando las variaciones registradas en las propiedades hídricas a causa de la ocurrencia de incendios, se recomienda la adición de tratamiento $\text{Al}(\text{OH})_3$. El tratamiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ disminuye el pH del suelo, al respecto Huang *et al.* (2002) indica que la polimerización de $\text{Al}(\text{OH})_3$ en $\text{Al}(\text{OH})_2$

libera iones H^+ que incrementan la acidez del suelo. En condiciones de pH 6.5 disminuye la disponibilidad de aluminio y se promueve la agregación y formación de aluminosilicatos (Harsh *et al.*, 2002). Esto mejora la estructura del suelo y permite el incremento de la porosidad lo que en conjunto conduce a una mayor retención de humedad, importante en estos ecosistemas semiáridos.

9. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que:

- Los terrenos agrícolas reforestados presentan suelos ligeramente ácidos, con una baja fertilidad, pérdida de estructura, baja porosidad y son fuertemente repelentes.
- La adición de KOH incrementó el pH, redujo la hidrofobicidad por ruptura de enlaces esteres en compuestos hidrófobos, incrementó la porosidad y agregación del suelo, ya que disminuye la disponibilidad de aluminio, favorece la formación de complejos e incrementa la formación de enlaces materia orgánica-Al-arcilla.
- La adición del tratamiento de KOH complementado con $\text{Al}(\text{OH})_3$ incrementó en mayor porcentaje la agregación, porosidad, infiltración y retención de humedad en los terrenos agrícolas reforestados, por lo que fue posible registrar mayor crecimiento de los árboles.
- Los incendios en suelos básicos bajo bosques de *Pinus cembroides*, generan suelos fuertemente repelentes, con valores bajos de infiltración, humedad del suelo, menor disponibilidad de agua y explica la nula supervivencia de plántulas. Además se generan escurrimientos y mayor erosión del suelo.
- En los sitios postincendio se recomienda aplicar los hidróxidos de aluminio y la estrategia PUMATL.

10. LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval. O.A., Ortiz H.L.E., Flores R.D., Velásquez R.A.S., Flores C.K. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del Estado de México. *Agrociencia* volumen 37, número 5. p. 435-449.
- Alcalá de Jesús M. Hidalgo M.C. Gutiérrez C. Ma. del C. 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en andisoles. *Terra Latinoamericana*. Volumen 27. Número 4. p. 275-286.
- Aldana-Pérez S.E. 2012. Ecohidrología de una Pradera de Alta Montaña en el Parque Nacional Izta-Popo, Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México D.F.
- Allen B. L., Hajek B. F. 1989. Mineral occurrence in soil environments. 2da edición. Soil Science Society of America, Madison, WI. p. 199-278.
- Alvarado A. Forsythe W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de costa rica. *Agronomía Costarricense*. Volumen 29. Número 1. p. 85-94.
- Américo J. Hossne G. 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, Volumen 26. p. 195-202.
- Ángeles-Cervantes E. R. 1984. Producción de semillas en un piñonar del Estado de Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México D.F.
- Ángeles-Cervantes E.R. 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. Texcoco.

- Armas E.S., Hernández M.J.M., Muñoz C.R., Regalado C.M. 2003. Physical properties of “sorriba”cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma*. Volumen 117. p. 297-311.
- Arriaga L., Espinoza J.M., Aguilar C., Martínez E., Gómez L., Loa E. (coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Arce J. L., Gardner J. E., Macías J. L. 2011. Mineralogía y petrología de muestras naturales y experimentales de la erupción pómez Toluca inferior, volcán nevado de Toluca. *Boletín de Mineralogía*. Número 19. p. 13.
- Ávila C.G.R. Gutiérrez C. Ma. del C. Ortiz S.C.A. Ángeles C. E. R. Sánchez G.P. 2011. Evaluación de las reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* Volumen 17 Número 3. p. 303-312.
- Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H. 2000. Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. *Journal of Hydrology*. p 66–75.
- Brady N. C., Weil R. R. 1999. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. 345 pp.
- Bravo M., Fregoso L., Medina L. 2006. *Parámetros de erosionabilidad del modelo WEPP para Andosoles con uso pecuario en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán*. *Técnica Pecuaria en México*. Volumen 44, número 1. p.129-141.
- Broquen P., Falbo G., Frugoni C., Girardin J.L., Guido M., Martinese P. 2000. Estructura y porosidad en Andisoles con vegetación natural y con plantaciones de *Pinus ponderosa* Dougl. en el sudoeste de Neuquén, Argentina. Volumen 21, número 1. p. 25-36.

