



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**Emergencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides* en condiciones postincendio**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**BIÓLOGA**

**PRESENTA:**

**SANDRA MONSERRAT BARRAGAN MARAVILLA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. EFRAÍN REYES ANGELES CERVANTES**

**PROYECTO PAPIIT IN221614**

**Ciudad de México, Septiembre, 2016.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por la oportunidad de formarme profesionalmente y brindarme un mundo universitario lleno de satisfacciones académicas y personales.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, por la beca otorgada para la realización de esta tesis, a través del proyecto titulado “Ecología del fuego en bosques de pino piñonero”, DGAPA-UNAM-IN221614.

Al Dr. Efraín Ángeles Cervantes, porque no solo ha sido mi asesor de tesis, sino que a través de sus conocimientos me ha enseñado el fascinante mundo de la ecología. Gracias por su amistad. Le aprecio y admiro.

Al M. en C. y futuro Doctor Enrique Suástegui Méndez, por su apoyo en la obtención de microfotografías, elaboración del mapa de la zona de estudio y sobre todo por las la asesoría en todo momento para mejorar esta tesis. Gracias por la gran amistad que me has brindado.

Al Dr. Carlos Castillejos y M. en C. Sonia Reyes, por sus enseñanzas durante la carrera, en las aulas y en campo. Gracias por sus recomendaciones para enriquecer este trabajo.

Al M. en C. German Calva por sus consejos y recomendaciones para mejorar esta tesis.

A la Dra. Carmen Gutiérrez por su asesoría y enseñanzas sobre morfología del suelo, aun cuando no existe un documento que lo solicite.

Al M. en C. Patricio Guzmán y laboratoristas: Pedro, Juanito y Mario por sus apoyo en la preparación de las muestras, que se realizaron en el taller de Génesis, Morfología y Clasificación de suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Al Dr. David Cibrián T. por apoyo en la identificación del patógeno que afectó a las plántulas.

A Gabriel Hernández por ayudarme en todo momento y bajo cualquier circunstancia para la realización de esta tesis.

A Sandra Marín, por compartir el trabajo de campo y laboratorio para la realización de nuestras tesis. Y por la gran amistad que creció en poco tiempo.

A Maleny Orozco y Mariana Chávez por su amistad y divertidos momentos en campo y fuera de la escuela.

Al futuro M. en C. Jonathan Hernández por sus consejos para mejorar este trabajo.

A Eduardo Pompa, Judith Hernández, Katherine Cruz y Belén Juárez, por su compañía y buenos momentos en campo.

A la familia de Don Luis, Doña Mary y a Martin por su generosidad, hospitalidad y amistad durante y después de las salidas a campo.

A mis amigos y compañeros: Jessi Flores, Erik Quintana, Carlos Toral, Miguel Martínez, Cesar Quintero, Oscar Chávez, Saúl Arias, Abigail Estañol, Daniela García, Ulises Romero, Isaac Ramos, Jonathan Salazar y Ángel Bordonave por aquellas experiencias compartidas en las aulas y en campo, de cada uno tengo gratos y chistosos recuerdos.

## DEDICATORIA

*A mis padres Leticia Maravilla y Fernando Barragan, porque los amo!. No tengo como agradecer todo lo que me han dado, por siempre estar para mí y mis hermanos sin importar cuál sea la situación. Gracias Mamí, ese "has de tu vida lo que quieras" me ha llevado a ser una bióloga muy feliz. Papi: gracias por siempre preocuparte por mí y apoyarme.*

*A mis hermanos Fer, Dani, Estebitan<sup>†</sup>, Pepe, Uri y Liz, los amo!, no importa que tan lejos estén o que dediciones tomen, sepan que siempre los llevo en mi corazón y que los apoyare en lo que pueda, claro que después de regañarlos.*

*A mis cuñadas y a mis sobrinos hermosos: Vale, Emily, Cristofer y Andrea, porque aunque son pequeños me enseñan que la felicidad está en un enorme abrazo y sus sonrisas.*

*A Gabriel Hernández por ser mi mejor amigo y compañero de vida, juntos hemos llegado muy lejos y vamos por más!. Gracias por tu apoyo incondicional, por los hermosos y divertidos momentos que hemos compartido, por motivarme a cumplir mis sueños, por el amor y cariño que me brindas, pero sobre todo por la enorme paciencia que me tienes. Te amo.*

*A Rosy Vallecillo y Alejandro Hernández, por su apoyo y cariño en todo momento.*

*A mis amigas Ari y Cris que desde CCH hemos estado juntas a pesar de la distancia.*

