



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**INCENDIOS Y SU EFECTO EN LA MINERALOGÍA
DEL SUELO DE UN BOSQUE DE PINO-PIÑONERO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGA**

Presenta:

MALENY GUADALUPE OROZCO MÉNDEZ

Directora de tesis:

DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

Asesor interno:

DR. EFRAÍN REYES ÁNGELES CERVANTES

Proyecto PAPIIT IN221614

Ciudad de México, junio 2017





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.

RESUMEN

Los incendios forestales tienen efectos positivos y negativos sobre las propiedades mineralógicas, físicas y químicas del suelo. Estos efectos dependen del tipo de vegetación y temperatura e intensidad del fuego, y liberan los nutrientes y minerales presentes en las plantas. Sin embargo, la clasificación de los incendios se basa en apreciaciones de campo las cuales pueden ser subjetivas. La mineralogía del suelo y los cambios que ocurren a diferentes temperaturas pueden ser una clasificación más precisa. El presente estudio tiene por objetivo determinar el efecto de los incendios sobre la composición mineralógica y algunas propiedades físicas y químicas de suelo de un bosque de pino piñonero en el municipio de Cardonal Hidalgo. En la zona de estudio ocurrió un incendio en 2011 afectando principalmente a *Pinus cembroides* con diferentes intensidades. De acuerdo con la clasificación de CONAFOR se seleccionaron ocho sitios de muestreo: cuatro afectados por incendio: Bosque por incendio superficial (BISUP), Bosque por incendio de copa moderado (BICM), Bosque por incendio de copa severo (BICS) y Bosque incendio de copa severo hace 50 años (BICS 50) y además, se seleccionaron tres testigos: Bosque no afectado de *P. cembroides* con y sin Fe (BNA y BNA(Fe)) y Bosque no afectado de *P. pinceana* (BNA(PP)), y un sitio afectado por sequía prolongada (BASEQ), que puede favorecer un incendio. El muestreo de suelo fue aleatorio, obteniendo tres muestras alteradas por sitio de la capa superficial de 0-5 cm y en algunas de 5-10 cm. En laboratorio las muestras testigo se sometieron a diferentes temperaturas: 250°C, 450°C y 600°C y posteriormente fueron analizadas con difracción de rayos X para determinar los cambios en la mineralogía. También se determinaron pH, materia orgánica (MO), N_{tot} , P_{dis} , capacidad de intercambio catiónico (CIC), Fe, Al y textura. De acuerdo con la composición mineralógica, los suelos presentan albitas, calcita magnésica, dolomita, goethita, magnetita y arcillas 2:1. La mineralogía no cambia a temperaturas menores a 600°C, sólo cambia en incendio de copa severo, donde se destruyó la mayoría de los minerales, sobre todo las arcillas, por lo que la temperatura debió de ser superior a los 600°C. Con base en estos cambios se puede indicar que en BISUP y BICM se reducen los valores de pH, Ca, Mg, K, Na y CIC y se incrementa el contenido de MO, N, P; mientras que en BICS se reduce el pH, Ca y Na se incrementa MO, N, P, Mg, K y CIC. La textura es afectada en la capa superficial en BICM y hasta los 10 cm en BICS. La mineralogía del suelo se puede utilizar como un indicador de las temperaturas alcanzadas en un incendio.

Palabras clave: Incendios forestales, mineralogía de suelo, difracción de rayos X, temperatura y *P. Cembroides*.

DEDICATORIA

A mi padre quien ha estado a mi lado en todo momento, por su paciencia, amor y cariño durante toda la vida, por la educación que me diste, que me hicieron convertirme en la persona que soy hoy, eres mi ejemplo de vida.

A mis tías Carmen e Irene y a mi abuelita Bertha, por su apoyo incondicional hoy y siempre, demostrándome que una familia se apoya en todo momento gracias.

A mis Hermanas Silvia y Amanda que son mis amigas en las con las que siempre podré contar y confiar, que con todos esos momentos y experiencias compartidas me motivaron e impulsaron a querer ser una persona mejor cada vez.

A mis sobrinas Vanessa y Paulina y a mis primos Zaudy, Angel y Adán que espero hagan lo que les apasiona y cumplan sus metas de vida, porque todo se puede con dedicación y perseverancia.

A mi amado esposo Jonathan Omar que con su amor y confianza me motivan a ser una mejor versión de mí. Juntos lograremos grandes cosas.

A Padmé quien es la fuente de inspiración más bonita para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas del conocimiento.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por haberme permitido tener la mejor formación académica.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, por la beca otorgada bajo el proyecto titulado “ECOLOGIA DEL FUEGO EN BOSQUES DE PINO PIÑONERO” DGAPA-UNAM-IN221614.

Al Dr. Efraín Ángeles Cervantes, por aceptarme en su equipo de trabajo porque más que como alumnos nos trató como familia y amigos impulsándonos a lograr nuestras metas académicas y personales, por esos grandes consejos en especial cuando nos decía “Puedes o mejor déjalo”. Por todo el apoyo y en especial por compartir sus conocimientos conmigo que son un pilar importante en mi vida.

A la Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena por compartir sus vastos conocimientos conmigo, por la paciencia, dedicación y apoyo incondicional en la realización de esta tesis. Gracias por esos consejos que ayudaron a mejorar este trabajo y más que eso a mejorar mi vida académica, y demostrarme que aún me falta mucho por aprender, en especial gracias por ser un gran ejemplo a seguir.

Al COLPOS, en especial al Laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos por abrirme sus puertas para poder realizar todos mis análisis. A Juanito, Don Peter, el abuelo (Mario), Laurita, por el apoyo y las experiencias compartidas que me motivaban a trabajar en el laboratorio.

A M. C. Patricio Sánchez Guzmán y al Dr. Carlos Ortiz Solorio, por su apoyo y por compartir sus conocimientos conmigo.

Al M. C Jonathan Omar Hernández, por todos los momentos que compartimos, aún recuerdo el primer día que te vi, dije ese tipo tan grosero, sin saber que serias parte de esto desde el inicio hasta el fin y mejor aún que serias parte de mi vida, gracias por apoyarme e impulsarme a terminar la tesis, por esos esas palabras de aliento para

seguir adelante, por confiar en mí, porque al fin aquí está el ya casi por fin terminado, estoy lista para lo que sigue.

A Lucila Ordoñez, por ser una excelente persona y todo el cariño y apoyo brindado en todo momento.

A la Familia de Don Luis y doña Mary por su generosidad y calidez humana que nos recibieron en todo momento.

A mis compañeros de laboratorio que se volvieron amigos Marianita, Sandy, Monsecita, Gabrielito, Jess, esas salidas a campo fueron lo mejor, aprendimos mucho y sobre todo ustedes hicieron que fueran muy divertidas. También agradezco a Javi, Paez y Judith (la china), Belencita. A mis amigos que estuvieron a lo largo de la carrera a Eli por ser mi amiga y confidente, a Fer, Paula, Erika, Christian, Charly, Armando, a Gil que está presente desde el primer día de la carrera jeje.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	II
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1. Bosques de <i>Pinus cembroides</i> en México	2
2.1.1. Incendios sobre bosque de <i>Pinus cembroides</i>	3
2.2. Incendios forestales	4
2.2.1. Intensidad y clasificación de los incendios forestales	5
2.2.2. Efecto de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo	5
2.3. Composición mineralógica y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo	8
2.3.1. Minerales como nutrimentos del suelo	9
2.3.2. Importancia de los minerales presentes en el suelo derivados de calizas	10
2.3.3. Efecto de los incendios sobre la mineralogía del suelo	10
2.3.4. El uso de la mineralogía en el estudio de los incendios forestales	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. HIPÓTESIS	13
5. OBJETIVOS	14
Generales.....	14

Particulares.....	14
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
6.1. Zona de estudio.....	14
6.2. Selección de sitios de muestreo.....	19
6.3. Toma de muestras y determinación de la composición mineralógica, física y química del suelo.....	21
6.3.1. Análisis mineralógico de suelo.....	22
6.3.2. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo.....	23
6.3.3. Análisis estadístico.....	26
7. RESULTADOS.....	27
7.1. Propiedades mineralógicas del suelo.....	27
7.2. Propiedades físicas y químicas del suelo.....	31
8. DISCUSIÓN.....	42
8.1. Efecto de los incendios forestales sobre: Las propiedades mineralógicas del suelo de un bosque de <i>Pinus cembroides</i>.....	42
8.2. Efecto de los incendios forestales sobre: Las propiedades físicas y químicas del suelo un bosque de <i>Pinus cembroides</i>.....	43
9. CONCLUSIONES.....	48
10. LITERATURA CITADA.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
1. Principales minerales primarios y su aporte de nutrientes al suelo.....	9
2. Clasificación de la intensidad de incendios forestales.....	12
3. Nomenclatura para la asignación del sitio.....	19
4. Clasificación de pH.....	23
5. Porcentaje de Materia Orgánica.....	23
6. Porcentaje de Nitrógeno inorgánico.....	24
7. Fósforo disponible, por Olsen.....	24
8. Capacidad de Intercambio Catiónico.....	25
9. Cationes Intercambiables.....	25
10. Propiedades químicas de los suelos presentes en Cardonal, Hidalgo.....	33
11. Concentraciones de Hierro y Aluminio, en suelos de Cardonal, Hidalgo.....	39
12. Clase textural en suelos de Cardonal, Hidalgo.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Mapa de distribución de <i>Pinus cembroides</i>	3
2. Mapa temático correspondiente al tipo de clima predominante en el área de estudio	15
3. Mapa temático correspondiente a la geología predominante en el área de estudio.....	16
4. Mapa temático correspondiente al tipo de suelo predominante en el área de estudio.....	17
5. Mapa temático correspondiente al tipo de vegetación y uso de suelo predominante en el área de estudio.....	18
6. Localización de los sitios de muestreo.....	20
7. Sitios de muestreo.....	20
8. Toma de las muestra de suelo en el área de estudio.....	21
9. Preparación de muestras para determinación mineralógica.....	22
10. Triángulos combinados de textura.....	26
11. Difractogramas de rayos X bosque no afectado.....	27
12. Difractogramas de rayos X de los diferentes sitios de la zona de estudio de suelo afectado.....	28
13. Difractogramas de rayos X de los diferentes sitios de la zona de estudio de suelo a no afectado sometidos a distintas temperaturas.....	30
14. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT- 2000, en los diferentes sitios de estudio (a):.....	34
15. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT- 2000, en los diferentes sitios de estudio (b):.....	37
16. Propiedades químicas, Hierro y Aluminio en los diferentes sitios de estudio:.....	40

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son importantes en la dinámica de algunos bosques de coníferas, sin embargo, se desconoce el efecto que pueden generar en los bosques de *Pinus cembroides* o piñonares. Los bosques de coníferas ocupan el 16.4% del territorio nacional (INEGI, 2011) esta especie ocupa la mayor extensión en climas semiáridos, distribuidos al norte y centro del país (Rzedowski, 2006). Estos bosques se establecen generalmente sobre suelos delgados, poco fértiles, con fuertes pendientes sobre rocas calizas (Rzedowski, 1978; Quero, 1984; CONABIO, 2012). En contraste con la mayoría de los bosques de pinos que se desarrollan sobre suelos ácidos o en condiciones más húmedas.

En la región del Cardonal, localizada al centro del Estado de Hidalgo, se presentan bosques de *P. cembroides*, los cuales de acuerdo con fuentes locales, en el año 2011 sufrieron un incendio que afectó más de 600 hectáreas y desde entonces no se han regenerado.

La intensidad y temperaturas de los incendios en Andosoles pueden afectar el crecimiento de las plantas (Ángeles-Cervantes, 2010), a través de la modificación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Klein y Hurlbut, 1996; Anmonnette, 2000; 2010; Soil Survey Staff, 2010) sobre todo en la superficie del suelo. Conocer la intensidad y temperatura alcanzadas por los incendios forestales a través de indicadores edáficos o bien a través de cambios en la mineralogía de suelo puede ser una alternativa para establecer prácticas de manejo y conservación más adecuados a suelos y bosques. Para ello es necesario caracterizar a los suelos y realizar experimentos controlados que permitan correlacionar los cambios en las propiedades del suelo con las diferentes intensidades y temperaturas que se puedan alcanzar en un incendio. Con base en lo anterior surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo son las propiedades mineralógicas, físicas y químicas presente en los suelos de estos bosques antes y después de un incendio?
- ¿Los incendios forestales generan cambios en la mineralogía de un suelo de origen calcáreo?
- ¿La mineralogía del suelo puede llegar a ser un indicador para conocer los grados de temperaturas alcanzados en los incendios forestales de un bosque de pino piñonero?

Las posibles respuestas a estas interrogantes ayudarán a establecer si el análisis mineralógico puede ser un nuevo parámetro de medición para conocer la intensidad de los incendios forestales; además, permitirá conocer el efecto que genera sobre el repoblamiento vegetal y los servicios ambientales de este tipo de bosques.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. *Bosques de Pinus Cembroides en México*

Los bosques de pino piñonero son uno de los más extensos dentro de la República Mexicana y se ubican en el límite de la vegetación xerófila de climas áridos y la boscosa de montañas templadas (Rzendowski, 1978). Se distribuye sobre las laderas de cerros y lomeríos, pendientes secas y rocosas al pie de las montañas en 19 estados como Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León, Zacatecas, entre otros (Figura 1). El clima donde se desarrolla es el templado seco (Bsk) o templado subhúmedo (Cwb); crecen sobre suelos pobres, pedregosos, de colores que van desde grisáceos hasta negros; pHs neutro a alcalino y generalmente se forman a partir de rocas caliza y gypsíferas (CONABIO, 2010). De acuerdo con la CONAFOR (2010), estos bosques se desarrollan sobre Feozems, Leptosoles, Regosoles, Rendzinas y Xerosoles, con texturas areno-arcillosas a migajón-arenosa, con alta pedregosidad y con porcentajes medios de materia orgánica; además es una especie resistente a la sequía y altamente adaptativa a diferentes condiciones. La importancia económica de esta especie radica en su semilla (piñón); aunque también se puede utilizar como leña y carbón y su resina se usa como materia prima para impermeabilizantes y pegamentos.

Los bosques de *Pinus cembroides* pertenecen al tipo de vegetación aciculifolia (Rzendowsky, 1978) y constituyen a las comunidades de transición entre la vegetación semiárida del Altiplano y los bosques mesófilos de montaña. Los bosques de *Pinus cembroides* son afectados principalmente por incendios forestales, depredación natural y recolección excesiva de piñones (Granados *et al.*, 2015) lo que ocasiona la expansión de las zonas áridas y conduce a la desertificación (Rzedowski, 2006).

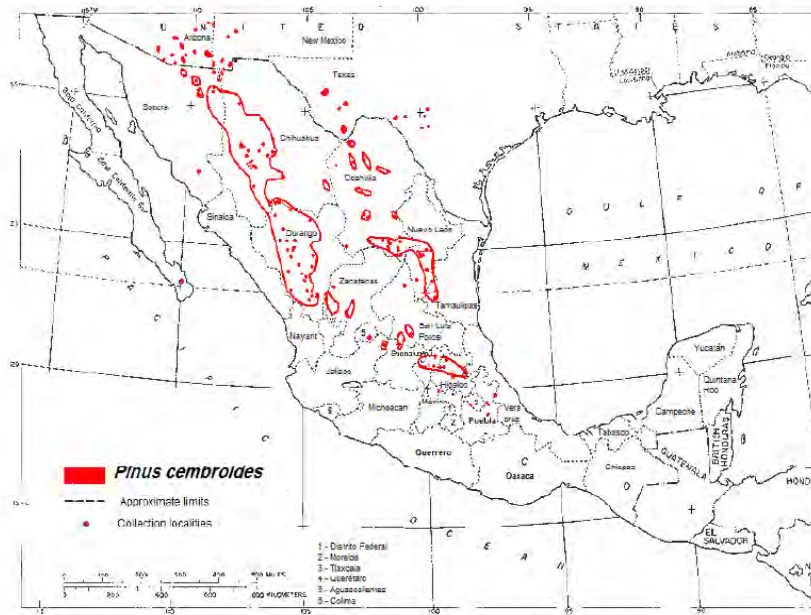


Figura 1. Mapa de distribución de *Pinus cembroides*. (Tomada de: De León Morales, 2010)

2.1.1. Incendios sobre bosque de *Pinus cembroides*

Pinus cembroides es una especie altamente adaptativa resistente a condiciones climáticas extremas y a suelos con fuerte pendiente, donde ocurre erosión; sin embargo, los principales problemas están relacionados con actividades humanas (De León Morales, 2010) que aceleran el proceso de degradación de los suelos y causan incendios forestales.

Los estudios sobre el efecto del fuego en los bosques de pino piñoneros son recientes. Pompa-Castillo (2015), estudió efectos sobre la vegetación, Marín-García (2016) evaluó efectos sobre el repoblamiento y Barragán-Maravilla (2016) evaluó los efectos de suelos post-incendio sobre la germinación de *Pinus cembroides*.

Para otras especies de piñoneros, Mueggler y Walter (1976), DeBano *et al.* (1978), Mataix-Solera (1999), Blanco-Canqui y Lal (2009) e Inbar *et al.* (2014) mencionan que el fuego actúa de manera positiva pues le permite subsistir frente a la competencia con otras especies que no resisten al fuego y las hacen susceptibles a plagas, es decir, es un componente regulador de los ecosistemas. Los efectos del fuego sobre el ecosistema se vuelven negativos cuando éste se presenta con frecuencia o en altas intensidades (Neary *et al.*, 1999; Neary *et al.*, 2005; Tavarez Espinosa, 2010).

El fuego modifica la vegetación, fauna, y suelo; además, produce cambios en los ciclos biogeoquímicos, procesos hidrológicos y geomorfológicos. Los efectos son muy variados ya que depende de múltiples factores como intensidad, biomasa, área, frecuencia, tipo de suelo, etc. (DeBano *et al.*, 1998).