- Bullock P., Jongerius A., Tursina T., Fedoroff N., Stoops G. 2004. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C. y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México. 154 pp.
- Buol S.W., Hole F.D., McCracken R.J. 2000. Génesis y Clasificación de Suelos. Trillas. México. 417 pp.
- Campos-Cascaredo A. 2004. Effects of subsistence farming system on soil surface CO₂-C flux on Cofre de Perote volcano slopes, Veracruz (México). *Forest Ecology and Management*. Volumen 199. p. 273–282.
- Campos-Cascaredo A., Oleschko L.K., Cruz H.L., Etchevers B.J., Hidalgo M.C. 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del Volcán Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana*. Volumen 19. p. 105-116.
- Campos-Cascaredo A., Oleschko L.K., Etchevers B.J., Hidalgo M.C. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management*. Volumen 248. p. 174–182.
- Castro-Alonso A. 2009. Conductividad hidráulica en bosques y praderas de alta montaña de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México D.F.
- Cervantes, V., Carabias J., Arriaga V. 2008. Evolución de las políticas públicas de restauración ambiental, en *Capital natural de México*, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad. CONABIO, México, p. 155-226.
- COLPOS, SEMARNAT. 2008. Reforestación, Evaluación externa ejercicio fiscal 2007. 102 pp.
- CONAFOR. 2011. Manual para la producción de árboles de navidad. SEMARNAT. 48 pp.

- Cruz H.L., Geissert K.D. 2000. Carga eléctrica de los Andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. Terra, Volumen 18, número 2. p. 115-124.
- DeBano L. F. 1981. Water repellent soil: a state of the art. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW California. Volumen 46. 21pp.
- DeBano L. F. 1989. Effects of fire on Chaparral soils in Arizona and California and postfire management implications. En: Berg N. Coord. *Proceedings of the symposium on fire and watershed management*. USDA forest Service Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station. General Technical Report PSW. Volumen 109. p. 55-62.
- DeBano L. F. 2000. Water repellency in soil: a historical overview. Journal of Hydrology. Volumen 4. Número 32p. 231-232
- Diez-Hernández J. M. 2008. Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales. Revista de ingeniería e investigación. p. 97-107.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth Science Reviews. Volumen 51. p 33-65.
- Dörner J., Dec, D., Zuñiga, F., Sandoval, P., Horn, R. 2011. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. Soil & Tillage Research. Número 115-116. p. 71-79.
- Dubroeuq D., Geissert K.D., Barois, I., Ledru, M. 2002. Biological and mineralogical features of Andisols in the Mexican volcanic highlands. Catena. Volumen 49. p. 183-202.
- Duque Z.J.R., Arbeláez M.S.P., Jaramillo J.D.F., León P.J.D., 2004. Hidrofobicidad en Andisoles bajo robledal (*Quercushumboldtii*) y plantaciones forestales

(*Pinuspatula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada piedras blancas (Medellín, Colombia). Facultad de Ciencias Agropecuarias de Colombia.

Etchevers J. D., Cruz L., Mares J., Zebrowski C. 1992. Fertilidad de los tepetates. I fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada México. Terra. Volumen 10. p 379-384.

Farrell M., Healey R.J., Godbold L.D., Nason A.M., Tandy S., Jones L.D. 2010. Modification of Fertility of Soil Materials for Restoration of Acid Grassland Habitat. Restoration Ecology. p. 1-11.