*A mis amiguitos Alexis Arellano, Alfonso Morales e Ing. Oscar Banda, por tantos años de amistad.*

*A esta vida tan bella...*

| <b>CONTENIDO</b>  | Pág. |
|---|------|
| CONTENIDO DE CUADROS .....  | vi   |
| CONTENDIO DE FIGURAS .....  | vii  |
| <b>RESUMEN</b> .....  | 1    |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | 2    |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....   | 4    |
| 2.1 <i>Pinus cembroides</i> Zucc. ....  | 4    |
| 2.2 Germinación y emergencia .....  | 5    |
| 2.3 Concepto de desarrollo y crecimiento .....  | 7    |
| 2.4 Índices de calidad de plantas .....   | 7    |
| 2.5 Estudios sobre caracteres morfológicos e índices de calidad en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> ..... | 8    |
| 2.6 Incendios forestales .....  | 10   |
| 2.7 Efecto de los incendios sobre la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas .....  | 10   |
| 2.8 Efecto del fuego en las propiedades hídricas y físicas del suelo .....                                    | 11   |
| <b>3. HIPÓTESIS</b> .....   | 17   |
| <b>4. OBJETIVOS</b> .....   | 18   |
| OBJETIVOS PARTICULARES .....  | 18   |
| <b>5. MÉTODO</b> .....  | 19   |
| 5.1 Zona de estudio .....   | 19   |
| 5.1.1 Sitios de muestreo .....  | 20   |
| 5.2 Evaluación de las propiedades hídricas y físicas del suelo postincendio ....                              | 22   |
| 5.2.1 Hidrofobicidad .....  | 22   |
| 5.2.2 Infiltración .....  | 22   |
| 5.2.3 Densidad aparente y porcentaje de humedad .....   | 23   |
| 5.2.4 Análisis morfológico del suelo (estructura y porosidad) .....   | 23   |
| 5.2.5 Capacidad de retención de agua disponible .....   | 24   |
| 5.3 Recolecta y selección de semillas de <i>Pinus cembroides</i> .....  | 25   |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.4 Evaluación de germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio ..... | 25        |
| 5.5 Evaluación del crecimiento de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> Zucc. en suelos postincendio .....                      | 26        |
| 5.6 Análisis estadístico .....   | 28        |
| <b>6. RESULTADOS</b> .....   | <b>29</b> |
| 6.1 Propiedades hídricas y físicas en suelos postincendio.....   | 29        |
| 6.1.1 Hidrofobicidad.....  | 29        |
| 6.1.2 Infiltración .....   | 29        |
| 6.1.3 Densidad aparente y porcentaje de humedad .....  | 30        |
| 6.1.4 Estructura y porosidad del suelo .....   | 30        |
| 6.1.5 Capacidad de retención de agua .....   | 31        |
| 6.2 Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> , en suelos postincendio .....             | 37        |
| 6.2.1 Germinación.....   | 38        |
| 6.2.2 Emergencia.....  | 39        |
| 6.2.3 Supervivencia .....  | 40        |
| 6.3 Crecimiento de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....  | 42        |
| <b>7. DISCUSIÓN</b> .....  | <b>48</b> |
| 7.1 Efecto de los incendios en las propiedades hídricas y físicas de los suelos  | 48        |
| 7.2 Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio .....               | 51        |
| 7.3 Supervivencia y crecimiento de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> .....  | 52        |
| <b>8. DISCUSIÓN GENERAL</b> .....  | <b>56</b> |
| <b>9. CONCLUSIONES</b> .....   | <b>57</b> |
| <b>10. LITERATURA CITADA</b> .....   | <b>58</b> |

## CONTENIDO DE CUADROS

| Cuadro   | Pág. |
|--|------|
| 1. Características y valores óptimos de los índices de calidad de planta.....  | 9    |
| 2. Clasificación del tiempo de penetración de una gota de agua (WDPT) .....  | 12   |
| 3. Clases de infiltración .....  | 13   |
| 4. Hidrofobicidad en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....                             | 29   |
| 5. Infiltración en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....                               | 29   |
| 6. Densidad aparente y porcentaje de humedad en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo ..... | 30   |
| 7. Estructura y porosidad del suelo en sitios postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....           | 35   |
| 8. Caracteres morfológicos de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio de Cardonal, Hidalgo.....        | 43   |
| 9. Índices de calidad de plantas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio de Cardonal, Hidalgo .....              | 44   |