El fuego ayuda a la sucesión secundaria en los bosques de juniperus-piñon (Trabaud, 1990; De León Morales, 2010); no obstante, la intensidad puede afectar esta sucesión, pues un incendio de baja intensidad sólo afecta plántulas y árboles jóvenes, mientras que un incendio de alta intensidad puede matar árboles maduros (Moir 1982; DeBano, 1991). Dentro de los primeros 5 años, las herbáceas y arbustos cubren el suelo y posteriormente se reduce la repoblación vegetal; además, esta es más rápida cuando existe una mayor cantidad de cenizas acumuladas, ya que el carbono retenido en estas es capaz de absorber más agua lo que facilita la germinación de las semillas (Landsberg y Waring, 1997).

2.2. Incendios forestales

En México, se registran en promedio 8 mil incendios forestales cada año, quemando en su mayoría estratos de vegetación herbácea y arbustiva. En el año 2016, los incendios forestales afectaron poco más de 270 mil hectáreas. Los estados con mayor número de incendios reportados fueron el Ciudad de México, Chiapas, Chihuahua, Estado de México, Hidalgo, Jalisco, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala, representando 75.96% del total nacional (CONAFOR, 2017).

El 99% de los incendios forestales ocurren por actividades humanas, principalmente por actividades agropecuarias, y el resto están relacionados con fenómenos naturales (descargas eléctricas o erupciones volcánicas) (CONAFOR, 2010). Es común asociar los incendios con destrucción y daño, con la pérdida y degradación del suelo y con la cubierta vegetal (Ressl y Cruz, 2012); sin embargo, son importantes para los ecosistemas en el control de malezas y plagas, liberación de nutrientes o germinación de algunas semillas (CONAFOR, 2010); por lo tanto, es un factor ecológico importante (Mataix-Solera, 2007).

De acuerdo con la CONAFOR (2010) los ecosistemas se pueden clasificar en ecosistemas sensibles, dependientes o independientes del fuego. Los estratos herbáceos suelen recuperarse totalmente en los primeros días de la temporada de lluvias; mientras que los arbustos tardan desde unas semanas hasta un par de años en hacerlo. Las zonas arboladas del país, aproximadamente de 10 a 30%, son afectadas por algún tipo de incendio y estos tardan entre 15 a 50 años en recuperarse dependiendo de diversos factores y de las especies

que hayan sido afectadas (CONAFOR, 2010). Sin embargo, es poca la información que existe sobre los incendios que afectan a los bosques de pino piñonero. Por lo anterior, es importante estudiar los efectos que el fuego tiene sobre estos ecosistemas.

2.2.1. Intensidad y clasificación de los incendios forestales

El comportamiento del fuego está determinado por diversos factores como la topografía (pendiente, altitud, exposición, etc.), condiciones climáticas y meteorológicas (temperatura, humedad, viento), y el tipo de combustibles (cantidad, tamaño, textura, etc.) por lo que su impacto no es el mismo en los diferentes ecosistemas CENAPRED (2008). De acuerdo con su propagación, CENAPRED (2008) clasifica a los incendios como:

- *Incendio de copa, de corona o aéreo.* Afecta gravemente a los ecosistemas, pues destruye a toda la vegetación y en grados diversos daña a la fauna silvestre.
- *Incendio superficial.* Daña principalmente pastizales y vegetación herbácea que se encuentra en la superficie terrestre y hasta 1.5 metros de altura. Deteriora en gran medida a la regeneración natural y la reforestación. En México es el más frecuente (poco más del 90% de los casos).
- *Incendio subterráneo.* Se propaga bajo la superficie del terreno; afecta las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca. Se caracteriza por no generar llamas y por poco humo.

2.2.2. Efecto de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo que se ven alteradas por el fuego son principalmente de carácter físico (color, textura, densidad aparente, porosidad, estabilidad de agregados y contenido de humedad) y químico (materia orgánica, pH, CIC, fósforo y cationes intercambiables como: Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺). Estos cambios dependen principalmente de la temperatura y tipo de vegetación que se encuentre en el sitio afectado (Carballas, 1993; Caon *et al.*, 2014).

Estas propiedades pueden catalogarse en efectos positivos y negativos del fuego:

- **Efectos positivos:**

Algunas propiedades son beneficiadas por los incendios forestales. Por ejemplo, Ángeles-Cervantes (2010) y Marín-García (2016), mencionan que si bien los incendios de tipo superficial pueden llegar a disminuir el porcentaje poroso en el suelo, los incendios de copa incrementan los valores de esta propiedad. Esto se debe a que el aire almacenado dentro de los poros se calienta y se expande con tal magnitud y fuerza, que crea una gran cantidad de microagregados. En consecuencia, el espacio poroso total dentro del suelo se incrementa beneficiando directamente a la infiltración y almacenamiento del agua.

De acuerdo con DeBano *et al.* (1978), los incendios son benéficos químicamente en Luvisoles cálcicos de California, ya que pueden llegar a acidificar. Por otro lado, Jalaudín (1969) observó que el pH puede aumentar hasta tres unidades como consecuencia de la adición de cenizas, además que se incrementa también la cantidad de MO, N, Ca⁺⁺ y K⁺ en el horizonte superficial (Kokaly *et al.*, 2007). De la misma manera, Mataix-Solera (1999) menciona que la acidez se reduce debido al aporte de cationes (K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y P⁺⁺⁺); además, de que los óxidos y carbonos presentes en las cenizas al entrar en contacto con el agua se hidrolizan y elevan el pH.

- **Efectos negativos:**

Al quemar la cubierta vegetal, el fuego libera sustancias del interior de las plantas, como aceites, esteroides, complejos orgánicos insolubles y otros compuestos hidrofóbicos. Dichos compuestos llegan a formar agregados con los minerales del suelo (principalmente con partículas del tamaño de las arcillas) hasta tomar el tamaño de arenas (en temperaturas de 176 a 288 °C), creando así capas repelentes al agua (Ben-Hur *et al.*, 2011; Inbar *et al.*, 2014), principalmente sobre la superficie del suelo (profundidades de 0 a 5 cm) (Blanco-Canqui y Lal, 2009). La capa hidrofóbica que se forma disminuye o vuelve nula la infiltración del agua, generando escorrentía superficial y por lo tanto erosión hídrica del suelo en sitios afectados por incendios (DeBano *et al.*, 1979; DeBano, 1991). Además, la pérdida de materia orgánica por incendio disminuye la capacidad de retención de agua hasta 40% en las capas superficiales (Carballas, 1993).

El fuego también tiene efectos sobre la distribución de partículas (Ketterings *et al.*, 2000; Afif y Oliveira, 2005), ya que ocasiona que el contenido de arcilla decrezca hasta 55% y aumente el contenido de arena (Giovannini *et al.*, 2001). Esto se debe a que en temperaturas

superiores a los 275°C se forman agentes cementantes que aglutinan partículas formando agregados no estables incrementando la fracción arenosa de manera temporal (Inbar *et al.*, 2014). Edem *et al.* (2012 a y b), mencionan que para que estos cambios de textura puedan lograrse de manera permanente, la temperatura debe ser mayor a 400°C. En este proceso se reduce la porosidad y aumenta la densidad aparente (Edem *et al.*, 2013), ya que los poros de las capas superficiales son ocupados por los depósitos de cenizas.

También los incendios forestales pueden generar un efecto tanto positivo como negativo sobre los nutrimentos del suelo, es por ello que se presentan de manera aparte.

- ***Efectos del fuego sobre los nutrimentos del suelo***

Algunos autores (Wan *et al.*, 2001; Arnan *et al.*, 2007; Martín *et al.*, 2012) mencionan que el contenido de nutrimentos en los suelos, después de un incendio forestal, se encuentra altamente relacionado con la topografía, el tipo de vegetación, la cantidad de hojarasca y el tipo de suelo. El horizonte O, es el horizonte más afectado, ya que es en donde se acumula la hojarasca y materiales orgánicos, como ácidos húmicos y fúlvicos. En consecuencia, ocurre la mayor disminución o incremento de nutrientes (Neary *et al.*, 1999), dependiendo la intensidad, duración e incidencia del fuego (Martín *et al.*, 2012).

El fuego libera y redistribuye periódicamente los nutrimentos en el ecosistema (Thomas *et al.*, 1999). De acuerdo con Rundel (1983) y Carballas (1993), los nutrientes son almacenados en las cenizas y posteriormente absorbidos por las plantas.

Los incendios forestales pueden ocasionar la pérdida de nutrimentos por medio de la volatilización o lixiviación, si no son absorbidos por las plantas o retenidos por el suelo (DeBano, 1979). Un ejemplo es el Nitrógeno, un nutriente limitante en muchos ecosistemas (Vitousek y Howarth, 1991), el cual es particularmente sensible a la volatilización por el fuego, ya que se pierde a temperaturas cercanas a 200 °C. Otros nutrientes como el fósforo, potasio, sodio, magnesio y calcio, importantes también para el desarrollo vegetal, poseen temperaturas de volatilización más altas (774, 760, 880, 1107, y 1240 °C, respectivamente). Se puede presentar pérdidas por volatilidad desde 50 hasta 70% de N y otros elementos (frecuentemente hasta 80%) durante incendios de gran intensidad (Maycotte, 2002).

Si bien es cierto que el fuego puede disminuir la cantidad total de nutrimentos presentes en el suelo, la probabilidad de que estos aumenten es mayor, debido a las cenizas, que aumentan el pH e incrementan en las tasas de mineralización (Wan *et al.*, 2001).

El fuego modifica en mayor o menor grado las propiedades del suelo, beneficiando o afectando la fertilidad natural del suelo, dependiendo siempre de su intensidad, duración y frecuencia con la que se presenten dichos incendios (Johnston y Elliott, 1998; Mataix-Solera, 1999; Mataix-Solera *et al.*, 2013).

2.3. Composición mineralógica del suelo y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo.

Los materiales inorgánicos (minerales) que forman las rocas y constituyen parte del material sólido del suelo, son estudiados por la mineralogía que a su vez también estudia la estructura, morfológica y química de los minerales (Kraus, 1965). Los elementos más comunes en la corteza terrestre son: Oxígeno (46.6%), Silicio (27.7%), Aluminio (8.1%), Hierro (5.0%), Calcio (3.6%), Sodio (3.8%), Potasio (2.6%), Magnesio (2.1%) y Otros (1.7%) (Navarro-García *et al.*, 2013). Los minerales primarios que están presentes en el suelo son: silicatos (ferromagnesiano y no ferromagnesianos) y no silicatos (Geofísica UNAM, 2014):

- Los **silicatos** se constituyen de silicio y oxígeno (SiO_4)⁴⁻ principalmente y forman compuestos con otros cationes (Fe^{4+} , Al^{4+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} ; presentes en el suelo). Los ferromagnesianos se arreglan en tetraedros aislados (olivinos), cadenas: sencillas (piroxenos), dobles (anfíboles) o en capas (biotita). Los no ferromagnesianos se arreglan en capas (moscovita), redes tridimensionales (feldespatos y cuarzo).
- Los **no silicatos** se dividen de acuerdo a los aniones que los componen: ion CO_3 , carbonatos (calcita; CaCO_3); SO_4 sulfatos (yeso; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); O y OH óxidos (óxido de hierro; Fe_2O_3) e hidróxidos (sosa cáustica; NaOH); PO_4 , fosfatos (apatita; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$), boratos, vanadatos y arsenatos; S sulfuros (pirita; FeS_2) y elementos nativos (Au, Ag, Cu).

2.3.1. Minerales como nutrimentos del suelo

La composición mineral de la roca madre es importante, ya que es un factor formador del suelo. Por ejemplo, Navarro-García *et al.* (2013) mencionan que a mayor contenido de Ca y

Mg y menor sea el de Si, la capacidad de saturación de bases y por tanto su fertilidad será mayor. Los minerales primarios componen la reserva de nutrientes en el suelo (Cuadro 1), si se altera la composición o estructura mineral, la fertilidad se verá afectada (Mejía 1980 a y b; Jaramillo, 2002).

Cuadro 1. Principales minerales primarios y su aporte de nutrientes al suelo. (Adaptado de Mejía, 1980a, b).

Mineral Primario	Formula Química	Importancia	Aporte al suelo
Feldespatos	(Na, K)AlO ₂ [SiO ₂] ₃	Abundante en suelos lixiviados	K, Na, Ca, Ar*
Anfíboles	(Ca, Na, K) _{2,3} (Mg, Fe, Al) ₅ (OH) ₂	Fácilmente degradado a arcillas	Ca, Na, Mg, Fe
Piroxenos	(Ca, Mg, Fe, Ti, Al)(Si, Al)O ₃	Fácilmente degradado	Ca, Mg, Fe
Micas	K ₂ Al ₂ O ₅ [Si ₂ O ₅] ₃ Al ₄ (OH) ₄ K ₂ Al ₂ O ₅ [SiO ₅] ₃ (Mg, Fe) ₆ (OH) ₄	Fuente de K zonas templadas	K, Mg, Na, Fe, Ar
Óxidos de hierro	Fe ₂ O ₃	Abundante en suelos	Fe, Ar
Olivino	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	Fácilmente degradado	Fe, Mg
Carbonatos	CaCO ₃ , CaSO ₄ +2H ₂ O	Estructura de suelo y nutrición	Ca, Mg
Sulfuros	FeS ₂ , SCu ₂ , S ₂ FeCu, SCu	Abundante en suelos lixiviados	S, Ca, Cu
Fosfatos	HPO ₄ ⁻ 2H ₂ PO ₄ ⁻	Retención de P	P, Ca
Cuarzo	SiO ₂	Abundante en arena y limo	-----
Rutilo	TiO ₂	Muy resistente a la degradación	-----
Epidota	Ca ₂ (Al, Fe) ₃ (OH)Si ₃ O ₁₂	Muy resistente a la degradación	-----
Turmalina	(Na, Ca)(Al, Fe, Li)(Al, Mg MN) ₆ (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₆)(OH,F) ₄	Muy resistente a la degradación	-----
Zircón	ZrSiO ₄	Muy resistente a la degradación	-----

* El símbolo Ar se utiliza para indicar que los minerales producen también, normalmente, minerales de arcilla.

El suelo necesita 16 elementos para la nutrición de las plantas y 13 de estos son aportados por los minerales primarios. Los elementos se clasifican en macronutrientes (C, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn, Cl) (FAO, 2015).

El calcio y magnesio pueden aumentar hasta 200% y 300%, respectivamente, después de un incendio según Viro (1974), ya que la materia orgánica del suelo se incrementa y con esta los nutrientes.

2.3.2. Importancia de los minerales presentes en el suelo derivados de calizas

Las rocas evaporíticas contienen entre 30 y 40% del Ca presente en la corteza terrestre, y se encuentran como CaCO₃ y CaSO₄. La mayoría del Ca nativo presente en el suelo se asocia con feldespatos (anortita, plagioclasa), piroxenos, anfíboles, micas (biotita) y minerales

arcillosos. Se sabe que los suelos jóvenes que son derivados de calizas contienen minerales de origen cálcico como carbonatos de calcio CaCO_3 (calcita) o magnesio $\text{CaCO}_3 \text{ MgCO}_3$ (dolomita). Si los suelos se encuentran en zonas áridas o semiáridas se acumulan con frecuencia como sulfatos de calcio (Anhidrita: CaSO_4 y yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Fassbender, 1975).

Los minerales del suelo son importantes, pues conforman la parte de la fase sólida del suelo y su importancia está en dar la estructura a este; es decir, le da estabilidad y compactación, lo que influye en la permeabilidad y aireación para el desarrollo de raíces. Cuando las partículas minerales del suelo se encuentran en un arreglo adecuado junto con la fase líquida y gaseosa, este tendrá una buena estructura que permitirá una mayor resistencia a la erosión (Bronick y Lal, 2005).

El estudio de las propiedades mineralógicas del suelo es de gran utilidad para determinar y establecer secuencias de evolución y tendencia de los materiales originales; además de predecir el estado físico y químico de los suelos y su relación con el ambiente (Dixon, 1989). Sin embargo, se desconoce el efecto que pueden tener los incendios forestales sobre la mineralogía de los sustratos y suelos de origen calizos.

2.3.3. Efecto de los incendios sobre la mineralogía del suelo

Los cambios en los minerales, causados por incendios, principalmente afectan la forma cristalina y la abundancia con la que se presentan, lo que puede ocasionar efectos sobre la composición del suelo. Los minerales pueden cambiar su estructura cristalina si son sometido a ciertas temperaturas, desde la temperatura ambiente, que forma rocas sedimentarias, hasta altas temperaturas como el magma que forma rocas ígneas (determinadas por la serie de Bowen) (Klein y Hurlbut, 1996). La presencia de ciertos minerales, además de las temperaturas y la presión condicionan la formación de las rocas (Dixon, 1989).

No todos los minerales primarios pueden afectarse fácilmente, depende de las condiciones ambientales y de formación de estos. Los más sensibles pueden desaparecer o transformarse en minerales secundarios; mientras que los más resistentes pueden pasar a formar parte del suelo en forma de arenas y limos. Según la facilidad de alteración de los minerales primarios, se han establecido series las cuales ordenan a los minerales de menor a mayor grado de resistencia considerando los de mayor importancia (Corey citado por Malagón *et al.*, 1995):

Olivino < Augita < Hornablenda < Biotita < Oligoclasa < Albita < Ortoclasa < Magnetita < Cuarzo

Fernández *et al.* (1988) y (1991), reportaron una disminución en el contenido de biotita frente a cuarzo y feldspatos en suelos quemados. Además, mencionan que los minerales 1:1 sufren mayor degradación en incendios de alta intensidad. González *et al.* (1992) indican que los minerales de la fracción arcillosa se transforman dependiendo de la intensidad del fuego. El estudio que realizaron sobre cambisoles demostró que las vermiculitas se degradan principalmente a caolinitas en horizontes superficiales a temperaturas de 200, 300 y 400 °C. Por su parte, Fernández *et al.* (2010) mencionan que a temperaturas de 170°C se presentan modificaciones en el tamaño de partícula debido a la calcinación de silicatos de Fe y Al. DeBano (1998) encontró que a temperaturas mayores a 460°C la estructura de los carbonatos está afectada; mientras que Inbar *et al.* (2014) encontraron que los minerales sufren deshidratación a temperaturas mayores de 300°C, y los minerales de arcilla se transforman en óxidos de hierro y aluminio.