Fitzpatrick E.A. 1993. Suelos: su formación, clasificación y distribución. Ed. Continental. México.

Fox D.M., Bryan R.B., Fox C.A. 2004. Changes on pore characteristics with depth for structural cruts. Geoderma. Número 120. p. 109-120.

Gabriels D., Lobo D., Pulido M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada. Venesuelos. p. 7-22.

Gama C.J., Solleiro R.E., Flores R.D., Sergey S., Cabadas B.H., Díaz O.J. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 59. Número 1. p. 133-145.

García E. 1998. Modificaciones al sistema de clasificación Climática de Koppen para adaptarlo a la República Mexicana. México.

Geissert K.D., Gómez T.C.A., Martínez H., Meza P.E., Enríquez F.E. 2013. Cartografía del Suelo para la Identificación de Unidades Hidroedáficas Funcionales en una Cuenca de Montaña: Conceptos y propuesta metodológica. Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Morelia. 217 pp.

- Giner R. A., Fierro M. L. C., 2012. Análisis de la problemática de la sequía 2011 – 2012 y sus efectos en la ganadería y la agricultura de temporal. Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). 12 pp.
- Goebel, M. O., Bachmann, J., Woche, S. K., Fischer, W. R. 2005. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter. *Geoderma*. Número 128. p 80-93
- Gómez M. I., Torres P. 2012. Determinación de las curvas de absorción nutricional y eficiencia de la fertilización para ajustar la recomendación de nutrientes en el cultivo de papa en la variedad Diacol Capiro, y pastusa suprema. Planicie Cundi-Boyacense. Proyecto Fedepapa-Ingeplant. Mosquera. p 7.
- Gómez-Tagle A., Batlle S.J., Zepeda C.H., Guevara S.M.A., Maldonado L.S., Pintor A.J.E. 2008. Conductividad Hidráulica Saturada de campo: uso de un Infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. Volumen 6. Número 4. p. 287-297.
- Gonzales-Montiel E. 2013. Manejo forestal y servicios ambientales en Mineral del Monte, Estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- González-Vargas T. 2011. Ecohidrología de un Bosque de Oyamel: Diagnóstico y Rehabilitación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Granged A. J.P. Martínez-Zavala L. Jordán A. Bárcenas-Moreno G. 2011. Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: a 3-year study. *Geoderma*. Número 164. p 85-94.

- Gudmundsson T., Björnsson H., Thorvaldsson G. 2004. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. *Catena*. Número 56. p. 213-224.
- Guerra J.A., Arbelo C.D., Armas C.M., Rodríguez R.A., Mora J.L. 2003. Erosión diferencial de Andosoles y aridisoles en dos zonas climáticas de la isla de Tenerife. *Edafología*. Volumen 10. Número 2. p. 229-237.
- Gutiérrez C. Ma. C., Ortiz S. C. A., (traductores). 1999. Manual para la Descripción Micromorfológica de Suelos. Primera edición en español. Colegio de Posgraduados Montecillo. México.
- Harden C. Scruggs P. 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*. Número 55. p 5-24.
- Harsh J. Chorover J. Nizeyimana E. 2002. Soil Mineralogy with Environmental Applications. Capítulo 9. Soil Science Society of America Book Series, no. 7. Estados Unidos de América. p. 291-322.
- Hernández-Ordoñez J.O. 2014. Diagnóstico y habilitación de suelos forestales con presencia de manganeso-hierro, caso Villa del Carbón, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Hsu P.H. 1989. Aluminium hydroxides and oxyhydroxides. *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison. WI. p 331-378.
- Huang P.M. Wang M.K. Kampf N. Schulze D.G. 2002, Soil Mineralogy with Environmental Applications. Capítulo 8. Soil Science Society of America Book Series. Número 7. p. 261-289.
- Inbar Assaf, Marcos Lado, Marcelo Sternberg, Haim Tenau, Meni Ben-Hur. 2014. Forestfire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. *Geoderma*. Número 221-222. p 131-138.