## CONTENDIO DE FIGURAS

| Figura   | Pág. |
|--|------|
| 1. Localización del cerro “La Soledad”, Cardonal, Hidalgo .....  | 19   |
| 2. Sitios de muestreo en el cerro “La Soledad”, Cardonal, Hidalgo .....  | 21   |
| 3. Evaluación de hidrofobicidad con el método WDTP en campo .....  | 22   |
| 4. Procedimiento de análisis morfológico y de porosidad del suelo. ....  | 24   |
| 5. Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....                               | 27   |
| 6. Muestras de secciones delgadas de suelos afectados por incendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....                     | 34   |
| 7. Fotomicrografías de suelos afectados postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....                                   | 36   |
| 8. Porcentajes obtenidos de las curvas de retención de humedad de suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo. .... | 37   |
| 9. Porcentaje total de germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....           | 38   |
| 10. Velocidad de germinación de semillas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....  | 39   |
| 11. Porcentaje de emergencia de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....   | 40   |
| 12. Mortalidad de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> por <i>Fusarium sp.</i> , en suelos postincendio.....                                 | 41   |
| 13. Índice de robustez en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....   | 45   |
| 14. Relación biomasa seca aérea-radical en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....                                  | 46   |
| 15. Índice de calidad de Dickson en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....   | 46   |
| 16. Índice de lignificación en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....  | 47   |
| 17. Capacidad de almacenamiento de agua en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....                                  | 47   |
| 18. Diagrama de las características de sitios afectados por incendio, en un bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.....                 | 50   |
| 19. Altura aérea y longitud radical de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> en suelos postincendio.....                                      | 55   |

## RESUMEN

Los bosques de piñón-junípero, en el municipio de Cardonal, Hidalgo, fueron afectados por incendios de diferente severidad. La supervivencia de plántulas y de individuos en reforestaciones es nula, y se desconoce el efecto de los incendios sobre las propiedades del suelo en estos bosques. Por lo que surgieron las siguientes preguntas: ¿Los incendios superficiales, de copa y copa severo modifican las propiedades hídricas y físicas de los suelos Leptosoles cálcicos?, ¿Las propiedades hídricas y físicas de los suelos postincendio afectan la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides*? y ¿A mayor severidad de incendios habrá menor crecimiento de plántulas?. Se seleccionó un sitio no afectado (NA), y tres afectados: por incendio superficial (AIS), de copa (AIC) y copa severo (AICS). En cada sitio se registró la hidrofobicidad, infiltración, densidad aparente, porcentaje de humedad del suelo y se realizó un análisis de estructura y porosidad. Se recolectaron muestras de suelo de cada sitio y se obtuvo la capacidad de agua disponible para las plántulas. Además, cada muestra se colocó en charolas de germinación (una por sitio), en las que se sembraron semillas de *P. cembroides* (4 repeticiones de 10 semillas en cada suelo). El crecimiento de las plántulas se evaluó con caracteres morfológicos e índices de calidad de plantas. Los resultados mostraron que: el incendio superficial y de copa forman microagregados y aumentan el porcentaje de mesoporos, disminuye la hidrofobicidad superficial y la infiltración; y que los incendios de copa severo también forman microagregados, y además generan equilibrio entre los diferentes tamaños de poros. Los incendios generan cambios en la estructura y porosidad del suelo, lo que favorece la disponibilidad de agua para la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides*, A mayor severidad de incendios, el crecimiento en altura aérea, biomasa seca total y capacidad de almacenamiento de agua es mayor.

**Palabras clave:** hidrofobicidad, incendios, micromorfología, piñonero, sustratos

## 1. INTRODUCCIÓN

En México se registran cada año un promedio de ocho mil incendios forestales (SEMARNAT-CONAFOR, 2013) y tan solo en el año 2011 poco más de 230 ha de bosque de piñón-junípero fueron afectadas por un incendio de diferente severidad.

Shvidenko y Nilsson (2000), mencionaron que los incendios pueden ser constructivos o destructivos. Para plántulas de coníferas, Johstone y Chapin III (2006) indicaron que generan condiciones favorables para el establecimiento, supervivencia y crecimiento; mientras que Méndez-Hernández (2009) mencionó que pueden impedir la germinación, el establecimiento y la supervivencia. Sin embargo, estos efectos se desconocen en el bosque de piñón-junípero, además de los cambios en las propiedades del suelo.