2.3.4. El uso de la mineralogía en el estudio de los incendios forestales

Los minerales presentan cambios en sus propiedades (oxidación, hidratación) por acción de la temperatura (Amonette, 2000). De acuerdo con Ángeles-Cervantes (2010), después de un incendio, se presentan cambios en los minerales del suelo, por lo que la intensidad y temperatura del fuego alcanzada en la superficie del suelo puede ser medida por el método de difracción de Rx. Los cambios ocasionados en la estructura cristalina, puede determinarse con radiación monocromática y desorientación de los distintos cristales presentes, donde se obtiene un espectro que refleja las distintas fases cristalinas y su orientación (Bish y Post, 1989).

La intensidad del fuego se refiere a la velocidad con que este genera energía térmica y se mide en términos de temperatura variando desde 50°C hasta 1500°C (Neary *et al.*, 1999). Los minerales poseen distintas temperaturas de formación y transformación, se puede conocer por la presencia o ausencia de ciertos minerales la temperatura alcanzada en los incendios.

Carballas (1993) y Neary *et al.* (1999) clasificaron con el apoyo de varios estudios, la intensidad de los incendios (baja, moderada y alta) y la temperatura alcanzada, tanto a nivel de superficie como en profundidades de hasta 5 cm (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de la intensidad de incendios forestales

(Carballas (1993) y Neary et al. (1999)).

Intensidad	Profundidad	Temperatura
Baja	sobre la superficie	250 °C
	primeros 2.5 cm	100 °C
	siguientes 5 cm	menos de 50 °C
Moderada	sobre la superficie	400 °C
	primeros 2.5 cm	175 °C
	siguientes 5 cm	50 °C
Alta	sobre la superficie	entre 650 y 700 °C
	primeros 2.5 cm	190 °C
	siguientes 5 cm	75 °C

Según el Cuadro 2, los rangos en los que los minerales pueden presentar cambios van desde 100 hasta 700°C, a profundidades de 0 a 5 cm. Sin embargo, Hielo *et al.* (2004) y Certini (2005) mencionan que se pueden alcanzar incluso temperatura de hasta 900°C sobre la superficie (primeros 5 cm) dependiendo del tipo de vegetación. Sin embargo, no existe mucho conocimiento de qué efectos tienen los incendios sobre los minerales derivados de rocas sedimentarias, como los que ocupan los bosques de zonas semiáridas.

Algunos estudios señalan la presencia de calcita en cenizas (Ulery *et al.*, 1996), posiblemente provenientes de plantas quemadas, las cuales pueden liberar oxalato de calcio (Iglesias *et al.*, 1998). Este mineral al estar expuesto a temperaturas aproximadas a 479°C puede formar carbonato de calcio (Wattez y Courty, 1987; Quintana *et al.*, 2007). Asimismo, los carbonatos de calcio, a temperaturas que oscilan entre 684°C se pueden transformar en óxidos de calcio. Quintana *et al.* (2007), también encontraron que la whewellita, un oxalato hidratado de calcio, con frecuencia localizados en los horizontes O, logra transformarse en calcita a 400°C.

El uso de la mineralogía, para el estudio del efecto de los incendios forestales sobre el recurso edáfico, representa un reto importante en la ciencia del suelo, ya que no se cuenta con registros de análisis mineralógicos en incendios forestales dentro de los bosques de pino piñonero.

3. JUSTIFICACIÓN

Los incendios en su mayoría son ocasionados por actividades humanas con la finalidad de reconvertir zonas boscosas en áreas de cultivo o pastoreo, o simplemente para incrementar el rebrote de plantas de interés o la fertilidad; no obstante, el mal manejo del fuego puede llegar a causar graves daños cuando se sale de control. Los bosques de pino piñonero del municipio de Cardonal, Hidalgo, fueron afectados por incendios en el año de 2011. Esto trajo consigo efectos negativos sobre la economía de los habitantes de la zona, ya que una de las principales actividades a las que se dedicaban era la comercialización de las semillas. Determinar las temperaturas que alcanzó el incendio, la intensidad y su efecto sobre las propiedades químicas y físicas sobre la superficie de estos suelos, pueden ayudar para establecer mejores prácticas de rehabilitación.

Además se puede obtener, intensidad y temperaturas alcanzadas a través de los minerales, debido a que algunos de ellos cambian su estructura por efectos de la temperatura. Las preguntas que se plantean en esta investigación son:

- ¿Qué propiedades mineralógicas, físicas y químicas presentan los suelos de estos bosques?
- ¿Los incendios provocan cambios en la mineralogía del suelo bajo *Pinus cembroides*?
- ¿La mineralogía puede ser un indicador de las temperaturas que alcanzaron los incendios forestales en el bosque de pino piñonero?

Las posibles respuestas a estas interrogantes ayudarán a establecer si el análisis mineralógico puede ser un nuevo parámetro de medición para determinar la intensidad de los incendios y su relación con los minerales neoformados.

4. HIPÓTESIS

El cambio en las propiedades mineralógicas, químicas y físicas del suelo dependen de la intensidad del fuego y la profundidad que haya sido afectada, siendo más notoria la parte superficial (0-5 cm). El incendio provoca deshidratación de minerales e incremento de nutrimentos por adición de cenizas.

5. OBJETIVOS

Generales

- Determinar el efecto de los incendios sobre la composición mineralógica del suelo de los bosques de pino piñonero dentro del municipio de Cardonal, Hidalgo.

Particulares

- Determinar la mineralogía del suelo de suelos afectados por diferentes tipos de incendio.
- Someter suelos no afectados a diferentes temperaturas.
- Determinar la temperatura alcanzada en los incendios forestales a través de la relación de la mineralogía obtenida en laboratorio.
- Determinar los cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos afectados por diferentes tipos de incendios.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el centro de la República Mexicana, entre los estados de: México, Puebla, Veracruz, Tlaxcala y San Luis Potosí, dentro de la región denominada "Cerro de la Soledad". Específicamente se ubica aproximadamente a 5 km al norte de Cardonal, en el poblado de Santuario Mapethé, Estado de Hidalgo. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 20° 25' 00" y 20° 47' 00" de latitud norte y los meridianos 98° 55' 00" y 99° 11' 00" de longitud oeste, a una altitud entre 900 y 2 900 msnm. Colinda al norte con los municipios de Nicolás Flores y Tlahuiltontepec; al este con los municipios de Tlahuiltontepec, Eloxochitlán, Metztlán y Santiago de Anaya; al sur con los municipios de Santiago de Anaya e Ixmiquilpan y al oeste con los municipios de Ixmiquilpan y Nicolás Flores (INEGI, 2012).

Clima

El clima dominante es semiseco (Figura 2), BS1Kw" (w) (i'), el cual es el menos seco de los secos. Con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, en el mes frío entre -3 y 18 °C y en el mes más caliente mayor de 18° C. Con un porcentaje de lluvia invernal menor a 5% de la

anual; presenta canícula y poca oscilación térmica entre 5 y 7°C (INEGI, 2012). De acuerdo con la estación meteorológica 13105, Cardonal Hidalgo.

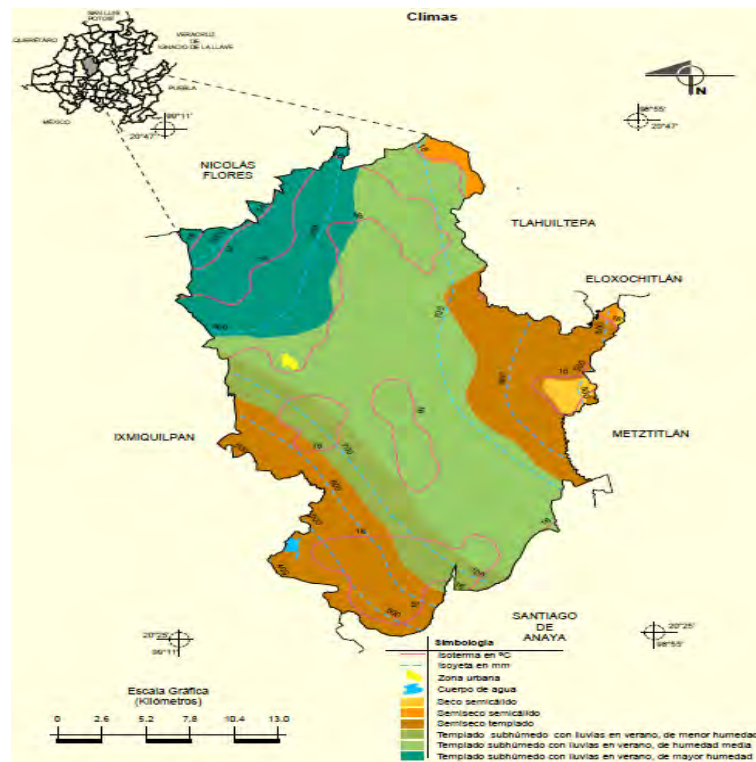


Figura 2. Mapa temático correspondiente al tipo de clima predominante en el área de estudio (INEGI, 2005).

Geología

Las rocas presentes en el área de estudio pertenecen al periodo Cretácico (57%), Neógeno (30%), Cuaternario (11%) y Terciario (1%). El tipo de rocas (Figura 3) pertenece a rocas ígneas extrusivas (toba ácida, 1.5%; volcanoclástico, 1.5% y granodiorita, 1%); sedimentarias (caliza, 33.7%; caliza-lutita, 23%; limolita-arenisca, 20%; arenisca-conglomerado, 4%; conglomerado, 2%; caliza-arenisca, 1% y arenisca, 1%) y suelo (aluvial, 11%) (INEGI, 2012).

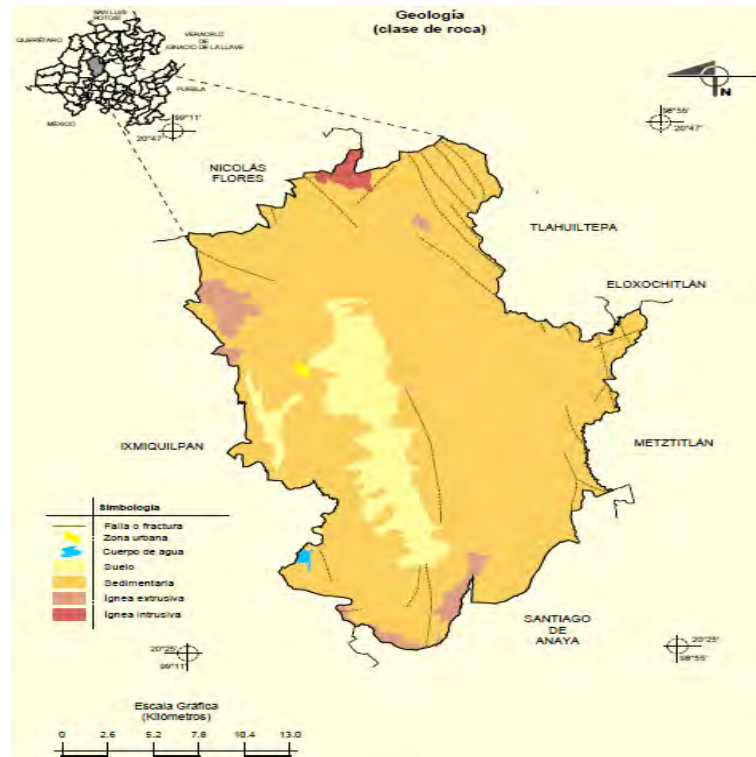


Figura 3. Mapa temático correspondiente a la geología predominante en el área de estudio (INEGI, 2005).

Edafología

Los suelos que dominan esta región son Leptosoles (67%), los cuales son muy delgados, pedregosos y poco desarrollados y pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Son los suelos de mayor distribución a nivel mundial (1 655 millones de hectáreas; IUSS Working Group WRB, 2015) y están asociados con sitios de compleja orografía, lo que explica su amplia distribución en México. Estos suelos se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos) y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales con alto grado de erosión (IUSS Working Group WRB, 2015). Además en la región se encuentran también Phaeozems (12.5%), Kastañozems (8.5%), Vertisoles (5.0%), Calcisoles (4.0%) y Cambisoles (2.0%), los cuales se muestran en la Figura 4 (INEGI, 2012).

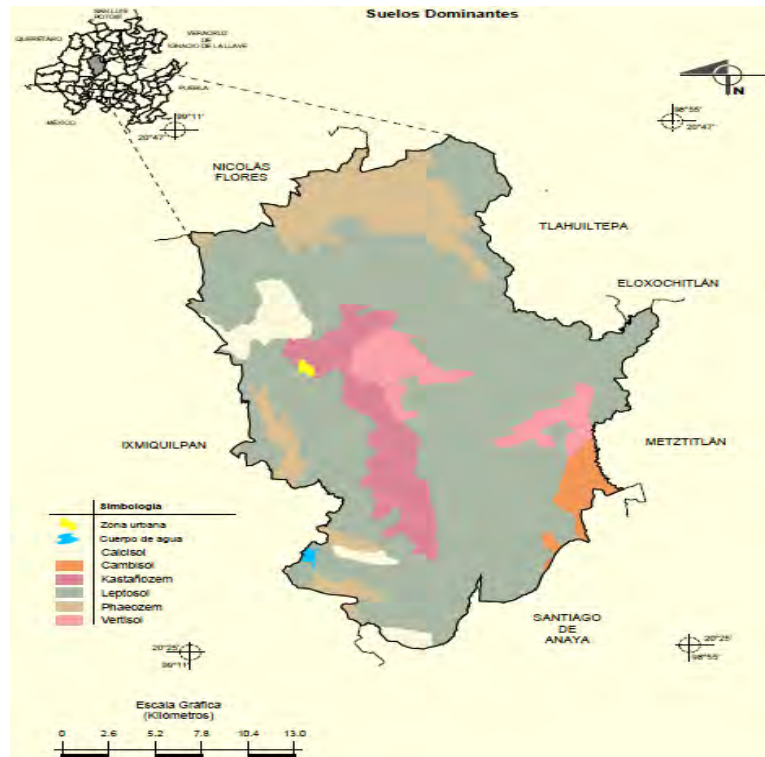


Figura 4. Mapa temático correspondiente al tipo de suelo predominante en el área de estudio. Cardonal Hidalgo, suelos (INEGI 2005).

Vegetación

De acuerdo con Ángeles-Cervantes (1984) y Pompa-Castillo (2015), el tipo de vegetación corresponde a un bosque de pino, constituido principalmente por *Pinus cembroides* y *Juniperus fláccida*, dominante y subdominante en el estrato arbóreo, en el estrato arbustivo predomina *Flourenzia resinosa* pero desaparece a 2300 msnm y en su lugar se presentan especies como *Sargentia gregii* y *Quercus microphylla*.

Uso del suelo y vegetación

Dentro de la zona de estudio, la agricultura (33.0%) representa el mayor uso que se le da a estos suelos, seguido por la presencia de bosque, pastizales y matorrales (28, 20 y 18%, respectivamente) donde se obtiene leña, frutos, semillas o forraje. La zona urbana (0.12%) representa una pequeña proporción con respecto al área total del municipio (INEGI, 2012) (Figura 5).

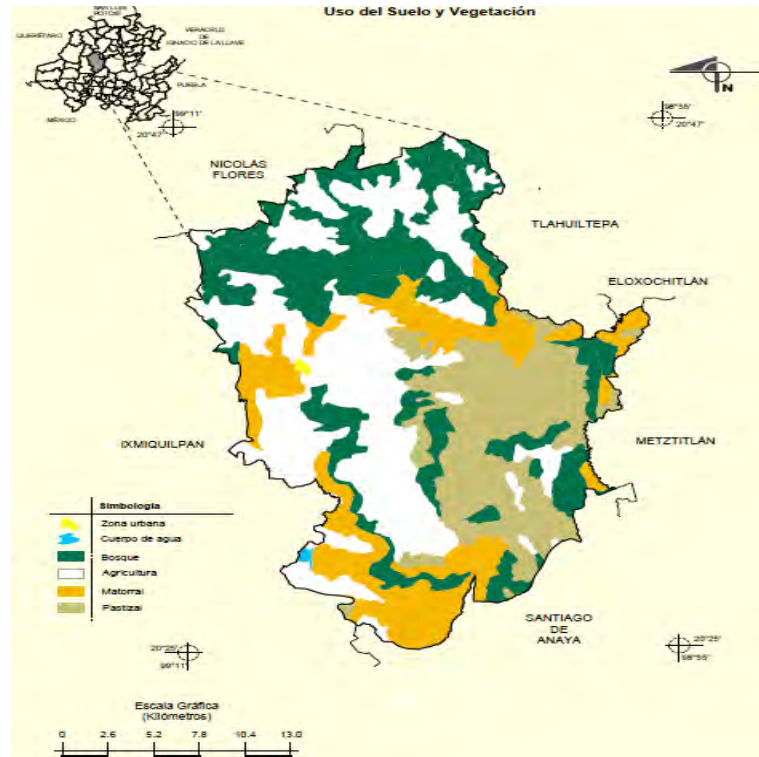


Figura 5. Mapa temático correspondiente al tipo de vegetación y uso de suelo predominante en el área de estudio (INEGI 2005).

Fauna

De acuerdo con Cárdenas-Cruz (2015), dentro de la zona se han realizado avistamientos de armadillo (*Dasyus sp.*), coyote (*Canis latrans*), zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), conejos (*Oryctolagus sp.*), tlacuache (*Didelphis marsupialis*), víbora de cascabel (*Crotalus sp.*), águila (*Buteo sp.*) y una variedad de aves y reptiles.