- Jiménez-Cruz D. 2011. Restauración del Servicio Ambiental Hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D. F. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Jordán A. Zavala L.M. Nava A.L. Alanís N. 2009. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*. Número 79. p. 60-71.
- Kleber M., Mikutta C., Jahn R. 2004. Andosols in Germany pedogenesis and properties. *Catena*. Número 56. P. 67–83.
- Krasilnikov, Gutiérrez C. Ma. C., Ahrens. 2013. The Soils of Mexico. Medios para expertos. Alemania.
- Krasilnikov P., Jimenez N.F.J., Reyna T.T., Garcia C.N.E., 2011. Geografía de los suelos de México. Las prensas de ciencias. UNAM. 462 pp.
- Lal R. Stewart B.A. 1990. Advances in soil science, soil degradation. New York. Springer Verlag. 349 pp.
- Lal R. Blum W.H. Valentine C. Stewart B.A. 1998. Basic concepts: degradation, resilience and rehabilitation. *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press. p. 1-16.
- Lara S.I., Vera C.J.G., Juárez M.A., Ibarra M.E. 2011. Manual para la producción de árboles de navidad. Comisión Nacional Forestal. Primera edición. Gerencia Regional XIII Valle de México. México.
- Letey, J., Carrillo M.L.K., Pang X.P. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*. Número 231. p. 61-65.
- Lipiec J., Wójciga A., Horn R. 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil y Tillage Research*. Número 103. p. 170–177.

- López L. M. A. 1993. Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones, DF. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados, Montecillo, México. 102 pp.
- Maderey R .L. 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Textos Universitarios 1, México.
- Mallik A.U., Gimingham C.H., Rahman A.A. 1984. Ecological effects of heather burning: 1. Water infiltration, moisture relation and porosity of surface soil. *Journal of Ecology*. Número 72. p. 767-776.
- Mataix-Solera J., Cerdà A., Arcenegui V., Jordán A., Zavala L.M. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*. Número 109. p. 44–60.
- Mataix-Solera J., Doerr S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*. Número 118. p.77 – 88.
- Mc-Murry J. 2008. Química orgánica. Ed. Cengage Learning. 7ª ed. México. 1224 pp.
- Meza, P. E., Geissert K.D. 2003. Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*. Volumen 5. Número 2. p. 57- 60.
- Meza P.E., Geissert K.D. 2006. Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivado. *Terra Latinoamericana*. Volumen 24. Número 2. p. 163-170.
- Mielniczuk I., Schneider P. 1984. Aspectos socio-económicos de la gestión del suelo en el sur de Brasil. Simposio del Suelo y la labranza en el sur de Brasil y III Simposio de Conservación de la Meseta del suelo. p. 3-19.

- Mora S.A., Páez R.J.C., Ángeles C.E.R. 2011. Evaluación del servicio ambiental hidrológico del Parque Nacional Pico de Orizaba. 7º Congreso de Investigación y 1º de Posgrado en la FES Zaragoza, UNAM.
- Morgan R., McIntyre K., Vickers, A.W., Quinton, J. N., Rickson R.J. 1997. A rainfall simulation study of soil erosion and rangeland in Swaziland. Scholl of Agriculture Food and Enviroment, Cranfield University. Volumen 11. p 291-299.
- Müller K., Deurerb M., Newton P. 2010. Is there a link between elevated atmospheric carbon dioxide concentration, soil water repellency and soil carbon mineralization. Agriculture Ecosystems and Environment. Volumen 139 . p. 98-109.
- Munson, R. D. 1985. Potassium in Agriculture. American Society of Agronomy, Inc.
- Muñoz-Villers L.E., Equihua M., Tobón C., Gutiérrez, M.F. 2011. Efectos del uso de suelo en la hidrología de cuencas de montaña del centro oriente de México. Retos de la Investigación del Agua en México. Eds.UNAM-CRIM, RETAC, CONACyT. Cuernavaca-Morelos, México. 754 pp.
- Neumann A., Torstensson G., Aronsson H. 2012. Nitrogen and phosphorus leaching losses from potatoes with different harvesttimes and following crops. Field Crops Research. Número 133. p.130–138.
- NOM-021-RECNAT. 2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, D.F. México. 85 pp.
- Núñez-Sánchez A.E., Carrión G., Núñez C.Ma.C., Rebolledo D.O. 2003. Densidad de Población de Quistes de *Globodera rostochiensis* Woll. en el Cofre de Perote, Veracruz, México. Revista Mexicana de Fitopatología. Volumen 21. Número 2. p. 207-213.