Tras un incendio se inician las reforestaciones; no obstante, sólo 40% de las áreas reforestadas en México cuentan con un nivel aceptable de supervivencia y calidad. El problema radica en que se produce cantidad y no calidad (Wightman y Cruz, 2003). La falta de éxito puede estar relacionada con el tipo de plántulas que se utilizan, ya que en la mayoría de los casos no son nativas de la zona o son producidas en vivero bajo condiciones óptimas (evaluadas con índices de calidad de plantas); y no se pueden adaptar a condiciones severas en un sitio alterado por algún factor eventual. En la recuperación de los bosques perturbados, ya sea por siembra directa de semillas o plántulas cultivadas en vivero, el agua es el principal factor limitativo (Gutiérrez *et al.*, 2015), ya que está directamente relacionada con la germinación, crecimiento y supervivencia de plántulas. Sandoval *et al.* (2001) documentaron que el crecimiento y supervivencia de las plántulas depende del contenido hídrico del suelo.

Después de un incendio, el suelo cambia sus propiedades hídricas y físicas como la hidrofobicidad, infiltración, estructura y porosidad (Certini, 2005); las cuales están relacionadas con la disponibilidad de agua para la germinación, supervivencia y crecimiento de las plántulas.

Las interrogantes de esta investigación son:

- ¿Los incendios superficiales, de copa y copa severo modifican las propiedades hídricas y físicas de suelos Leptosoles cálcicos?
- ¿Las propiedades hídricas y físicas de los suelos postincendio afectan la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides*?
- ¿A mayor severidad de incendios habrá menor crecimiento de plántulas?

Las respuestas a estas interrogantes, permitirá conocer las condiciones edáficas postincendio, y su efecto sobre el reclutamiento de plantas de *Pinus cembroides*, lo que brindará información para generar estrategias de reforestación de sitios afectados por incendio de diferente severidad, en este tipo de comunidades.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 *Pinus cembroides* Zucc.

*Pinus cembroides* Zucc pertenece al grupo de pinos piñoneros y se considera una especie muy adecuada para reforestar zonas áridas, semiáridas y zonas muy erosionadas (Ángeles-Cervantes, 1984). El principal beneficio económico que brinda es su semilla comestible (piñón), de alto valor comercial (Morales-Bautista, 2013); ya que su precio va de los \$ 1500 a \$ 1900 pesos por kilogramo en nuestro país.

Es un árbol perennifolio, de copa redondeada, con altura de cinco a diez metros y diámetro a la altura del pecho de 30 a 70 cm. Su follaje es de color verde oscuro, algo azulado. Las acículas se encuentran en grupos de dos a tres, miden de 2.5 a 10 cm de longitud. Es monoico; sus conos femeninos son sub-globosos de 5 a 6 cm de ancho (maduran de noviembre a diciembre), con escamas grandes y gruesas.

Sus semillas son desnudas, subcilíndricas ligeramente triangulares (10 mm de longitud), pardas o negruzcas, sin alas, por lo que las aves y roedores son sus principales dispersores y consumidores (Vázquez *et al.*, 1999). La producción de semillas comienza entre los 10 y 20 años de edad, pero ocurre cada 3 años, dependiendo de las condiciones climáticas (Carrillo-Flores, 2009).

Según Rzedowski (2006) *P. cembroides* es una especie ampliamente distribuida en climas semiáridos, en altitudes desde 1500 a 3000 m y con precipitaciones entre 350 a 700 mm en promedio anual. Los estados en que se distribuye son: Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Jalisco, Nuevo León, Querétaro, Puebla, Veracruz e Hidalgo.

Para *P. cembroides* la mortalidad por depredación está relacionada con la dispersión, ya que la relación semilla-dispersor-consumidor implica ventajas y desventajas para la sobrevivencia de las semillas, dado que el acarreo, almacenamiento y rompimiento de la cubierta puede resultar (si la almendra no es consumida) en una situación ventajosa para favorecer la germinación y con ello la regeneración natural del bosque (Fernández y Johnston, 2006). Las aves son las

principales dispersoras-consumidoras de esta especie, entre las que se encuentran *Alphelocoma coerulescens*, *A. ultramarina* y *Corvus corax*. Algunos roedores como *Peromyscus difficilis*, *P. maniculatus* y *Neotoma mexicana* también participan en estos procesos (Romero *et al.*, 1996).

Los suelos donde se desarrolla *P. cembroides* principalmente son Leptosoles, Regosoles, Rendzinas y Feozem; con textura que va de arenociloso a migajón-arenoso y, estructura granular (Vázquez *et al.*, 1999).