6.2. Selección de sitios de muestreo

Un recorrido de reconocimiento en el área de estudio se realizó y se seleccionaron un total de ocho zonas: afectadas por incendio (cuatro sitios), por sequía (uno sitio) y no afectadas (tres sitios), como sitios testigo (Figura 6 y 7). El indicador para esta selección fue que presentaran diferentes grados de severidad causada por incendio, de manera observable a nivel de campo. En cada zona se le asignó la siguiente nomenclatura según Shivdenko y Nilsson (2000) y CONAFOR (2010) (Cuadro 3):

Cuadro 3. Nomenclatura para la asignación del sitio, según Shivdenko y Nilsson (2000) y CONAFOR (2010):

Sitio	Descripción
Bosque no afectado por incendio (BNA)	El estrato arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del suelo no presentan vestigios de incendio.
Bosque no afectado con acumulación de Fe (BNA(Fe))	El estrato arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del suelo no presentan vestigios de incendio. Con acumulación de Fe.
Bosque no afectado de <i>Pinus Pinceana</i> (BNA(PP))	El estrato arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del suelo no presentan vestigios de incendio. Vegetación de <i>Pinus pinceana</i> .
Bosque con incendio superficial (BISUP)	El arbolado presenta vestigios de incendios de hasta 1 m de altura. Los estratos arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca están afectados por el incendio.
Bosque con incendio de copa moderado (BICM)	El arbolado presenta vestigios de incendios en la copa, y los estratos arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del sitio están fuertemente afectados por el incendio. La capa de cenizas generalmente es de color blanco.
Bosque con incendio de copa severo (BICS)	El arbolado presenta incendio en toda la copa, los estratos arbustivo, herbáceo y hojarasca están fuertemente afectados. La capa superficial generalmente es de color blanco.
Bosque con incendio de copa severo hace 50 años (BICS50)	El arbolado presenta incendio en toda la copa, los estratos arbustivo, herbáceo y hojarasca están fuertemente afectados. La capa superficial generalmente es de color blanco. Ya no presenta vegetación nativa.
Bosque afectado por sequía(BISEQ)	El estrato arbustivo, herbáceo y la capa de hojarasca del suelo no presentan vestigios de incendio. Sin embargo presentan afectación por sequía.

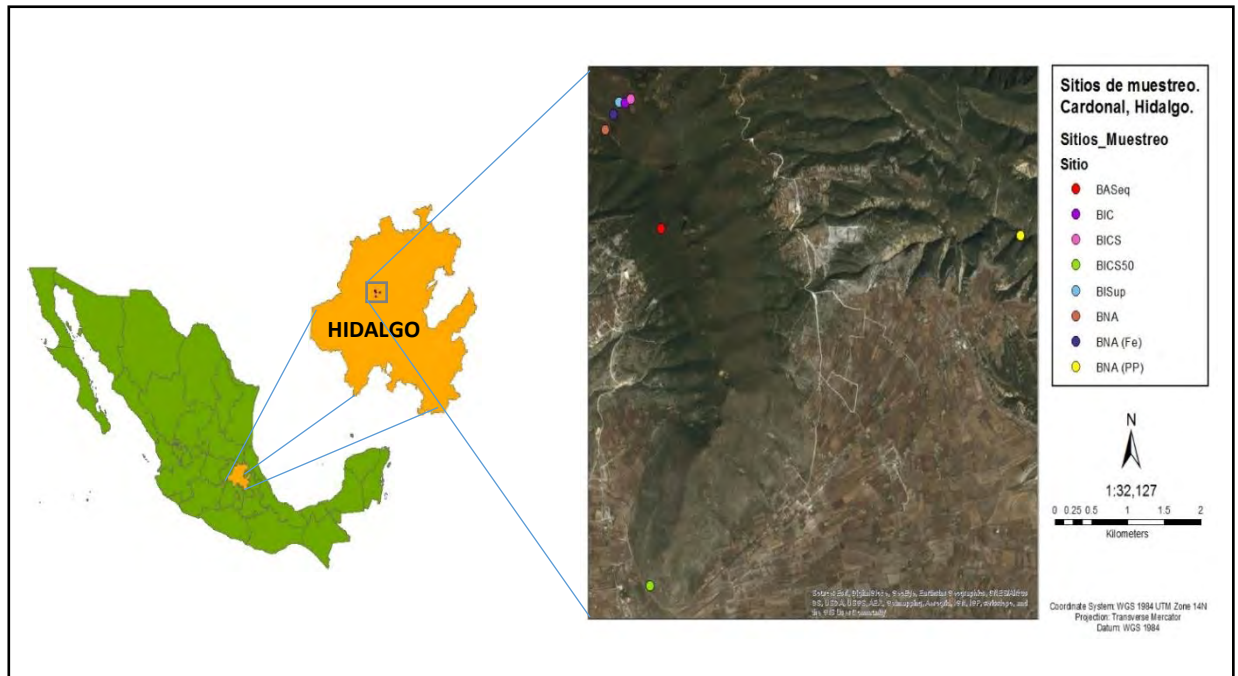


Figura 6. Localización de los sitios de muestreo.

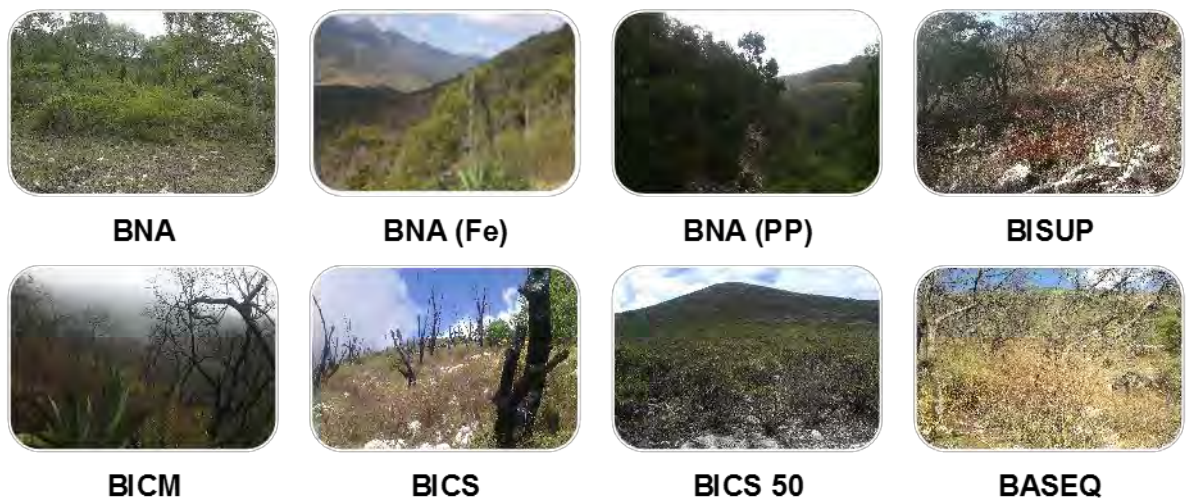


Figura 7. Sitios de muestreo.

6.3. Toma de muestras y determinación de la composición mineralógica, física y química del suelo

Dentro de cada uno de los sitios de muestreo se tomó una muestra representativa de suelo, de 0-5 cm de profundidad, incluyendo la capa de ceniza (en caso de presentarse), debido a que es la capa más afectada y de 5-10 cm, para complementar el análisis (Quintanilla *et al.*, 2007) (Figura 8). Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas con una malla con apertura de 2 mm. Todos los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Génesis y Clasificación de suelos del Colegio de Posgraduados Campus Montecillo utilizando los procedimientos reportados en el Manual de Van Reeuwijk (2003). Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados y analizados de acuerdo con los establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para los análisis físicos y químicos y a través del software ICDD (2002) para los mineralógicos.



Figura 8. Toma de muestra de suelo en el área de estudio.

De acuerdo con DeBano (2000), la capa superficial (0-5 cm) es la que presenta mayor número de cambios representativos en las diferentes propiedades edáficas. Es por eso que para el análisis mineralógico se llevó a cabo sólo para este espesor. En cuanto a los análisis físicos y químicos se realizaron muestras compuesta de las dos capas colectadas, con excepción para textura en donde se realizaron análisis tanto para 0-5 y 5-10 cm, con la finalidad de comprobar lo citado en la literatura.

A continuación se muestran con detalle los análisis realizados.

6.3.1. Análisis mineralógico

Con el fin de determinar la temperatura que alcanzó el incendio, una muestra de suelo del bosque no afectado fue sometida a diferentes grados de severidad. Las muestras se colocaron dentro de una mufla a temperaturas de 250, 450 y 600°C, durante 10 minutos. A estas temperaturas según Giovannini y Lucchesi (1997), Hielo *et al.* (2004) y Certini (2005), reportaron cambios en las propiedades químicas de suelos. De la misma manera, Ángeles-Cervantes (2010) reportó cambios en la mineralogía del suelo y las relacionó con los diferentes tipos de incendios.

Una vez realizada la prueba anterior, las muestras se incorporaron junto con las de los demás sitios (BISUP, BICM y BICS) para ser analizadas con el equipo de difracción de rayos X como se menciona a continuación. El sitio con sequía (BASEQ) no fue analizado debido a que el estrés hídrico no afecta la mineralogía del suelo y el sitio de 50 años (BICS50) ya tenía una muestra representativa (sitio BICS).

Las muestras se sometieron a un proceso de oxidación de materia orgánica con peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 30% y, posteriormente fue macerada en un mortero de porcelana para obtener partículas de tamaño aproximado a 50 μm (Figura 9). Las muestras fueron analizadas en polvo utilizando un Difractómetro de Rayos X. Las medidas se realizaron por la técnica de barrido a una velocidad de 4°min^{-1} , desde 2° a 60° , en un equipo GBC 122D Automático Interface®. La identificación de minerales se llevó a cabo a través del software ICDD (2002).



Figura 9. Preparación de muestras para determinación mineralógica.

6.3.2. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo

A continuación se describen los métodos y procedimientos para los diferentes análisis físicos y químicos realizados:

pH. Fue medido en un suspensión 1:2 suelo: líquido (agua destilada), respectivamente, con la ayuda de un potenciómetro (Peech, 1965) y se interpretó de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 4.

Cuadro 4. 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

Materia orgánica. Se realizó de acuerdo con procedimiento de Walkley-Black (1947), donde se involucra la combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico en una temperatura alrededor de 125 °C. El dicromato sobrante se titula con sulfato ferroso. Los resultados se interpretaron según la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 5.

Cuadro 5. Porcentaje de Materia Orgánica.

Clase	Materia orgánica (%) Suelos volcánicos	Materia orgánica (%) 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

Nitrógeno. Se empleó el procedimiento micro-Kjeldahl. La muestra se digirió en ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno con selenio como catalizador; así el nitrógeno orgánico es convertido en sulfato de amonio. La solución es alcalinizada y destila el amonio. El amonio producido es atrapado en ácido bórico y titulado con ácido estandarizado (Bremner y Mulvaney, 1982). Interpretado de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 6.

Cuadro 6. Porcentaje de Nitrógeno inorgánico

Clase	Nitrógeno %
Bajo	menor a 0.30
Medio	0.30-0.80
Alto	mayor a 0.80

Fósforo. La muestra fue extraída con una solución de bicarbonato de sodio a pH 8.5. Los fosfatos en el extracto se determinaron colorimétricamente con el método azul de molibdato de amonio y ácido ascórbico como agente reductor. El pH elevado de la solución extractora hace que el método sea apropiado para suelos calcáreos, alcalinos o neutros que contienen fosfatos de Ca debido a que la concentración de Ca en la solución es contrarrestada por la precipitación de CaCO_3 . Como resultado la concentración de fosfatos en la solución se puede incrementar (Houba *et al.*, 1988; Olsen y Sommers, 1982; Soil Laboratory Staff, Royal Tropical Institute, 1984). Interpretado de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 7.

Cuadro 7. Fósforo disponible, por Olsen

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

Capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables. Se utilizó el método de acetato de amonio. La muestra percolada con acetato de amonio y las bases se miden en el percolado. Posteriormente, la muestra se percola con acetato de sodio para remover el exceso

de sales y con acetato de amonio para el sodio intercambiable absorbido. El sodio en este percolado es una medida de la CIC (Soil Laboratory Staff, Royal Tropical Institute, 1984; Houba *et al.*, 1988; Holmgren *et al.*, 1977; USDA, SCS, 1972, 1982). Interpretado de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 8.

Cuadro 8. Capacidad de Intercambio Catiónico.

Clase	CIC (cmol/Kr)
muy baja	mayor a 40
Alta	25 a 40
Media	15 a 25
Baja	5 a 15
Muy baja	menor a 5

El Ca y Mg intercambiable fueron medidos por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) y el K y Na fueron medidos por Espectrofotometría de Emisión de Flama (EEF) en los extractos diluidos (Landon, 1984, 1991; Richards, 1954, 1969). Los datos fueron interpretados de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 como se muestra el Cuadro 9.

Cuadro 9. Cationes Intercambiables.

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

Determinación de iones Fe y Al. Los compuestos de hierro y aluminio libres en el suelo, los que no forman parte de las estructuras minerales silicatadas, fueron extraídos mediante una solución de ditionito-citrato con el método de Mehra y Jackson (1960). La muestra fue calentada en una solución buffer compleja de bicarbonato/citrato de sodio, a la cual se agrega ditionito de sodio sólido como un agente reductor. El hierro y aluminio se midieron en el extracto por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

Textura. Se realizó el análisis del tamaño de partículas del suelo utilizando el procedimiento de la pipeta Americana. El método consiste en tomar una serie de submuestra (alícuotas) de una suspensión de suelo en agua donde se está llevando a cabo un proceso de sedimentación. Las submuestras son tomadas a una profundidad y tiempo específico, obteniendo primeramente los limos gruesos, después limos finos y finalmente las arcillas. El método se basa en la Ley de Stokes. Las arenas se obtuvieron a través del uso de diferentes tamices (van Reeuwijk, 1995). La clasificación de textura se llevó acabo con el triángulo de textura (Figura 10).

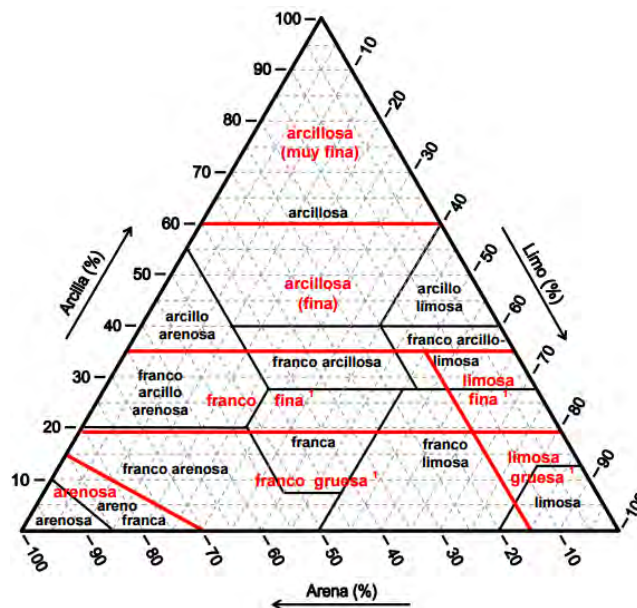


Figura 10. Triángulos combinados de textura: Clases de textura para la tierra fina (—) y Clases de familia textural de suelos (—).

6.3.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico, para obtener las diferencias entre las propiedades físicas y químicas de cada tipo de incendio, consistió en la realización de un análisis de varianza (ANDEVA), para poder comparar las diferencias entre las propiedades. Las comparaciones de medias entre tratamientos se llevaron a cabo considerando un nivel de significancia de $p < 0,05$.

7 RESULTADOS

7.1. Propiedades mineralógicas del suelo

Los resultados obtenidos para el análisis mineralógico son presentados de la siguiente manera:

a) Mineralogía del suelo del Bosque de *Pinus Cembroides*

De acuerdo con los difractogramas la mineralogía de un bosque no afectado por incendios (BNA) está constituida principalmente por albita (Ab), calcita magnésica (Mgs), dolomita (D) y óxido de calcio (CaO) en menor reflexión se encontró goethita (G), magnetita (MG) y arcillas 2:1. En la Figura 11 se reportan las reflexiones con mayor intensidad:

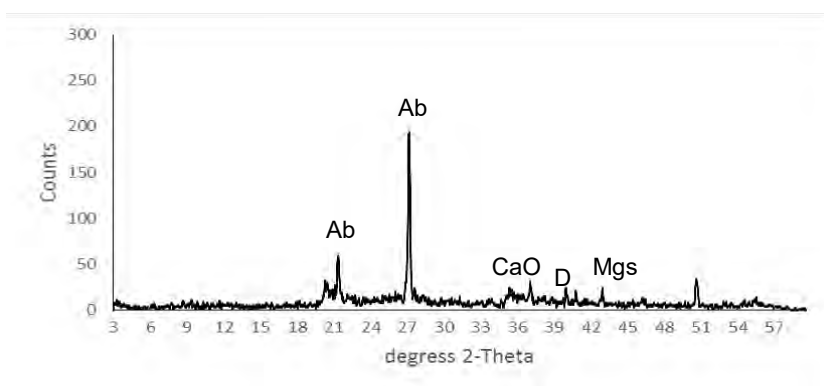


Figura 11. Diffractograma de rayos X Bosque no afectado, BNA. * Albita (Ab), dolomita (D), óxido de calcio (CaO), calcita magnésica (Mgs).

b) Efectos de los incendios sobre la mineralogía del suelo en bosques de *Pinus cembroides*

El efecto del fuego generado sobre los minerales presentes en la mayoría de los sitios, fue principalmente sobre la abundancia y solo para un sitio (BICM) sobre la composición. En el incendio superficial (BISUP) no se modifica la mineralogía del suelo, pero si la abundancia (Figura 12 a). En el incendio de copa moderada, solo quedaron albita y calcita magnésica y finalmente, el incendio de copa severa no modifica la mineralogía (Figura 12 b, c).

La fracción arcillosa presente en los suelos naturales se mantuvo en los diferentes tipos de incendios, solo las arcillas 2:1 se colapsaron a 10 nm.