- Oades M.J. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Ortiz-Solorio C.A. 2010. Edafología, 8^{va} edición. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, México. 327 pp.
- Ortiz-Solorio C.A., Tavares-Espinoza C.A. 1999. Especialidad de edafología, primera Edición en Español. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 145 pp.
- Ortiz-Solorio C.A. 2011. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales/Colegio de Postgraduados, Montecillo.
- Pape Th., Lager. 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University. p. 1-19.
- Peters J., Wieme V., Boeckx P., Samson R., Godoy R., Oyarzún C., Verhoest N. 2005. Monitoreo ecohidrológico en ecosistemas naturales y manejados en el sur de Chile. Gayana Botánica. Volumen 62. Número 2. p.120-129.
- Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.L. y Collinet J. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*. Número 45. p. 199-218.
- Rodríguez R.A., Arbelo, C.D., Guerra J.A., Mora J.L. 2002. Erosión Hídrica en Andosoles de las Islas Canarias. Edafología. Volumen 9. Número 1. p. 23-30.
- SEMARNAT, Colegio de Posgraduados. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional. SEMARNAT-Colegio de Posgraduados. 58 pp.

- Schmitt A., Glaser B. 2010. Organic matter dynamics in a temperate forest soil following enhanced drying. *Soil Biology & Biochemistry*. Número 43. p. 478-489.
- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., y Broderson W.D. 2012. Field book for describing and sampling soils. Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Schoenholtz S., Van-Miegroet H., Burger J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. Número 138. p 335-356.
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* Volumen 32. p. 2099-2103.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Deneff K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage*. p. 79: 7-31.
- Soil Survey Staff. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducido por: Ortiz S. Carlos. A., Gutierrez C. Ma. Del Carmen, Hernández L. A. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Natural Resource Conservation Service (NRCS).
- Stoops, G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil Science Society of America. Madison, WI. 184 pp.
- Stoops, G., Marcelino, V. Mees, F. 2010. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier. Amsterdam. p. 329–350.
- Shuklaa M.K., Lal R., Ebinger M., Meyer C. 2006. Physical and chemical properties of soils under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments*. Volumen 66. p. 673–685.

- Thomas A.L. King D. Dambrine E. Couturies A. Roque A. 1999. Predicting soil classes with parameters derived from relief geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (northeastern France). *Geoderma*. Volumen 90. p. 291–295.
- Tessler N., Wittenberg L., Malkinson D., Greenbaum N. 2008. Fire effects and short-term changes in soil water repellency–Mt. Carmel, Israel. *Catena*. Volumen 74. p. 185–191.
- Tisdall J.M. Oades J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. Volumen 33. p. 141–163.
- Ulrich, T., Domínguez, G., Bolaños, J., L. 2013. De lo Insostenible a lo Sustentable propuestas básicas, indicadores y casos de éxito para tomar decisiones sustentables en México. Editorial IEXE. 358 pp.
- UDSA. 2001. Soil Quality Test Guide. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Natural Resources Conservation Service Soil Quality Institute. 82 pp.
- Van der Salm, C., Reinds, G.J., de Vries, W. 2007. Water balances in intensively monitored forest ecosystems in Europe, *Environmental Pollution*. Volumen 148. p. 201-212.
- Van Rants E., Utami S., Verdoodt A. y Qafoku N. 2008. Mineralogy of a perudic Andosol in central Java, Indonesia. *Geoderma*. Número 144. p. 379-389.
- Van Reeuwijk L.P. 1999. Procedimientos para análisis de suelos. Versión 1995. Traducción de: Ma. del Carmen Gutiérrez C., Carlos A. Tavares E. y Carlos A., Ortiz S. Primera edición en Español, 1999. Especialidad de Edafología. Colegio de Posgraduados, Montecillo, México. pp. 145.
- Velasco M. 1983. Uso y manejo del suelo. Estudios de Campo, Determinaciones Físicas y Químicas, Prácticas de Recuperación y Manejo. Limusa. México, D. F. p. 81-184.