## **2.2 Germinación y emergencia**

### *a) Germinación*

Kucera *et al.* (2005) consideraron que la germinación es un proceso que comienza con la toma de agua por imbibición de las semillas (viables o no), y culmina con la ruptura de la cubierta seminal y la salida de la radícula; mientras Salisbury (1992), indicó que se inicia con la imbibición y termina cuando la radícula o cotiledones (en algunas semillas) se alargan o emergen de la cubierta de la semilla.

El proceso de germinación consta de tres fases: imbibición, activación del metabolismo y emergencia. La fase I depende de la composición de la semilla, la permeabilidad de la cubierta y la disponibilidad de agua (Mc Donald, 2010). Además, es necesaria para la rehidratación de proteínas y organelos celulares, así como para el transporte activación de las reacciones hidrolíticas. En la fase II ocurre la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas e incrementan las actividades enzimáticas, así como la degradación inicial de las reservas. En la fase III tiene lugar la emergencia de la radícula (crecimiento visible) con lo que concluye este proceso (Herrera *et al.*, 2006).

Los requerimientos esenciales para la germinación son agua, oxígeno y temperatura; además de factores internos (propios del embrión) y externos (ambientales). No obstante, cualquiera de los dos o su relación determinan si una semilla germina en cierto lugar o no (Bewley *et al.*, 2013).

Algunos otros factores son: impermeabilidad al agua y/o gases, resistencia mecánica, presencia de inhibidores, fotosensibilidad, dormancia, latencia, termoperiodicidad. Así mismo, bajo condiciones naturales, la forma de dispersión

y depredación juegan un papel importante (Fernández y Johnston, 2006), así como las estrategias de la especie para tal proceso, las cuales están relacionadas con los problemas ecológicos de sus hábitats (Raven, 1992).

En los estudios sobre la germinación de *P. cembroides*, se han probado factores como el efecto de la temperatura, luz, humedad y diferentes sustratos. La CONAFOR (2015) reportó un porcentaje de 60 a 90% de germinación con velocidad promedio de germinación de 17 días.

Por otra parte, Cetina y Sánchez (1989b) indicaron que a una temperatura de 20°C se alcanza 89.4% de germinación y velocidad de germinación de 13 días. No obstante, cuando se considera la intensidad de luz (100%), la germinación incrementa hasta 96.8% (Cetina y Sánchez, 1989a).

Otro factor relevante son los sustratos; por ejemplo, en mezclas con 75% *Peat most* + 25% de tierra lama +polímero+ riego ilimitado, Sandoval *et al.* (2001) obtuvieron 81% de germinación para esta especie de pino.

#### *b) Emergencia*

La emergencia depende de las características fisiológicas y bioquímicas de la semilla, principalmente de su relación con el ambiente y la eficiencia al usar sus reservas (Celis *et al.*, 2010). Comprende desde la ruptura de la cubierta hasta la aparición de la nueva plántula sobre el suelo, la cual tiene capacidad fotosintética. También puede considerarse como el crecimiento del embrión que implica un aumento significativo de peso fresco, y cambios en el metabolismo de las plántulas (Kucera *et al.*, 2005).

El tipo de emergencia depende del tipo de semilla, donde quedan los cotiledones y donde el embrión se alarga (Fernández y Johnston, 2006). En el caso de *P. cembroides* la emergencia es epigea. Posteriormente comienza el desarrollo y crecimiento de las plántulas, en donde las tasas de crecimiento (resultado del genotipo y el ambiente) traen consecuencias ecológicas en la regeneración natural de las poblaciones, así como implicaciones evolutivas.

### **2.3 Concepto de desarrollo y crecimiento**

El desarrollo involucra dos procesos básicos: el crecimiento y la diferenciación. El crecimiento es el incremento irreversible en tamaño y volumen, que incluye alargamiento y expansión celular; sin embargo para que esto ocurra, es necesario que las células se especialicen y lleguen a ser estructural y funcionalmente diferentes, proceso que se llama diferenciación (Azcoa y Talon, 2008).

Los principales factores internos que regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas son químicos, en los que están involucradas las hormonas de crecimiento; sin embargo, se requieren de condiciones ambientales para regular sus actividades metabólicas. Algunos de estos factores son: luz, temperatura, oxígeno, macro y micronutrientes del suelo y agua. Este último es el principal factor limitativo en condiciones naturales (Raven, 1992; Gutiérrez *et al.*, 2015); y también influye en la distribución, abundancia, crecimiento y supervivencia (Mari y Galassi, 2010).

### **2.4 Índices de calidad de plantas**

Los índices de calidad de planta se utilizan para evaluar el crecimiento de plantas forestales producidas en viveros, y para estimar el porcentaje de supervivencia al ser trasplantados en campo.