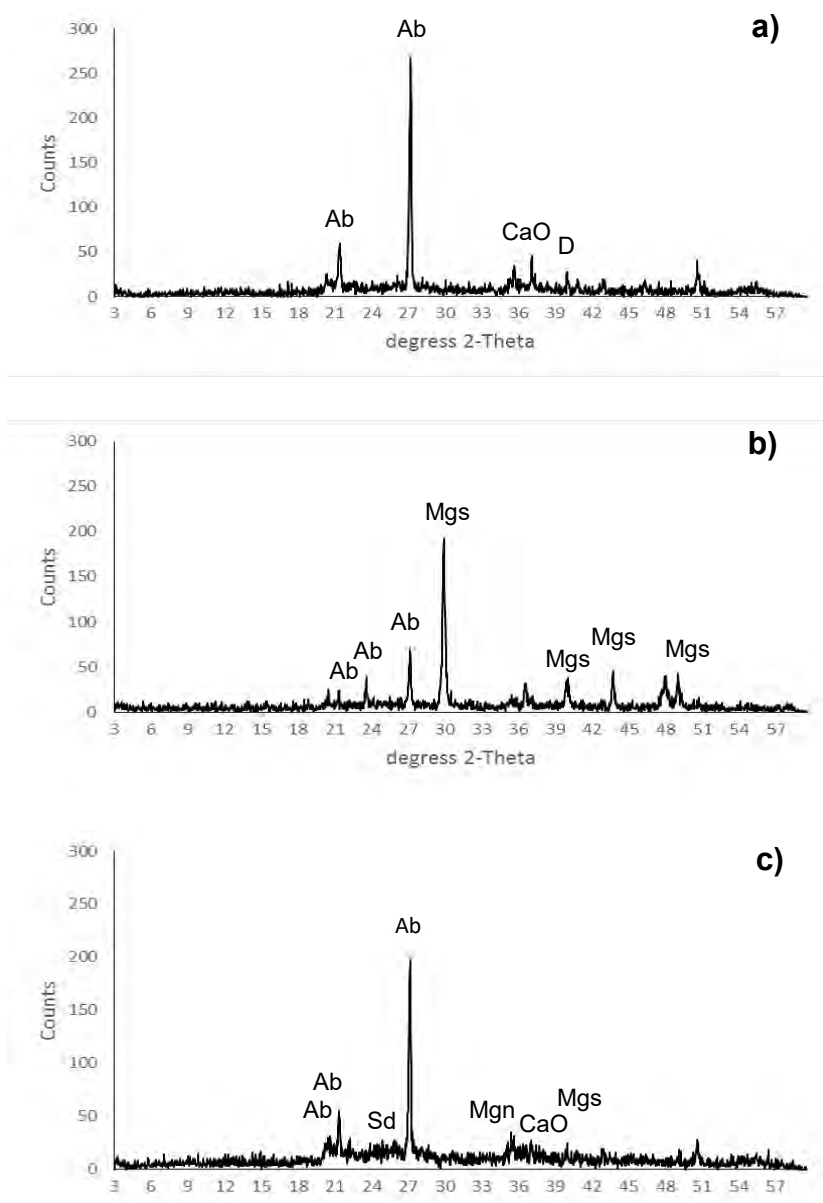


Figura 12. Difractogramas de rayos X de los diferentes sitios de la zona de estudio de suelo afectado: Bosque afectado por incendio superficial **BISUP** (a); Bosque afectado por incendio de copa **BICM** (b) y Bosque afectado por incendio de copa severo, **BICS** (c). *Albíta (Ab), óxido de calcio (CaO), dolomita (D), calcita magnésica (Mgs), magnemita (Mgn)).

c) Estimación de temperaturas alcanzadas sobre las propiedades mineralógicas en el suelo por los diferentes incendios

En la Figura 13 a, se presenta el difractograma de Rx correspondiente a la muestra sometida a 250°C el éste es similar al difractograma correspondiente a BISUP, ya que presentan cantidades semejantes de albita. Por otro lado, en BICM presentan cantidades de minerales similares a la muestra sometida a 600°C; sin embargo, no se presentan los mismos minerales, ya que se modifican los albitas como mineral dominante a calcitas magnésicas (Mgs). Finalmente, en BICS se observó un patrón similar en cantidades y tipos de minerales a los de la muestra sometida a 600 ° C.

La fracción arcillosa se conserva a temperaturas menores a 600°C por lo que el incendio de copa moderado (BICM) debió de haber alcanzado temperaturas superiores pues toda la fracción arcillosa se destruyó.

En conclusión, la clasificación de incendios, de acuerdo con las temperaturas obtenidas en laboratorio, no corresponde con la mineralogía. El incendio superficial (BISUP) alcanzó una temperatura de 250°C, el de copa severa (BICS) alcanzó 600°C y el de copa moderada (BICM), fue superior a los 600. Eso significa que la clasificación en campo no es precisa, y es necesario hacer una nueva clasificación.

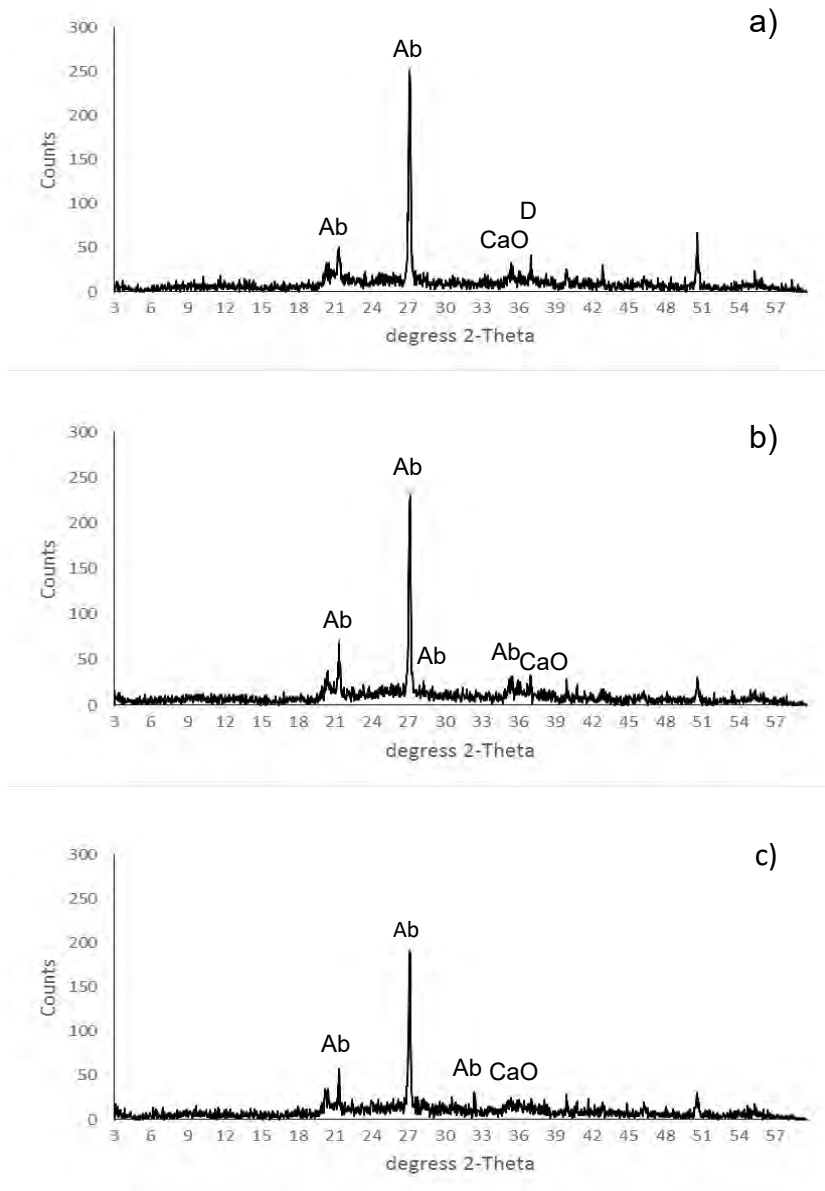


Figura 13. Difractogramas de rayos X de los suelos no afectados sometidos a distintas temperaturas: Bosque no afectado sometido a **250°C (a)**; Bosque no afectado sometido a **450°C (b)**; Bosque no afectado sometido a **600°C (c)**. *albita (Ab), óxido de calcio (CaO), dolomita (D).

7.2. Propiedades físicas y químicas del suelo

pH

Los incendios acidifican el pH del suelo 7.8 (BNA, BNA (Fe) y BNA (PP) respectivamente) a 7 (BICS y BICM 7.4; BISUP y BASEQ, 7.2) y 7.9, 7.0 y sin embargo, este incrementa con el tiempo, como es el caso del sitio BICS 50, en donde se presentan valores cercanos a los sitios no afectados, con un valor de 7.7. Por su parte la sequía disminuye el pH a 7.2 (Cuadro 10).

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los sitios son catalogados como neutros (BISUP, BASEQ y BNA (Fe)) y alcalinos (BNA, BNA (PP), BICS y BICM) (Figura 12).

Materia Orgánica

Los sitios con algún tipo de incendio presentan los contenidos más altos de MO (BISUP, 15.01%; BICM, 18.23%; BICS, 18.55), comparados con los no afectados (BNA (Fe), 9.85%; BNA (PP), 10.30% y BNA, 14.51%). Esta propiedad puede llegar a perderse por efectos de erosión en sitios con fuertes pendientes, como es el caso de BICS 50, que presenta valores de 6.56% de MO. Por su parte, en bosques con sequía aumenta la cantidad de MO, por el aporte de hojarasca, es muy alta con 31.31% (Cuadro 10), lo que genera que sea más susceptible a futuros incendios.

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los sitios presentan clases media, (BIC 50, BNA (Fe) y BNA (PP)), alta (BNA y BISUP) y muy alta (BICM, BICS y BASEQ) (Figura 12).

Se observaron diferencias significativas entre los suelos con bosques afectados y no afectados debido a que los incendios aportan material forestal combustionado que ayudan al proceso de mineralización, afectando de esta manera el porcentaje de MO.

Nitrógeno total

Los resultados (Cuadro 10) mostraron que los sitios afectados por incendio (BICM, 0.71%; BISUP, 0.52% y BICS, 0.42%) contienen un mayor porcentaje que los sitios no afectados (BNA, 0.32%; BNA (Fe), 0.31% y BNA (PP), 0.25%). El N no se pierde con el tiempo, pues el sitio afectado hace 50 años presenta un valor similar a los afectados (BICS 50, 0.64%). En el caso del sitio afectado por sequía presenta el mayor porcentaje de N (BASEQ, 0.72%)

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los sitios no afectados se encuentran dentro de la clase baja, y los sitios afectados dentro de la clase media; es decir que los incendios aumentan la cantidad de nitrógeno en el suelo (Figura 12).

Fósforo disponible

Los incendios incrementan la cantidad de P_{dis} , presentando los valores más altos (BICM, 0.60 mg kg^{-1} ; BISUP, 0.50 mg kg^{-1} ; BICS y 0.22 mg kg^{-1}), comparados con los sitios no afectados (BNA, $0.0460 \text{ mg kg}^{-1}$; BNA (Fe); $0.0360 \text{ mg kg}^{-1}$ y BNA (PP), 0.60 mg kg^{-1}), sin embargo se muestra que con el tiempo se pierden, pues BICS 50 (0.05 mg kg^{-1}) presenta un valor similar a los no afectados. La sequía afecta las cantidades de P_{dis} disminuyendo a $0.0360 \text{ mg kg}^{-1}$ (Cuadro 10).

Según la NOM-021-SEMARNAT-2000, determina que los suelos con valores menores a 5.56 mg kg^{-1} , presenta bajas cantidades de P disponible (Figura 12), como es el caso para todos los sitios de estudio.

Cuadro 10. Propiedades químicas de los suelos presentes en Cardonal, Hidalgo (medias \pm D.E).

Sitio	pH	CO	MO	N (tot)	P (dis)	Cationes intercambiables.				
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC
-----%-----				mg kg ⁻¹	-----cmol kg ⁻¹ -----					
BNA*	7.9 ^a (\pm 0.10)	8.42 ^a (\pm 2.14)	14.51 ^a (\pm 3.69)	0.32 ^a (\pm 0.22)	0.04 ^a (\pm 0.02)	186.42 ^a (\pm 78.34)	19.69 ^a (\pm 4.04)	1.28 ^a (\pm 0.44)	0.39 ^a (\pm 0.13)	41.79 ^a (\pm 8.72)
BNA (Fe)	7.0 ^a (\pm 0.32)	5.71 ^a (\pm 3.94)	9.84 ^a (\pm 6.80)	0.31 ^{ac} (\pm 0.06)	0.03 ^{ab} (\pm 0.03)	163.65 ^a (\pm 21.01)	21.61 ^a (\pm 28.38)	0.4 ^{ab} (\pm 0.21)	0.42 ^{ab} (\pm 0.09)	40 ^a (\pm 8.55)
BNA(PP)	7.8 ^a (\pm 0.00)	5.97 ^a (\pm 0.90)	10.3 ^a (\pm 1.55)	0.25 ^{bcd} (\pm 0.08)	0 ^b (\pm 0.00)	210.12 ^a (\pm 51.76)	24.52 ^a (\pm 13.35)	0.52 ^{ac} (\pm 0.23)	0.4 ^a (\pm 0.10)	22.43 ^b (\pm 5.33)
BISUP	7.2 ^b (\pm 0.15)	8.71 ^a (\pm 3.28)	15.01 ^a (\pm 5.65)	0.64 ^a (\pm 0.20)	0.5 ^c (\pm 0.17)	167.45 ^a (\pm 41.15)	14.46 ^b (\pm 3.95)	1.04 ^a (\pm 0.01)	0.22 ^{ac} (\pm 0.02)	28.8 ^{ab} (\pm 2.60)
BICM	7.4 ^{bc} (\pm 0.15)	10.57 ^a (\pm 0.75)	18.23 ^a (\pm 1.30)	0.71 ^a (\pm 0.12)	0.6 ^c (\pm 0.28)	155.58 ^a (\pm 64.62)	17.21 ^{ab} (\pm 2.52)	0.88 ^{ab} (\pm 0.09)	0.27 ^a (\pm 0.01)	38.53 ^a (\pm 2.91)
BICS	7.4 ^c (\pm 0.17)	10.76 ^a (\pm 1.73)	18.55 ^a (\pm 2.99)	0.52 ^{ae} (\pm 0.05)	0.22 ^{ac} (\pm 0.17)	82.3 ^{ab} (\pm 8.62)	30.5 ^{abc} (\pm 7.14)	1.71 ^a (\pm 0.47)	0.26 ^a (\pm 0.02)	46.4 ^{ac} (\pm 2.11)
BICS 50	7.7 ^{abc} (\pm 0.49)	3.81 ^b (\pm 1.08)	6.56 ^b (\pm 1.86)	0.43 ^{ad} (\pm 0.11)	0.05 ^{abc} (\pm 0.04)	133.71 ^a (\pm 45.08)	14.42 ^{ab} (\pm 7.62)	1.18 ^{ab} (\pm 0.76)	0.44 ^{ab} (\pm 0.08)	41.57 ^{ab} (\pm 16.47)
BASEQ	7.2 ^{bc} (\pm 0.17)	18.16 ^c (\pm 1.51)	31.31 ^c (\pm 2.60)	0.72 ^a (\pm 0.11)	0.03 ^{abc} (\pm 0.04)	96.25 ^{ab} (\pm 10.20)	29.37 ^{abc} (\pm 13.28)	1.42 ^a (\pm 0.43)	0.26 ^{ac} (\pm 0.02)	51.97 ^{ac} (\pm 3.06)

*(BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PP))= Bosque no afectado *Pinus Pinceana*, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BIC)= Bosque afectado por incendio de copa moderado, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS 50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años, (BASEQ)= Bosque afectado por sequía.

Las letras diferentes en la misma columna indican las diferencias significativas en análisis estadístico con P=0.05. (\pm D.E)= Desviación estándar.

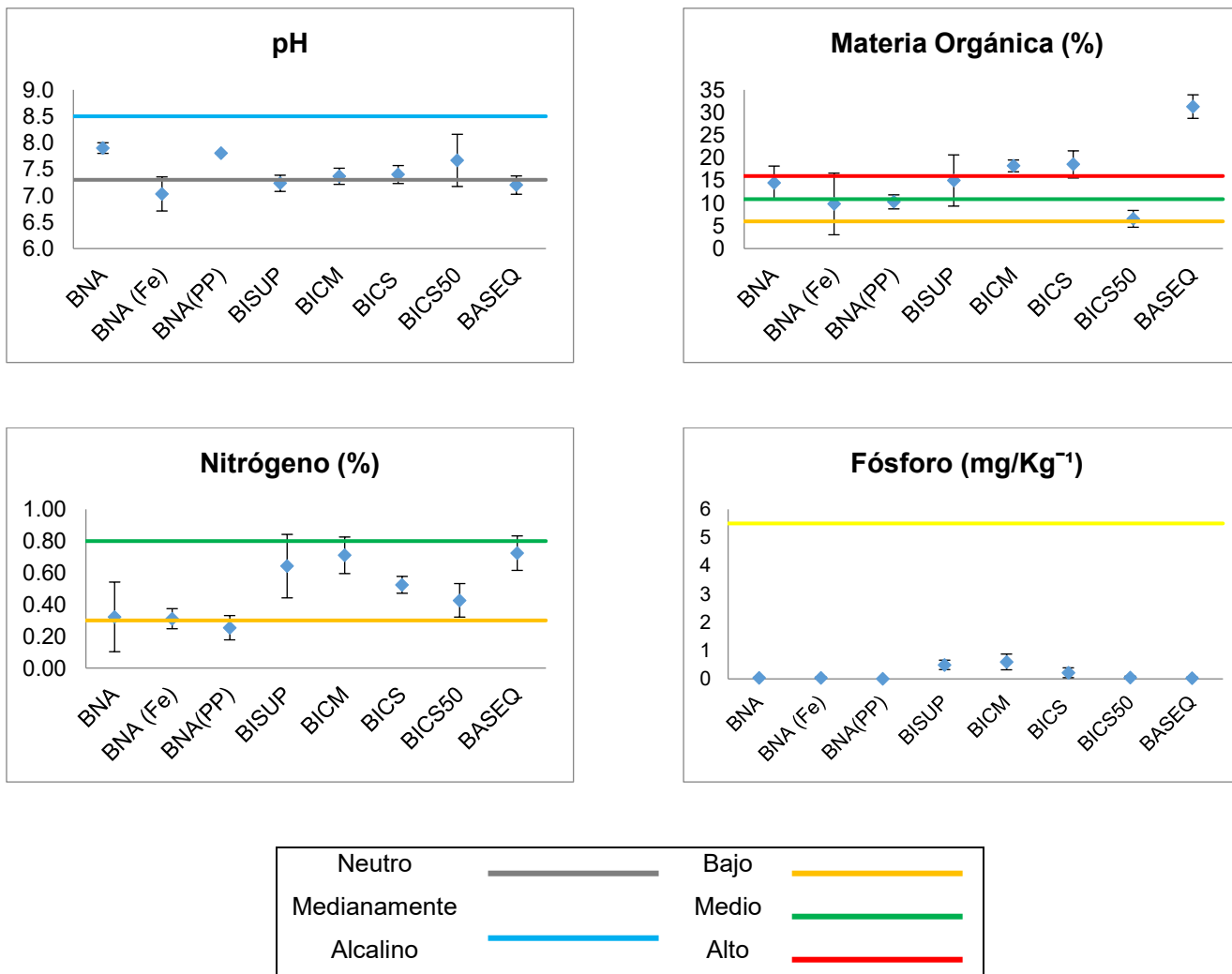


Figura 14. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, en los diferentes sitios de estudio (a): (BICM)= Bosque afectado por incendio de copa moderado, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS 50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años, (BASEQ)= Bosque afectado por sequía, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PL))= Bosque no afectado Pinus Pinceana.

Capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables

Los incendios modifican, en algunas ocasiones, los valores de la CIC, como es en el caso de los incendios superficiales (BISUP) los cuales disminuyen los valores a 28.80 cmol kg⁻¹. Sin embargo, para BIC y BICS (38.53y 46.40 cmol kg⁻¹, respectivamente) se mantienen los valores con respecto a los sitios no afectados (BNA (PP), 22.43 cmol kg⁻¹; BNA (Fe), 40 cmol kg⁻¹ y BNA, 41.79 cmol kg⁻¹). Estos valores no se modifican ya que tienen un valor de 41.57 cmol kg⁻¹ para BICS 50. Los valores más altos se presentaron para el sitio con sequía (BASEQ, 51.97 cmol kg⁻¹).

Los valores obtenidos de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-SEMARNAT-2000, corresponden a la clase media (BNA (PP)), alta (BISUP, BICM y BNA (Fe)) y muy alta (BICS50, BNA, BICS y BASEQ) (Figura 13).

Calcio. Los sitios con incendio presentan menor cantidad de calcio al obtenerse valores más bajos en BICS (82.30 cmol kg⁻¹) seguido de BICM y BISUP con (155.58 y 167.45 cmol kg⁻¹ respectivamente). Los cuales se incrementan y comienzan a parecerse a los sitios no afectados; BNA (Fe), BNA y BNA (PP) (163.65 cmol kg⁻¹, 186.42 cmol kg⁻¹ y 210.12 cmol kg⁻¹, respectivamente). Sin embargo este puede perderse con el tiempo ya que BICS 50 presenta un valor de 133.71 cmol kg⁻¹. La sequía afecta el contenido de Ca disminuyendo a 96.25 cmol kg⁻¹ (Cuadro 10).

Para todas las zonas se registraron valores superiores a 10 cmol kg⁻¹ que de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 son catalogados como clase alta. El origen calizo de la zona genera grandes aportes de Ca⁺⁺ al suelo (Figura 13).

Magnesio. Los incendios tuvieron efectos variables sobre la cantidad de Mg²⁺ en el suelo, por ejemplo, los incendios de copa severa (BICS) afectan con mayor proporción al suelo (hasta 30.50 cmol kg⁻¹); sin embargo, los incendios superficiales y de copa moderada presentan una menor cantidad (BISUP, 14.46 cmol kg⁻¹; BICM, 17.21 cmol kg⁻¹), similares a los sitios no afectados por incendio (BNA, 19.69 cmol kg⁻¹; BNA (Fe), 21.61 cmol kg⁻¹ y BNA (PP), 24. 52 cmol kg⁻¹). Estos valores se mantienen con el tiempo pues se tiene una cantidad de 14.42 cmol kg⁻¹ para BICS 50. La sequía incrementa en contenido de Mg pues se tiene 29.37 cmol kg⁻¹ para BASEQ (Cuadro 10).

Los contenidos en este elemento indican que hay un exceso de este nutrimento presente en los suelos, ya que en todos los sitios se presentan cifras mayores a las establecidas por la NOM-021-SEMARNAT-2000, catalogadas como altas (Figura 13).

Potasio. Los incendios incrementan la cantidad de potasio en los suelos, principalmente en incendios de copa severo (BICM, 0.88 cmol kg⁻¹; BISUP, 1.04 cmol kg⁻¹; BICS, 1.71 cmol kg⁻¹), los cuales son superiores en 50% a los sitios no afectados (BNA (Fe), 0.40 cmol kg⁻¹; BNA (PP), 0.52 cmol kg⁻¹ y BNA, 1.28 cmol kg⁻¹). La cantidad de K no disminuye con el tiempo pues se encontró un valor de 1.18 cmol kg⁻¹ en BICS 50. La sequía aumenta la cantidad de K con 1.42 cmol kg⁻¹ para BASEQ (Cuadro 10).

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los sitios BNA (Fe) y BNA (PL), se clasificaron como clase media; los demás sitios se catalogan como clase alta, presentando una mayor acumulación en el BICS (1.71 cmol kg⁻¹) (Figura 13), lo que nos indica que con el tiempo se va estabilizando este elemento en el suelo.

Sodio. Los incendios disminuyen la cantidad de Na (BISUP, 0.22 cmol kg⁻¹; BICS, 0.26 cmol kg⁻¹ y BICM, 0.27 cmol kg⁻¹), comparados con los sitios no afectados donde se registran valores mayores (BNA (Fe), 0.42 cmol kg⁻¹; BNA (PP), 0.40 cmol kg⁻¹ y BNA, 0.39 cmol kg⁻¹). Este elemento puede incrementar con el tiempo y presentar valores similares a los encontrados en los sitios no afectados como se observa con BICS 50 (0.44 cmol kg⁻¹). Por su parte, la sequía afecta de manera similar a los incendios, pues presenta valores similares a estos (BASEQ, 0.26 cmol kg⁻¹) (Cuadro 10).

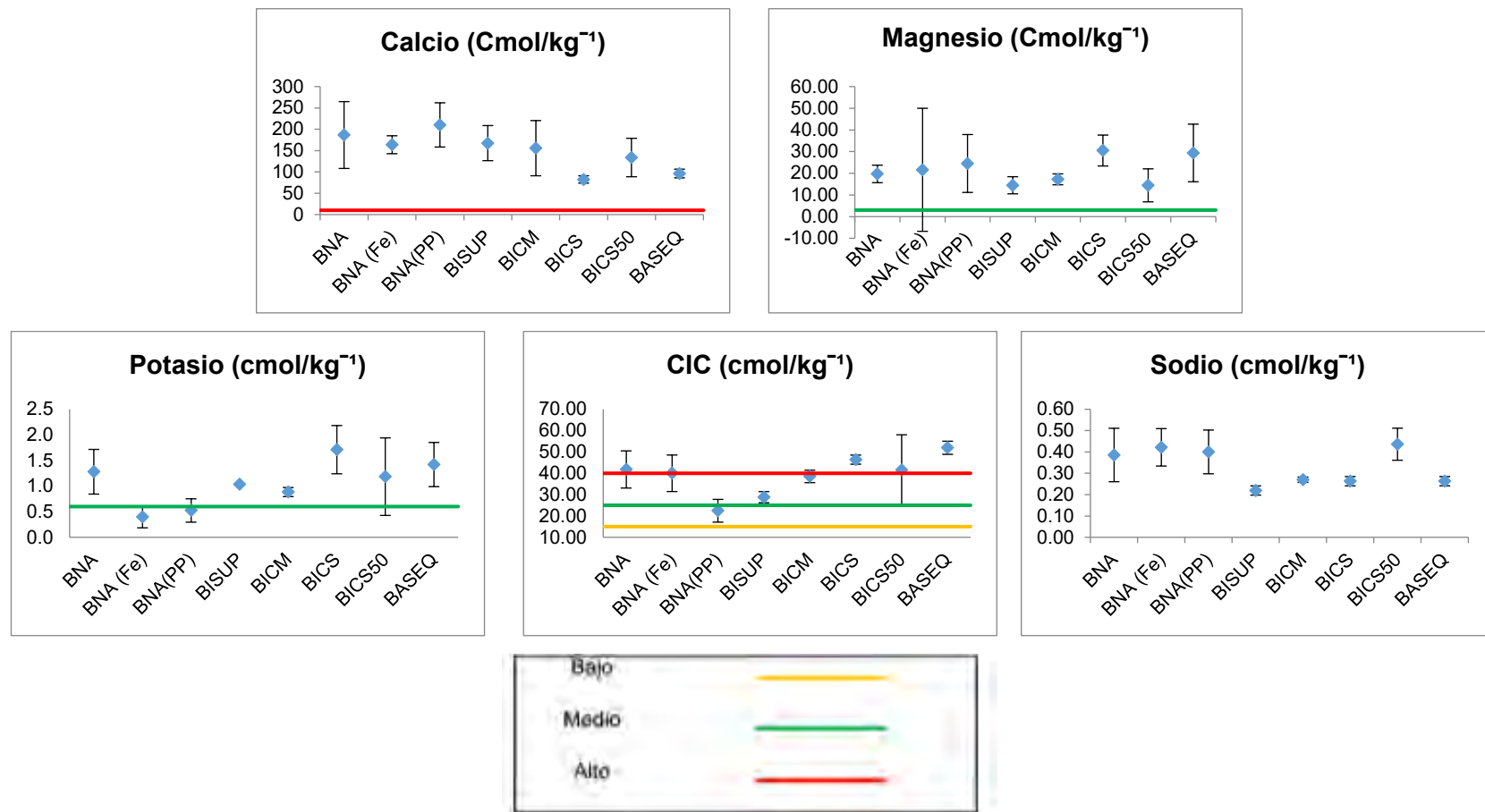


Figura 15. Propiedades químicas y su clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, en los diferentes sitios de estudio (b): (BICM)= Bosque afectado por incendio de copa moderado, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS 50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años, (BASEQ=) Bosque afectado por sequía, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PP))= Bosque no afectado Pinus Pinceana.

Determinación de iones Fe y Al

Hierro. Tanto para el método de extracción de ditionito-citrato-bicarbonato como para el oxalato ácido, se observó que los suelos de los sitios de estudio, de manera general, no presentan concentraciones de este elemento. Esto puede deberse a su naturaleza geológica, derivada principalmente de rocas calizas (Cuadro 11 y Figura 14).

Aluminio. De la misma manera que con el hierro, las concentraciones de aluminio, con el método de extracción por oxalato ácido, no presentan concentraciones de este elemento. (Cuadro 11 y Figura 14).

Determinación del material amorfo

De acuerdo con los datos obtenidos se puede apreciar una pequeña mayor cantidad de material amorfo en los sitios afectados por incendio y sequía que en sitios no afectados. Sin embargo, los valores son muy bajos o incluso nulo.

Cuadro 11. Concentraciones de Hierro y Aluminio (medias \pm D.E), en suelos de Cardonal, Hidalgo.

sitio	Ditionito de Sodio				Oxalato ácido				Amorfos	Rel Al:Fe
	%Fe ³⁺	%Fe ₂ O ₃	%Al ³⁺	%Al ₂ O ₃	%Fe ³⁺	%Fe ₂ O ₃	%Al ³⁺	%Al ₂ O ₃	Al/Fe	Al+1/2Fe
BNA	0.05 ^a (\pm 0.01)	12.93 ^a (\pm 1.51)	N/D	N/D	0.01 ^a (\pm 0.00)	5.62 ^a (\pm 0.12)	0.01 ^a (\pm 0.00)	4.24 ^a (\pm 0.51)	0.57	0.010
BNA (Fe)	0.09 ^b (\pm 0.03)	17.13 ^b (\pm 3.26)	N/D	N/D	0.01 ^{ac} (\pm 0.00)	6.02 ^{ac} (\pm 0.72)	0.01 ^a (\pm 0.00)	5.1 ^a (\pm 0.37)	0.71	0.013
BNA(PP)	0.02 ^{ac} (\pm 0.00)	7.83 ^{ac} (\pm 0.62)	N/D	N/D	0.00 ^b (\pm 0.00)	2.61 ^a (\pm 0.09)	0.00 ^b (\pm 0.00)	2.07 ^b (\pm 0.23)	0.63	0.002
BISUP	0.05 ^a (\pm 0.01)	12.35 ^a (\pm 1.99)	N/D	N/D	0.01 ^c (\pm 0.00)	6.82 ^c (\pm 0.13)	0.01 ^c (\pm 0.00)	6.36 ^c (\pm 0.50)	0.87	0.019
BICM	0.07 ^{abd} (\pm 0.00)	15.59 ^{abd} (\pm 0.54)	N/D	N/D	0.01 ^c (\pm 0.00)	6.53 ^c (\pm 0.24)	0.01 ^c (\pm 0.00)	5.99 ^c (\pm 0.17)	0.84	0.017
BICS	0.04 ^a (\pm 0.00)	10.92 ^a (\pm 0.73)	N/D	N/D	0.01 ^a (\pm 0.00)	5.25 ^a (\pm 0.25)	0.01 ^{ad} (\pm 0.00)	4.81 ^{ad} (\pm 0.37)	0.84	0.011
BICS50	0.05 ^{abc} (\pm 0.06)	10.99 ^{abc} (\pm 8.01)	N/D	N/D	0.00 ^{abcd} (\pm 0.01)	3.2 ^{abcd} (\pm 2.93)	0.01 ^{abc} (\pm 0.01)	3.92 ^{abc} (\pm 2.64)	1.25	0.008
BASEQ	0.04 ^{ab} (\pm 0.01)	11.19 ^{ab} (\pm 1.19)	N/D	N/D	0.00 ^d (\pm 0.00)	4.22 ^d (\pm 1.70)	0.01 ^a (\pm 0.00)	4.37 ^a (\pm 0.58)	1.08	0.008

*(BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PP))= Bosque no afectado *Pinus Pinceana*, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BIC)= Bosque afectado por incendio de copa, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS 50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años (BASEQ=) Bosque afectado por sequía.

Las letras diferentes en la misma columna indican las diferencias significativas en análisis estadístico con $P=0.05$. (\pm D.E)= Desviación estándar. Al³⁺ y Fe³⁺ extractables con oxalato ácido y ditionito de sodio.

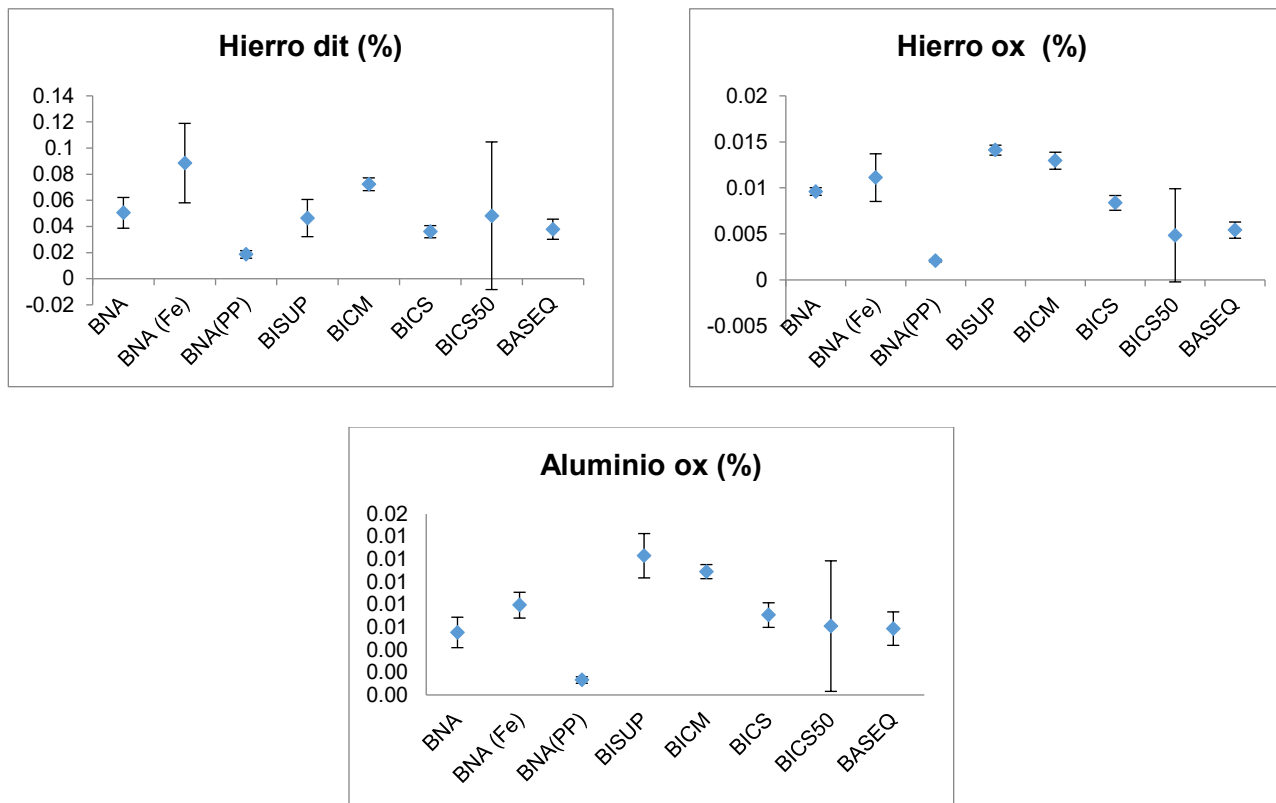


Figura 16. Propiedades químicas, Hierro y Aluminio en los diferentes sitios de estudio: (BICM)= Bosque afectado por incendio de copa moderada, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS 50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años, (BASEQ)= Bosque afectado por sequía, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PP))= Bosque no afectado Pinus Pinceana.