- Volker P. 2012. On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil & Tillage Research*. Número 120. p. 137–146.
- Wada K. 1980. Mineralogical characteristics of Andisols. pp. 87-107. In: K. G. Theng (ed.). *Soils with variable charge*. New Zealand Society of Soil Science. Lower utt, N.Z.
- WRB Grupo de Trabajo IUSS. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. Número. 103. FAO, Roma.
- Xiaolin D., Qi D., Ming L., Weibo W., Quanfa Z., Xiaolin Ch. 2013. Reforestation of *Pinus massoniana* alters soil organic carbon and nitrogen dynamics in eroded soil in south China. *Ecological Engineering*. Volumen 52. pp 154–160.
- Yamada I.S., Shoji S., Kobayashi y Masui. J. 1975. *Chemical and mineralogy studies of volcanic ashes. Relationship between rock types and mineralogic properties of volcanic ashes*. Soil Science. Volumen 21. p. 319-326.
- Zavala L. M., González, F. A. y Jordán A. 2009. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*. Número 152. p. 361-374.
- Zavala L.M., Granded A.J.P., Jórdan A., Bárcenas-Moreno G. 2010. Effects of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma*. Número158. p. 366-374.
- Zehetner F. y Miller W. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*. Número 65. p. 201-213.

REFERENCIAS

Comisión Nacional Forestal CONAFOR (2013) Programa Nacional Forestal. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/tramites-y-servicios/apoyos-2013> (Mayo 08 de 2014).

Comisión Nacional Forestal CONAFOR (2010) Estudio Regional Forestal de la Unidad de Manejo Forestal 1305 “Jacala-Tlahuiltepa”. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/3237Estudio%20Regional%20Forestal%201305..pdf> (Julio 06 de 2014).

INAFED (2012) Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/municipios/13015a.html> (Agosto 08 de 2014).

Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura FAO (2014) Degradación del suelo. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/es/> (Agosto 10 de 2014).

Comisión Nacional Forestal CONAFOR (2013). Reporte semanal de resultados de incendios forestales del 01 de enero al 23 de septiembre de 2013. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/4215Reporte%20Semanal%202013%20-%20Incendios%20Forestales.pdf> (Agosto 13 de 2014).

Anexo I

Resultados de las pruebas T-Student ($P=0.05$) para las propiedades químicas e hídricas del suelo y crecimiento en arboles de reforestaciones en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.

Prueba T-Student para propiedades químicas

Sitios	pH	MO	N	P	CIC
B.c vs TAAR	0.03792082	0.00216977	0.00547839	0.00547839	0.004984546
B.c vs TAPA	0.06885136	0.00046555	0.00187137	0.00187137	0.001289934
B.c vs TAPC	0.02415672	0.00023235	5.6577E-05	5.6577E-05	0.010077555
TAAR vs TAPA	0.26485763	0.11223139	0.04896764	0.04896764	0.006452895
TAAR vs TAPC	0.06736306	0.06461808	0.06231189	0.06231189	0.197806577
TAPA vs TAPC	0.09175171	0.00620417	0.21859245	0.21859245	0.041884703