El criterio de “calidad de la planta”, según Duryea (en 1985, citado por Villar en el 2003) se define como aquella planta que es capaz de alcanzar un desarrollo (supervivencia y crecimiento) óptimo en un medio determinado y, por tanto, puede cumplir con los objetivos establecidos en un plan de restauración. La calidad de una planta cambia con el tiempo y es la resultante de cuatro componentes: 1) calidad genética, 2) morfología, 3) fisiología y 4) estado sanitario.

Morfológicamente, la calidad de una planta se refiere al conjunto de caracteres cualitativos o cuantitativos sobre la forma y estructura de la planta o alguna de sus partes (Villar, 2003).

Algunos caracteres cualitativos son la presencia de daño por plaga, el desarrollo del sistema radical fibroso o deformaciones radicales, color del follaje,



tallos múltiples o enfermedades por hongos. Los caracteres cuantitativos suelen ser el tamaño o peso de alguna parte de la planta o su relación entre ellas, como:

1. Altura que influye en la capacidad fotosintética y crecimiento (se mide desde el cuello de la raíz hasta la yema apical);
2. Diámetro del cuello de la raíz, define la robustez del tallo, plantas con diámetro <5 mm soportan mejor los daños causados por animales e insectos;
3. Biomasa, se ha determinado una correlación entre el peso de una planta y la supervivencia en campo, considerando un equilibrio entre la parte aérea y la raíz) (Thompson, 1985; citado en Rodríguez, 2008).

De acuerdo con varios autores (Gutiérrez *et al.*, 2015; Olivo y Buduba, 2006; Gonzáles *et al.*, 2005), los índices que más se utilizan para la evaluación de calidad de plantas son el Índice de Robustez (IR), índice de calidad de Dickson (ICD), que involucra la relación de biomasa seca de la parte aérea y de la parte radical (BSA/BSR) y el índice lignificación (IL). Las características de cada uno se explican en el cuadro 1.

## **2.5 Estudios sobre caracteres morfológicos e índices de calidad en plántulas de *Pinus cembroides***

Los estudios de germinación, supervivencia y crecimiento de plántulas realizados con esta especie se basan en el mejoramiento de su producción en vivero.

Según la CONAFOR (2015) en su revista electrónica de divulgación científica forestal, con contribución de José Prieto, algunas plántulas del género *Pinus* producidas en vivero (10 a 12 meses de edad), son de calidad cuando tiene valores de 13 a 25 cm de altura, diámetro al cuello de  $\geq 4.0$  mm, un índice de robustez <6 y relación biomasa parte aérea/raíz de 1.5 a 2.5.

Otros autores documentaron que la altura promedio de plántulas de *Pinus cembroides* en sustratos con alto contenido de materia orgánica, uso de un polímero y riego ilimitado fue de 8.47 y 12.51 cm a cuatro meses de cultivo, y la biomasa seca total fue 0.3 a 0.61 g (Sandoval *et al.*, 2001).

Por otra parte, Lima-Rojas (2008) registró a los cinco meses una altura promedio de 7.97 cm; y posteriormente, al inocular la raíz con *Pisolithus tinctorius* fue de 10.85 cm después de cuatro meses de cultivo. En cuanto al diámetro, en

promedio obtuvo 2.64 mm sin el hongo y 4.14 mm con raíz inoculada. Después de una semana de inocular la raíz, registró en promedio una biomasa seca aérea de 0.4 g; mientras que sin la micorriza fue de 0.35 g. La autora concluyó que estos parámetros morfológicos no muestran diferencias significativas por efecto del hongo.

En plántulas de *Pinus cembroides* var. *cembroides* Zucc (González *et al.*, 2005) obtuvieron un valor promedio de 2.56 para el índice de vigor y 0.227 ICD en plántulas de 12 meses de edad.