Textura

Los resultados obtenidos (Cuadro 12) sugieren que la clase textural se modifica en incendios de copa severo (BICS) en ambas capas y en BICM, en la capa superficial cambiando a arcillo limosa. Los demás sitios presentan clase arcillo arenosa con excepción de BNA (PP).

Cuadro 12. Clase textural en suelos de Cardonal, Hidalgo.

Sitio	Profundidad	%A	%L	%R	Clase textural
BNA*	0-5 cm	5.56	47.71	46.73	Arcillo Arenosa
	5-10 cm	9.32	50.88	39.80	Arcillo Arenosa
BNA (Fe)	0-5 cm	7.45	30.08	62.47	Arcillo Arenosa
	5-10 cm	5.64	18.96	75.39	Arcillo Arenosa
BNA (PP)	0-5 cm	23.43	52.90	23.68	Arcillo limosa
	5-10 cm	26.97	63.12	9.91	Arcillo limosa
BISUP	0-5 cm	29.93	6.85	63.21	Arcillo Arenosa
	5-10 cm	22.45	29.08	48.47	Arcillo Arenosa
BICM	0-5 cm	16.01	59.32	24.67	Arcillo limosa
	5-10 cm	22.23	34.40	43.37	Arcillo Arenosa
BICS	0-5 cm	22.50	56.51	20.99	Arcillo limosa
	5-10 cm	21.61	64.82	13.57	Arcillo limosa
BICS 50	0-5 cm	11.82	58.62	29.56	Arcillo Arenosa
	5-10 cm	14.02	49.34	36.64	Arcillo Arenosa
BASEQ	0-5 cm	8.15	24.84	67.01	Arcillo Arenosa

*(BNA)= Bosque no afectado, (BNA (Fe))= Bosque no afectado con acumulación de Fe, (BNA (PP))= Bosque no afectado *Pinus pinceana*, (BISUP)= Bosque afectado por incendio superficial, (BICM)= Bosque afectado por incendio de copa moderado, (BICS)= Bosque afectado por incendio de copa severo, (BICS50)= Bosque afectado por incendio de copa severo hace 50 años, (BASEQ)= Bosque afectado por sequía.

8. DISCUSIÓN

8.1. Efecto de los incendios forestales sobre: Las propiedades mineralógicas del suelo de un bosque de *Pinus cembroides*.

Los incendios forestales en bosques de *Pinus cembroides* actúan de manera diferente con respecto al tipo de incendio, los cuales alteran la forma cristalina y la abundancia con la que se presentan los minerales en el suelo.

De acuerdo con la nueva clasificación por temperaturas obtenidas a través de la mineralogía:

Los incendios superficiales (BISUP) no generan nuevos minerales, ya que se presentan albitas (Ab), óxidos de calcio (CaO), y dolomitas (D); estos sólo se incrementan en abundancia con respecto a los minerales presentes en el bosque no afectado (BNA). Las temperaturas alcanzadas (250°C) no modificaron los minerales. Al respecto Monger y Kelly (2002) señalan que los silicatos sólo pueden ser modificados a partir de los 450° C. En contraste, Fernández *et al.* (2010), encontraron que sólo se presentan modificaciones en tamaños de partícula a partir de los 170 °C, por calcinación de silicatos, Fe y Al.

En los incendios de copa moderada (BICM) no se presentaron cambios en la estructura cristalina de los minerales, lo que se atribuye a que no se alcanzaron temperaturas mayores de 600°C. Ángeles-Cervantes (2010) encontró que el cuarzo y sus polimorfos son poco estables a temperaturas cercanas a los 400°C y se vuelven estables a temperaturas mayores a los 600°C hasta los 867°C, que es cuando se transforma a tridimita, De acuerdo con Tullis (1983), los feldespatos se modifican a partir de los 450-500°C.

En el caso de los incendios de copa severa (BICS) estos si modifican la mineralogía del suelo, ya que a estas temperaturas (mayor a 600°C) se puede observar la dominancia de la calcita magnésica. Este mismo mineral fue reportado por Ulery *et al.* (1993) y Úbeda *et al.* (2009) en las cenizas de suelos quemados. Otros autores (Iglesias *et al.*, 1998) indican que la presencia de oxalato de calcio en las cenizas procedente de las plantas quemadas (*Juniperus oxycedrus*), puede convertirse en carbonatos de calcio (Wattez y Courty, 1987) si es sometido a una temperatura de 479°C (Quintana *et al.*, 2007). En el caso de las plagioclasas feldespáticas, se identificó la albita (NaAlSi₃O₈), presente en todos los sitios tanto afectados como no afectados. A temperaturas superiores a 600 °C los minerales (arcillas 2:1) son destruidos en consecuencia la Calcita magnésica domina sobre los otros minerales.

8.2. Efecto de los incendios forestales sobre: Las propiedades físicas y químicas del suelo de un bosque de *Pinus cembroides*

pH

Se observó que los incendios forestales y las sequías pueden llegar a disminuir el pH del suelo, ya que en los sitios afectados (BISUP, BIC, BICS y BISEQ) se presentaron diferencias significativas con respecto a los sitios no afectados. Al respecto, DeBano *et al.* (1978) mencionan que la liberación de los cationes intercambiables presentes en las cenizas (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+) puede acidificar los suelos. Sin embargo, con el paso del tiempo, la pérdida de grupos hidrófilos por parte de las arcillas y la formación de óxidos derivados de la disolución de carbonatos (Giovannini, 1994) incrementa considerablemente el pH, como se puede observar en BICS50, que presentó valores similares significativamente a los sitios no afectados. Estos valores pueden persistir o disminuir dependiendo del lavado de los cationes, principalmente sobre la superficie (Carballas, 1993; Mataix-Solera, 1999); sin embargo, en suelos alcalinos se muestra que el pH se acidifica ligeramente.

Materia orgánica

Los sitios afectados por incendios incrementaron el porcentaje de materia orgánica (en algunos sitios hasta el doble; (BNA (Fe) vs BIC), debido a la incorporación de cenizas y a la descomposición de fragmentos de leña parcialmente quemados (Ferran *et al.*, 2005). Se ha reportado que en sitios quemados con suelos alcalinos, los incendios superficiales y de copa tienden a incrementar los porcentajes de MO (Carballas, 1993).

De acuerdo con Fassbender y Bomemisza (1994), la materia orgánica incrementa en sitios afectados por incendio y por sequía, hasta en 50%. Los sitios con sequía favorecen la acumulación de hojarasca y material incinerado; aunque, se puede perder con el tiempo (BICS50) por medio de la mineralización (Caon *et al.*, 2014) o por la erosión, sobre todo en sitios con fuertes pendientes (De Bano y Conrad, 1978).

Si bien el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre sitios afectados y no afectados, los valores con significancia fueron los presentes en BASEQ y BICS50, con los valores más altos (31.31%) y más bajos (6.56%), respectivamente.

Nitrógeno total

Se registraron los valores más altos de N_{tot} en los sitios con incendios de copa severo y sequía, lo que coincide con lo reportado por Castelli y Lazzari (2002) en suelos de climas semiáridos de Argentina. De la misma manera, Hamman *et al.* (2008) y Ferran *et al.* (2005) confirman que existe un aumento significativo de N_{tot} después de un incendio, principalmente a una profundidad de 0 a 5 cm (generalmente en el Horizonte A). No obstante, el contenido de nitrógeno después de un incendio puede ser muy variable, ya que dependerá de la intensidad y duración del mismo, así como del material quemado (Caon *et al.*, 2014). El nitrógeno puede ser volatilizado total o parcialmente a una temperatura de 200 °C (Carballas, 1993), por lo que puede disminuir considerablemente después de un incendio. Un aumento en este elemento podría deberse al depósito del material parcialmente incinerado.

De manera general, la NOM-021-SEMARNAT-2000, clasifica a los sitios no afectados como de clase baja, y los sitios afectados como clase media. No obstante, es preciso señalar que el análisis estadístico no mostró diferencias significativas marcadas entre estos dos grupos de sitios.

Fósforo disponible

La cantidad de P disponible es mayor en sitios con incendios superficiales y de copa, un comportamiento similar es reportado por Badía y Martí (2003) sobre matorrales en suelos calcáreos. De la misma forma, Kutiel e Inbar (1993) y Kutiel y Shaviv (1992) reportan incrementos de P, en sitios post incendios, dentro del horizonte A en bosques de pino y roble. Este aumento puede deberse a la cantidad de MO en el suelo y a los minerales solubles presentes en las cenizas (Gimeno *et al.*, 2000); sin embargo, un sitio que es afectado constantemente por incendios, disminuye el incremento de este elemento, significativamente (Ferran *et al.*, 2005). Para que el P pueda perderse por medio de la volatilización es necesario que las temperaturas alcancen un valor mayor o igual a 770 °C (Caon *et al.*, 2014).

A pesar de que se observan diferencias entre sitios, los valores no presentaron diferencias significativas entre grupos. Además, la NOM-021-SEMARNAT-2000, determina que los suelos con valores menores a 5.56 mg Kg⁻¹, presenta bajas cantidades de P disponible, que fue el caso de todos los sitios estudiados.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables

El sitio con incendio superficial disminuyó la CIC con respecto a los otros tipos de incendio, en donde se incrementó. La pérdida de materia orgánica es una de las causantes de esta disminución y puede persistir hasta por diez años (Carballas, 1993). Caon *et al.*, (2014) mencionan que los incendios de alta intensidad pierden cerca de 80% del total de cationes intercambiables, por escorrentía, erosión y en especial Ca^{+2} y Mg^{+2} por volatilización. Sin embargo, los datos obtenidos demuestran que sólo los incendios de copa incrementan la CIC. DeBano y Conrad (1978) mencionan un incremento de CIC y cationes intercambiables en sitios post incendio, principalmente localizados en el horizonte O y de acuerdo con Badia y Martí (2003), lo mismo ocurre pero en el horizonte A.

Calcio. De manera general, los sitios con y sin incendio no presentaron diferencias contrastantes entre sí, debido a la naturaleza de los sitios, que son de origen calizo y que justifica los altos valores encontrados en los análisis. Sin embargo, los sitios BIC y BASEQ presentaron una disminución de hasta 50% con respecto a los demás. El incremento en las concentración de CaCO_3 , se debe principalmente al aporte de las ceniza y el cambio de pH en el suelo sometido a incendio, y esto sucede a temperaturas de entre 300 y 400 °C (Inbar *et al.*, 2014; Caon *et al.*, 2014). Si bien los suelos calizo presentan abundancia de Ca^{2+} , este puede decrecer significativamente en incendios de alta intensidad, ya que el calcio se volatiliza a temperaturas mayores de 1400°C; sin embargo, es posible que una fracción de calcio se volatilice en la materia orgánica a temperaturas de 677°C (Gimeno *et al.*, 2000).

Para todas las zonas se registraron valores superiores a los 10 Cmol kg^{-1} , que de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 son catalogados como clase alta. Estos valores eran de esperarse, ya que la zona de estudio tiene un origen propiamente calizo.

Magnesio. Los suelos calcáreos, por su formación derivada de rocas calizas, presentan una dominancia de Ca^{2+} y Mg^{2+} dentro de su composición y los incendios pueden afectar de diferente manera de acuerdo con su intensidad. Los sitios con incendio superficial y de copa severo disminuyeron hasta en 30% las concentraciones de magnesio en el suelo, comparados con los sitios no afectados (BISUP vs BNA (Fe)). Caso contrario sucedió en los incendios de copa y sequía que aumentaron su contenido, debido probablemente a la cantidad de minerales solubles aportados por las cenizas y hojarasca (Gimeno *et al.*, 2000). Sin embargo, se ha observado que los sitios que sufrieron algún tipo de incendio, después de ocho meses aproximadamente, los valores se restablecen (Kutiel e Inbar, 1993), lo cual no se observó en BICS50, en donde más bien se relaciona directamente con las bajas concentraciones de Mg, y con los bajos valores de MO.

Según, Caon *et al.* (2014) reportaron que el Mg se volatiliza a temperaturas de entre 250 y 600°C, lo cual sólo es similar en BISUP, pero no concuerda con BIC.

Los valores altos en este elemento indican que hay un exceso de este nutrimento presente en los suelos, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000. Sin embargo, estos valores son normales para las condiciones de origen en las que fueron formados estos suelos estudiados.

Potasio. Los incendios pueden incrementar la cantidad de potasio en el suelo hasta el doble con respecto a sitios no afectados (BNA (PP) vs BISUP). De Bano y Conrad (1978) y Gimeno *et al.* (2000) mencionan que el potasio se incrementa por el aporte de las plantas y la MO combustionada, principalmente en incendios de alta intensidad. Por el contrario, Ferran *et al.* (2005) observaron que el potasio no aumenta significativamente, dentro el horizonte A, inmediatamente después del fuego. De la misma manera, en los sitios estudiados no se presentaron diferencias significativas a pesar de que en sitios post incendio hayan incrementado los valores hasta el doble.

Sodio. Los incendios y la sequía disminuyen la cantidad de sodio, ya que dentro de los sitios afectados se presentó una menor concentración comparado con los no afectados. De acuerdo con Fassbender y Bomemisza, (1994), las temperaturas que se alcanzan durante el incendio llevan a la pérdida de algunos elementos como el sodio, principalmente en incendios superficiales. Lo anterior justifica los bajos valores obtenidos para BISUP hasta menos del doble, aunque, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas.

Fe y Al. De manera general, los sitios tanto afectados y no afectados por incendio no presentaron concentraciones de hierro y aluminio, ya que de manera natural la zona presenta un origen de formación calizo. Los sitios están dominados principalmente por minerales a base de calcio y magnesio, por lo que no hay formación de Fe y Al.

Materiales amorfos. La alteración de los minerales primarios da lugar a la formación de una pequeña cantidad denominada "materiales amorfos", los cuales pueden ser cuantificados por medio de una extracción por oxalato ácido. Si bien, los sitios no muestran una alta relación de estos componentes, se pudo observar que en los sitios afectados por incendio y sequía se presentaron los mayores valores con respecto a los no afectados. Para BICS50 se reportan valores de 1.25%, siendo el valor máximo dentro de todos los sitios analizados. Al respecto, Hernández-Bastida *et al.* (1997 y 1998) mencionan que el valor máximo obtenido en suelos de zonas áridas de España es de 2% de materiales amorfos.

Textura. Si bien, se ha observado que el porcentaje de arcillas puede disminuir hasta en 55% en suelos afectados por incendios (Giovannini *et al.*, 2001). Algunos autores al respecto (Giovannini, 1994; Ketterings *et al.*, 2000; Arocena y Opio, 2003) reportan cambios en la textura de los suelos a temperaturas de entre 200 y 275 °C, que justifican debido a la deshidratación de minerales de arcilla y a la transformación de óxidos de hierro y aluminio que actúan como agentes cementantes, que ocasionan un incremento temporal dentro de la fracción arena. En los sitios estudiados no se presentaron modificaciones en lo que respecta a la textura, ni a profundidades de 0 a 5 cm, ni de 5 a 10 cm.

9. CONCLUSIONES

Los bosques de Pinus Cembroides localizados dentro del municipio del Cardonal, en el estado de Hidalgo, mostraron cambios en algunas de sus propiedades mineralógicas, físicas y químicas del suelo, cuando se han presentado algún tipo de incendio. Los minerales como albita, óxido de calcio, y dolomita, se encuentran presentes en todos los tipos de incendio con cambios en abundancia en algunos sitios. Sólo para los incendios de copa se observó como mineral principal calcita magnésica, lo anterior indica que el estudio de los diferentes incendios a través de los análisis mineralógicos permite estimar las temperaturas alcanzadas en este tipo de eventos y el cambio de su composición mineralógica dentro del suelo.

La presencia de calcita magnésica como mineral nuevo en los incendios de copa, así como, la abundancia de minerales nos indica una temperatura alcanzada de superior a 600°C; mientras que el incremento en la abundancia de albita indica temperaturas aproximadas de 250 °C y 600°C para incendios superficiales y de copa severo, respectivamente. Por lo que es necesario reclasificar los tipos de incendio.

Las propiedades químicas de los suelos en los diferentes tipos de incendio presentaron un incremento en los porcentajes MO, P, N_{tot}, K y CIC, y reducciones en valores de pH, Ca, Mg y Na que se debe al aporte de minerales por restos vegetales y cenizas.

De manera general, los incendios superficiales sólo modifican la abundancia de los minerales, mientras que los incendios de copa modifican abundancia y composición de minerales. La fertilidad del suelo es mayor en sitios con incendio, lo que favorece en una pronta recuperación de los ecosistemas de manera natural.

10. LITERATURA CITADA

Afif Khouri E. y Oliveira Prendes J.A., 2005. Efectos de la quema controlada sobre matorral en la erosión hídrica, el valor pastoral y las propiedades de suelo a largo plazo. *Edafología*, Vol. 12. (2), pp 91-103.

Ángeles-Cervantes E., 1984. Producción de semillas en un piñonar del Estado de Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura. UNAM, FES Zaragoza. p 60

Ángeles-Cervantes E., 2010. Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de oyamel. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo de México. p 12

Amonnette J.E., 2000. Methods for determination of mineralogy and environmental availability. En Dixon J. y Schulze D. Eds. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.

Arnan, Rodrigo A., Retana J., 2007. Regeneración post-incendio de las comunidades vegetales mediterráneas en una escala regional depende del tipo de vegetación y la sequedad *J. Veg. Sci.*, 18, pp. 111-122

Arocena, J.M.; Opio, C., 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 113, pp. 1-16

Badía, D., Martí, C., 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Res. Manage.* 17, 23–41.

Barragan Maravilla S. M., 2016. Emergencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides* en condiciones postincendio. Tesis de Licenciatura. UNAM, FES Zaragoza. 66p.