Sitios	Ca	Mg	K	Na	PSB
B.c vs TAAR	0.00145974	0.10991564	0.01223095	0.01950617	0.182446902
B.c vs TAPA	0.00033598	0.04251208	0.18333576	0.02859548	0.35246074
B.c vs TAPC	0.00222192	0.01131791	0.04201625	0.01887478	0.036065784
TAAR vs TAPA	0.12849493	0.38745304	0.01993488	0.01887478	0.019749681
TAAR vs TAPC	0.27371396	0.10141607	0.30218586	0.37090056	0.179017832
TAPA vs TAPC	0.49726	0.01478351	0.1815222	0.12476061	0.068515767

Prueba T-Student para Hierro y Aluminio extractables por Ditionito y Oxalato (Fe_d , Al_d , Fe_o , Al_o)

Sitios	Al_d	Fe_d	Al_3O_3	Fe_2O_3
B.c vs TAAR	0.09260057	0.069571832	0.092600573	0.06957183
B.c vs TAPA	6.9066E-05	0.060930842	6.90662E-05	0.06093084
B.c vs TAPC	6.8991E-05	0.007953383	6.89912E-05	0.00795338
TAAR vs TAPA	0.04170895	0.158441898	0.041708954	0.1584419
TAAR vs TAPC	0.05317645	0.00861385	0.053176455	0.00861385
TAPA vs TAPC	0.2433365	0.142957281	0.243336499	0.14295728

Sitios	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₃ O ₃	Fe ₂ O ₃
B.c vs TAAR	0.13533959	0.062098803	0.135339588	0.0620988
B.c vs TAPA	0.00026038	0.012693167	0.000260381	0.01269317
B.c vs TAPC	0.00052407	0.013674008	0.000524071	0.01367401
TAAR vs TAPA	0.00251831	0.04016134	0.002518313	0.04016134
TAAR vs TAPC	0.00388419	0.029275613	0.003884192	0.02927561
TAPA vs TAPC	0.19779684	0.058020795	0.197796844	0.05802079

Prueba T-Student para propiedades hídricas

Sitios	Infiltración superficial	Infiltración a 5 cm	Densidad aparente	Porcentaje de humedad	Hidrofobicidad	Porosidad
B.c vs TAAR	0.00561419	0.08278329	0.00513644	0.04554237	0.00835349	0.002906
B.c vs TAPA	0.28725872	0.09024923	0.19137336	0.07702618	0.001234861	0.001008
B.c vs TAPC	0.30248543	0.06758017	0.03306155	0.48704221	3.2629E-05	ND
TAAR vs TAPA	0.04294956	0.13301916	0.04708919	0.00884794	0.398413176	ND
TAAR vs TAPC	0.03629073	0.09141593	0.11633094	0.03178058	0.071345583	ND
TAPA vs TAPC	0.05810526	0.29724715	0.126938	0.17445875	0.003570772	0.026013

Prueba T-Student para crecimiento de reforestaciones

Sitio	Condición	Crecimiento	No. de ramas verticales	No. de yemas
TAAR	c/t vs s/t	0.043717837	0.481644479	0.32266872
TAPA	c/t vs s/t	0.001706763	0.5	0.03661855
TAPC	c/t vs s/t	0.120998795	0.058213758	0.13321802

Prueba T-Student para infiltración superficial e hidrofobicidad en el municipio de Cardonal, Hidalgo.

Sitios	Infiltración superficial	Hidrofobicidad
BNA vs BAIS	0.37912553	0.174458267
BNA vs BAIC	0.09161214	0.070022611
BNA vs BAICS	0.15577404	0.187963168
BNA vs BAS	ND	0.281476056
BAIS vs BAIC	0.24777186	0.082708463
BAIS vs BAICS	0.20539973	0.182446902
BAIS vs BAS	ND	0.179017832
BAIC vs BAICS	0.42801334	0.35246074
BAIC vs BAS	ND	0.068515767