Cuadro 1. Características y valores óptimos de los índices de calidad de planta

Elaborado con datos de Sáenz *et al.* (2014), Prieto (2004), Muñoz *et al.* (2014) y González *et al.* (2005).

| Índice o relación   | Fórmula  | Valor óptimo | Atributos de respuesta   |
|---|--|--------------|--|
| Índice de robustez (IR)                                       | $\frac{\text{altura aérea (cm)}}{\text{diámetro (mm)}}$  | $\leq 6$     | Determina la proporción de crecimiento entre altura y diámetro, un valor inferior indica plántulas más vigorosas; aptas para sitios con limitación de humedad.   |
| Relación biomasa aérea seca-biomasa seca de la raíz (BSA/BSR) | $\frac{\text{peso seco aéreo (g)}}{\text{peso seco radical (g)}}$                                  | 1            | Determina el equilibrio de producción de biomasa aérea y de la raíz.   |
|   |  | $< 1$        | Determina que la biomasa de la raíz es mayor que la aérea.   |
|   |  | $> 1$        | Establece que la biomasa aérea es mayor que la biomasa de la raíz  |
|   |  | 1.5 y 2.5    | Es el valor máximo y óptimo de la relación de biomasa.   |
|   |  | $> 2.5$      | Indica desproporción y que el sistema radical es insuficiente para proveer la parte aérea  |
| Índice de calidad de Dickson (ICD)                            | $\frac{\text{peso seco total (g)}}{\frac{\text{peso seco aéreo (g)}}{\text{IR} + \text{BSA/SSR}}}$ | $\leq 1$     | Expresa el equilibrio de la distribución de la biomasa y robustez, ya que evita seleccionar plántulas desproporcionadas.   |
| Índice de lignificación (IL)                                  | $\frac{\text{Peso total seco (g)}}{\text{Peso total húmedo (g)}} (100)$                            | % más alto   | Es el% de la relación biomasa total seca-biomasa total húmeda. Expresa el pre-acondicionamiento (bajo estrés hídrico) que sufren las plántulas, contribuye a reducir el crecimiento en altura y diámetros, pero promueve la resistencia a sequías heladas. |

## **2.6 Incendios forestales**

Se entiende por incendio forestal a la ocurrencia y propagación del fuego no controlado que afecta selvas, bosques y vegetación de zonas áridas y semiáridas (Cedeño, 1999, citado en Villers y López, 2004). Desde el punto de vista ecológico, es una perturbación que resulta en la pérdida de individuos o biomasa y que se produce de forma súbita o episódica (Lloret, 2004).

### *Tipos de incendios forestales*

La CONAFOR (2010), clasifica a los incendios en tres tipos (de acuerdo con la severidad):

- 1) Incendios subterráneos. Estos incendios ocurren cuando el fuego se propaga por debajo del suelo. La materia orgánica acumulada y las raíces llegan a quemarse, e incluso puede alcanzar los afloramientos rocosos. Generalmente no produce llamas y emiten poco humo.
- 2) Incendios superficiales. El fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del suelo; afecta combustibles vivos y muertos (hierbas, ramas, hojarasca, etc.); pueden alcanzar hasta un metro y medio de altura.
- 3) Incendios de copa. Los incendios de este tipo son los más destructivos y difíciles de controlar, debido a que el fuego consume toda la vegetación. Comienza de forma superficial y posteriormente se propaga por continuidad vertical hacía la copa de los árboles.

En el año 2016, hasta el 10 de marzo, la CONAFOR (2016) registró una superficie afectada por incendios severos de 598.32 ha, 6 379 ha para incendios moderados y 22 390.02 ha afectadas por incendios de baja intensidad.

## **2.7 Efecto de los incendios sobre la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas**

Shvidenko y Nilsson, (2000) mencionaron un efecto dual de los incendios, estos pueden ser constructivos o destructivos, ya que pueden favorecer la regeneración natural de los bosques y su mantenimiento, o bien, impedir la germinación, el establecimiento y supervivencia de plántulas.

Cuando el efecto es negativo disminuye la emergencia de plántulas, Vega *et al.* (2004) registraron 80% de emergencia de plántulas de *Pinus pinaster* en suelos afectados con severidad de fuego alta, mientras que en suelos no afectados se acercó al 100%. Daskalokou y Thanos, (2010) para cinco zonas quemadas en Grecia, encontraron que la emergencia de plántulas de *Pinus halepensis* fue en promedio de 2.3 a 4.6 plántulas·m<sup>-2</sup> en el primer año y al tercer año disminuyó de 1.5 a 3.1 plántulas·m<sup>-2</sup>. En Argentina, tras 14 años del incendio no se registró regeneración de plántulas de ciprés a causa de la falta de banco de semillas (Gobbi y Sancholuz, 1992).

En el cerro de “La Soledad”, municipio de Cardonal, Hidalgo, Marín-García (2016) encontró nulo repoblamiento de plántulas de *P. cembroides* en los afectados por incendios de mayor severidad, después de cuatro años del incendio.