Ben-Hur, M., Fernandez, C., Sarkkola, S., Cerezal, J.C.S., 2011. Overland flow, soil erosion and stream water quality in forest under different perturbations and climate conditions. In: Bredemeier, M., Cohen, S., Godbold, D.L., Lode, E., Pichler, V., Schleppei, P. (Eds.), *Forest Management and the Water Cycle*. Ecological Studies. Springer, Netherlands, pp. 263–289.

Bish D.L. y Post J.E., 1989. *Modern powder diffraction*. Mineralogical society of Americana, Washington, XI 369 p. ISBN 0-939950-24-3

Blanco-Canqui, H. y R. Lal., 2009. Extent of subcritical water repellency of soils under long-term no-tillage systems on a regional scale. *Geoderma* 149:171-180.

Bremner y Mulvaney, in Page, A. L., Miller M.L. y Keeney D. R., 1982. *Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and microbiological properties*, Agronomy Series no. 9, ASA, Madison, Wis, USA. P 595

Bronick, C. J., and R. Lal., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124:3-22.

Caon L., Vallejo V. R., Ritsema C. J. y Geissen V., 2014. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews* 139 (2014) 47–58

Carballas, T., 1993. Effects of fires on soil quality. Biochemical aspects. Project: Fire influence on organic matter evolution and N and P mobilization in forest soils: Management for soil reclamation. Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia (CSIC).

Cárdenas Cruz K.L., 2015. Efecto de los incendios forestales sobre la fauna terrestre en bosques de pino piñonero. Tesis de Licenciatura. UNAM, FES Zaragoza. p 20

Castelli, L., Lazzari, M., 2002. Impact of fire on soil nutrients in central semiarid Argentina. *Arid Land Res. Manag.* 16, 349–364.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2008. Incendios forestales.

Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecología*. 1–10 pp.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2012. La biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)/Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). México.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2010. Incendios Forestales. Guía práctica para comunicadores

CONAFOR, 2017. Reporte Semanal de Resultados de Incendios Forestales 2016. Del 01 de enero al 31 de diciembre de 2016. Programa Nacional de prevención de Incendios Forestales. CONAFOR-CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES.

DeBano, L.F., Conrad, C.E., 1978. The effect of fire on nutrients in a chaparral ecosystem. *Ecology* 489–497.

DeBano, L.F., Rice, R.M. y Conrad, C.E., 1979. Soil heating in chaparral fires: effects on soil properties, plant nutrients, erosion and runoff. Paper PSW-145. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Berkeley, CA.

DeBano, L.F., 1991. The effect of fire on soil. En: A.E. Harvey y L.F. Neuenschwander (Eds.). *Management and productivity of western-montane forest soils*. General Technical Report INT-280. Intermountain Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Ogden, UT. pp. 151-155.

De Bano, L. F., Neary D. G. and Folliott P. F., 1998. *Fire's effects on ecosystems*, John Wiley & Sons, New York, USA.

DeBano, L.F., 2000b. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. *Journal of Hydrology*, 231-232, 195-206.

De León Morales, E. 2010. Factores que influyen en la producción de piñon de *Pinus cembroides* Zucc. Monografía Saltillo Coahuila. 23-36p.

Dixon. J. B., and Sterling. B. Weed., 1989. *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America. Second Edition. Madison, Wisconsin, USA.

Edem I. D., Udoinyang U. C. & Edem S. O., 2012a. Variability of soil physical conditions along a slope as influenced by bush burning in acid sands. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 1(6):8-14.

Edem I. D., Uduak C. U. & Ifiok. R. I., 2012b. Erodibility of slash-and-burn soils along a toposequence in relation to four determinant soil characteristics. *J. Biol. Agric. Healthcare.* 2(5):93-102.

Edem I. D., Alphonsus D. U. y Christiana J. I., 2013. Soil properties dynamics induced by passage of fire during agricultural burning. *Int. J. Adv. Agric. Res.*43-52

Fassbender, Hans W., 1975. *Química de suelos. Énfasis en suelos de América latina*. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. 351 pp.

Fassbender, H.; Bornemisza, E., 1994. *Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina*. 2da. ed. rev. San José, Costa Rica: IICA. 420 p.p.

Fernández, M.C., Gimeno, P. Y González, J., 1988. Impacto del fuego sobre ecosistemas edáficos, En II Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Sevilla, 603-608, Sociedad Española de la Ciencia del Suelo e Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC), Sevilla.

Fernández, M.C., Iglesias, T. Y González, J., 1991. Evaluación del impacto edáfico en un incendio forestal. XVIII Reunión Nacional de Suelos. Tenerife, 22-28 Septiembre, 387-394.

Fernández, C.; Vega, J.A.; Vieira, D.C.S., 2010. Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in NW Spain: Performance of RUSLE and Revised Morgan-MorganFinney models. *Land Degradation and Development*. 21: 74-87

Ferran, A., Delitti, W., Vallejo, V.R., 2005. Effects of fire recurrence in *Quercus coccifera* L. shrublands of the Valencia Region (Spain): II. plant and soil nutrients. *Plant Ecol.*177, 71–83.

Gimeno, G. E., Andreu, V. y Rubio, J.L., 2000. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorous, and cations as a result of fires and water erosion in a Mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science* 51:201-210

Giovannini G., 1994. The effect of fire on soil quality. En: *Soil erosion as a consequence of forest fires*, Geoderma, Logroño, España. pp. 15-27.

Giovannini, G. y Lucchesi, S., 1997. Modification induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science* 162:479-486

Giovannini, G., Vallejo R., Lucchesi, S., Bautista S., Ciompi S., y Llovet J., 2001. Effects of land use and aeventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean condition. *Forest Ecology and Management* 147: 15-23 p.

Gonzales, J., Fernandez, C. y Gimeno, P., 1992. Efectos de los incendios forestales sobre el suelo. *Suelo y planta*, 71-79.

Granados Victorino R.L., Diódoro Granados Sanchez y Arturo Sanchez González., 2015. Caracterización y ordenación de los bosques de pino piñonero (*Pinus cembroides subsp. orizabensis*) de la Cuenca Oriental (Puebla, Tlaxcala y Veracruz). *Madera y Bosques* Vol. 21, num 2: 23-42 p.

Hamman, S.T., Burke, I.C., Knapp, E.E., 2008. Soil nutrients and microbial activity after early and late season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *For. Ecol. Manag.* 256, 367–374

Hernández Bastida J.A., Fernandez Tapia M.T. y Vela de Oro N., 1997. Suelos desarrollados en condiciones semiáridas a partir de veritas del volcán de Barqueros (Murcia). *Boletín de la sociedad Española de la Ciencia del Suelo* (N°3-2), pp 271-279.

Hernández Bastida J, Alvarez Rogel J, Faz Cano A., 1998. Variations of some edaphic properties in fire damaged pinewood (*Pinus Halepensis*) and esparto field (*Stipa tenacissima*) in Murcia (SE Spain). In: Rodríguez AR et al., editors. *The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures*. Logroño: Geoforma Ediciones. p. 419-429.

Hielo GG, Neary DG, Adams PW., 2004. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos y los procesos de las cuencas hidrográficas *J. For.*, 102, pp. 16-20

Holmgren, G. G. S., Juve R. L. y Geschwender, R. C., 1977. A mechanically controlled variable rate leaching device. *SoilSci. Soc. Am. J.* 41: 1207-1208.

Houba V. J. G., van der Lee, Novozamski I. y Walinga I., 1988. Soil and plant analysis. Part 5: Soil analysis procedures. *De pon soils Sci. And Plant Nutrition*. Agric. Univ, Wageningen, the Nertherlands.

Iglesias López, M.T., Fernández Bermejo, M.C., González Parra, J., 1998. Modificaciones en algunas características del suelo a causa del fuego. *Cuaternario y Geomorfología* 12, 41–47.

Inbar, A.; Lado M., Sternberg M., Tenau H., Ben-Hur M., 2014. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region, *Geoderma*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.015>

ICDD, 2004. Mineral name search result. International Centre for Diffraction Data. Rohades C.C., Meier A.J., y Rebertus A.J. 2004. Soil properties in fire-consumed log burnout openings in a Missouri oak savanna. *Forest Ecology and Management* 192:277-284.

INEGI, 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1.

INEGI, 2005. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas, Precipitación Total Anual y Temperaturas Medias Anuales 1:1 000 000, serie I.

INEGI, 2005. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional).

INEGI, 2005. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie III Escala 1:250 000.

INEGI, 2005. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie II.

INEGI, 2011. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V.

INEGI, 2012 Aspectos generales del territorio mexicano. Recursos Naturales. Edafología. Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx>. Fecha de consulta: febrero de 2012.

IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Jalaluddin, M., 1969. Microorganic colonization of forest soil after burning. *Plant and Soil*, 30: 150-152.

Jaramillo, D. F., 2002. *Introducción a la ciencia del suelo. Factores de formación del suelo.* Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Johnston, M. y Elliott, J., 1998. The effect of fire severity on ash, and plant and soil nutrient levels following experimental burning in a boreal mixedwood stand. *Can. J. Soil Sci.* 78: 35-44

Ketterings Q., Bigham J. & Laperche V., 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fire in Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1108-1117.

Klein, C. y Hurlbut, C.S., 1996. *Manual of Mineralogy Vol. 2.* John Wiley and Sons, New York.

Kokaly, R. F., Rockwell B. W., Haire S. L., King T. V., 2007. Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 106 (2007) 305–325

Kraus, Edward, Hunt, Walter y Ramsdell Lewis, 1965. *Mineralogía: una introducción al estudio de minerales y cristales*, quinta edición.

Kutiel, P., Shaviv, A., 1992. Effects of soil type. Plant composition and leaching on soil nutrients following a simulated forest-fire. *For. Ecol. Manag.* 53, 329–343.

Kutiel, P., Inbar, M., 1993. Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena* 20, 129–139.

Landsberg, J. J. And. Waring R. H., 1997. "A generalised model of forest productivity using concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning", *forest ecology and management.* 95: 209-228

Landon J. R., 1984, paperback ed. 1991. *Booker Tropical Soil Manual.* Booker Tate, Thame, U.K. (In U.S.A: Longman, New York).

Malagón, D.; C. Pulido; R. Llinás y C. Chamorro., 1995. *Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso.* IGAC. Bogotá. 632 p.

Marín García S. M., 2016. El papel del fuego en el repoblamiento de *Pinus Cembroides* Zucc. Tesis de Licenciatura. UNAM, FES Zaragoza.

Martín A., Díaz-Pertensivos M., Carballas T., 2012 La evolución a corto y medio plazo de las propiedades del suelo en los ecosistemas forestales atlánticos afectados por los incendios forestales *Tierra Degrad. Dev.*, pp. 427-439

Mataix-Solera, J., 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. PhD. Tesis, Universidad de Alicante, Alicante, Spain.

Mataix-Solera J., Guerrero C., 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas

Mataix-Solera J., Arcenogui, V., Tessler, N., Zornoza, R., Wittenberg, L., Martinez, C., Caselles, P., Pérez, B.A., Malkinson, D., Jordán, M.M., 2013. Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. *CATENA*: 108:6-13

Maycotte Carlos César., 2002. Radiación fotosintéticamente activa y propiedades físico-químicas en suelos forestales con y sin incendio *Madera y Bosques*, vol. 8, núm. 2, pp. 39-55, Instituto de Ecología, A.C. México

Mehra, O.P. y Jackson M.L., 1960. Iron oxide removal from soil and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and clays Min. 7th Conf.* 317-327.

Mejía, L., 1980a. Conceptos básicos comunes a la Pedología y Geomorfología. CIAF. Bogotá. 278.

Mejía, L., 1980b. La mineralogía del suelo y sus relaciones con la fertilidad. En: *Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. pp: 29-84.

Moir, Willian H., 1982. Fire history of the high Chisos, Big Bend National Park, Texas, *Southwestern Naturalist*. 27(1): 87-98.

Monger, C. H. and E. E. Kelly.. 2002. Silica minerals. pp. 611-635. In: J. B. Dixon y D. G. Schulze (eds.). Soil mineralogy with environmental applications. SSSA Book Series 7. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.

Mueggler, Walter F., 1976. Ecological role of fire in western woodland and range ecosystems. In: Use of prescribed burning in western woodland and range ecosystems: Proceedings of the symposium; 1976 March 18-19; Logan, UT. Logan, UT: Utah State University, Utah Agricultural Experiment Station: 1-9.

Navarro García G., Navarro García S., 2013. Química Agrícola. Química Del Suelo Y De Nutrientes Esenciales. Mundi-prensa. España ISBN: 978-84-8476-656-8. 30-33pp

Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Efolliott P.F., 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. Forest Ecology and Management, 122 (1999), pp. 51–71

Neary, D. G.; Ryan, K. C.; De Bano, L.F., 2005. Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol 4. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 250 p.

Nelson D.W., Sommers L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. D.L. Sparks (Ed.), et al., Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI 961–1010 pp.

NOM-021-RECNAT-2000, DIARIO OFICIAL, martes 17 de octubre de 2000. Proyecto de Norma Oficial Mexicana para el análisis de suelo. PROY-NOM-021-RECNAT-2000

Olsen S.R., Sommers L.E., 1982. Phosphorus. A.L. Page (Ed.), et al., Methods of Soil Analysis Part 2, Soil Science Society of America, Madison, WI 403–430 pp.

Peech, in Black., 1965. Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and microbiological proprieties, Agronomy Series no. 9, ASA , Madison, Wis, USA. p 914

Pompa Castillo E. F., 2015. Efecto de los incendios sobre la diversidad florística en el Bosque de pino piñonero en Cardonal, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. UNAM, FES Zaragoza. p 61

Quero, H.J., 1984. "La vegetación de las serranías de la cuenca alta del río de La Laja, Guanajuato", An. Inst. Biol. 53: 73-99.

Quintana J.R., Calab V., Morenoa A.M., Parra J.G., 2007. Effect of heating on mineral components of the soil organic horizon from a Spanish juniper (*Juniperus thurifera* L.) woodland. *Journal of Arid Environments* 71 (2007) 45–56.

Ressl, R. y Cruz I., 2012. Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. *CONABIO. Biodiversitas*, 100:12-13

Richards L. A., U.S. Salinity Laboratory Staff., 1954, Reprint 1969. *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. USDA Agriculture Handbook No. 60. U.S. Dept. Agric., Washington, D.C., U.S.A.

Rundel P.W., 1983. Impact of fire on nutrient cycles in Mediterranean-type ecosystems with reference to chaparral. In: Kruger F.J., Mitchell D.T., Jarvis J.U.M. eds, *Mediterranean-type Ecosystems: The Role of Nutrients*. Springer, Berlin, Germany, pp.192-207.

Rzedowski, J., 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. 432 p.

Rzedowski, J., 2006. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Shvidenko, A.Z y Nilsson, S., 2000. Extent distribution and ecological role of fire in Russian forest. En Kasischke E y Stocks B. Eds. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*, pp. 132-150, Springer-Verlag, New York.

Soil Laboratory Staff, Royal Tropical Institute., 1984. *Analytical methods of the Service Laboratory for soil, plant and water analysis. Part 1: Methods for soil analysis*. Royal Tropical Institute, Amsterdam, the Netherlands.

Soil Survey Staff, 2010. *Soil Taxonomy*, USDA. 10nd Edition Natural Resources Conservation Service, Washington D.C. Traduida al español.

Tavarez Espinosa, C. A., 2010. *Restauración ecológica del área afectada por incendio forestal en el predio "El Taray"*, Municipio de Arteaga, Coahuila. Consultores Asociados en Manejo de Ecosistemas Forestales S.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. FQ015. México D. F.

Thomas A., Walsh R., Shakesby R., 1999. Las pérdidas de nutrientes en el sedimento erosionado después de los incendios en los bosques de eucaliptos y pinos en el entorno mediterráneo húmedo del norte de Portugal *Catena*, 36, pp. 283-302

Trabaud, L. V., 1990. "Fire resistance of *Quercus coccifera* L. garrigue", en *Fire in ecosystem dynamics: Mediterranean and northern perspectives* (Goldammer, J. G. y Jenkins, M. J. coord.). The Hague, Edit. SPB Academic Publishing, 21-32

Tullis, J. 1983. Deformation of feldspars: In Ribbe, P.H. (Ed), *Feldspar Mineralogy. Reviews in Mineralogy*.2. Mineralogical society of America.297-323.

Úbeda X., Pereira P., Outeiro L., Martin DA., 2009. Efectos de la temperatura del fuego sobre las características físicas y químicas de las cenizas de dos parcelas de alcornoque (*Quercus suber*). *Tierra Degrad. Des.*, 20 (2009), pp 589-608

Ulery A.L., Graham R.C., Bowen L.H., 1996. Forest Fire Effects on Soil Phyllosilicates in California. *Soil Science Society of America Journal*, 60 (1996), pp. 309 a 315

USD, Soils Conservation Service., 1972, revised ed. 1982. *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. Soil Survey Investigatiton Report no. 1 U.S. Dept Agric, Washington, D. C. U.S.A.

Van Reeuwijk L.P., 1995. *Procedimientos para el análisis de suelos*. Ver.1995. Traducción de Gutiérrez Castorena M.C., Tavares Espinosa C.A. y Ortiz Solorio C.A. 1ª. ed. en español, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México. Pág.145

Vitousek P., Howarth RW. 1991. Limitación de nitrógeno en la tierra y en el mar: ¿Cómo puede ocurrir? *Biogeoquímica*, 13 (1991), pp. 87-115.

Walkley, A. and I. A. Black, 1947. "An examination of the degthareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic acid titration method", *Soil Science*, no. 37, pp. 29-38.

Wan S., Hui D., Luo Y., 2001. Fire effects on N pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis. *Ecological Applications*1349–1365 pp.

Wattez, J., Courty, MA, 1987. Morfología de la ceniza de algunos materiales vegetales. Micromorfología de suelos. En: (Eds.) Fedoroff, N., Bresson, LM, Courty, MA, Actas del VII Encuentro Internacional de Trabajo sobre suelo Micromorfología, París.

<http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Tech/5Conburn.htm#Bkg>

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

<http://www.usuarios.geofisica.unam.mx/Cecilia/cursos/GMinerales.html>