Cuando el efecto es constructivo, se ha observado que la germinación no se ve afectada por los incendios; sin embargo resultan benéficos para el establecimiento, supervivencia y crecimiento (Johstone y Chapin III, 2006). En otro estudio Méndez-Hernández (2009) menciona que los incendios incrementan la densidad de plántulas y la supervivencia de *Pinus canariensis* a corto plazo.

## **2.8 Efecto del fuego en las propiedades hídricas y físicas del suelo**

El suelo es un cuerpo natural trifásico, que por sus factores formadores resulta en una compleja variabilidad de texturas, estructuras, y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2015). Ecológicamente es un transformador de energía, reciclador de nutrientes, purificador del agua; que además, proporciona anclaje, nutrimentos y agua a las plantas para su crecimiento (Khan, 2013).

Los incendios modifican las propiedades de los suelos, cuyos cambios dependerán de la intensidad, duración y frecuencia del fuego (Flannigan *et al.* 2000). Tras un incendio se incrementa el riesgo de erosión la escorrentía y la sedimentación (Ubeda y Sala, 1996); además, se modifica la infiltración y se genera hidrofobicidad (DeBano, 2000).

El crecimiento de las plantaciones forestales está relacionado con la disponibilidad de agua (Sandoval *et al.*, 2001; Gutiérrez *et al.*, 2015 y Pichardo-

Arriaga, 2012), por lo tanto, es importante considerar las propiedades hídricas y físicas debido a que determinan la capacidad del suelo para transmitir, conducir y almacenar agua; son responsables del flujo hídrico pluvial hacia aguas subterráneas (Lipiec, *et al.* (2009). Estos mismos autores mencionan que las propiedades hídricas son: la conductividad hidráulica y el potencial de flujo mátrico, tasa de infiltración, tamaño y distribución de poros, retención de humedad y, propiedades físicas como la densidad aparente y textura del suelo.

### a) Hidrofobicidad

También se le llama persistencia de la repelencia al agua. La hidrofobicidad se forma a partir de una sustancia cerosa derivada del material de una planta después de un incendio (Cerdeja y Doerr, 2008), o se encuentra de forma natural por la acumulación de materia orgánica y la producción de sustancias cerosas de las raíces (Zavala *et al.*, 2014). Los suelos con esta característica reducen su capacidad de infiltración de agua (USDA, 2001). Además, depende de la textura y humedad, el tipo y cantidad de materia orgánica, los gradientes de temperatura en el suelo mineral y la gravedad del incendio; pero puede disminuir con el tiempo si el suelo está expuesto a humedad (Neary *et al.*, 2009).

El método *Water Drop Penetration Time* (WDTP) es utilizado para clasificar la repelencia al agua y fue descrito por Dekker y Jungerius en 1990; sin embargo Duque *et al.*, 2004, utilizó estos criterios para proponer la clasificación que se muestra en el cuadro 2.

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

| Segundos | Clase | Nivel de repelencia al agua    |
|----------|-------|--------------------------------|
| < 5      | 0     | No repelente (NR)              |
| 50-60    | 1     | Ligeramente repelente (LR)     |
| 60-600   | 2     | Fuertemente repelente (FR)     |
| 600-3600 | 3     | Severamente repelente (SR)     |
| >3600    | 4     | Extremadamente repelente (EXR) |

Los suelos no afectados bajo bosque de pino en España con cobertura arbórea mostraron hidrofobicidad extremadamente repelente. En suelos bajo el dosel de arbustos y vegetación herbácea fue ligera y fuertemente repelente respectivamente (Zavala *et al.*, 2014). En Alemania Butzen *et al.* (2015) encontraron que los suelos bajo bosque de coníferas tienen hidrofobicidad fuerte, relacionada con la capa de humus en esos suelos de tipo Cambisol.

## b) Infiltración

Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo (Maderey, 2005). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA (por sus siglas en inglés) en 2001 generó una clasificación, misma que se muestra en el cuadro 3.

En Andosoles se ha documentado una disminución de la infiltración en sitios afectados por incendios bajo bosque de coníferas (Ángeles-Cervantes 2010; Aviña-Hernández, 2015).

Cuadro 3. Clases de infiltración

| (mm·h <sup>-1</sup> ) | Clases               |
|-----------------------|----------------------|
| >508                  | Muy rápida           |
| 152.4 a 508           | Rápida               |
| 50 a 152.4            | Moderadamente rápida |
| 152.4 a 5.0           | Moderada             |
| 5.0 a 15.24           | Moderadamente lenta  |
| 1.524 a 5.0           | Lenta                |
| 0.038 a 1.524         | Muy lenta            |
| < a 0.038             | Impermeable          |

## c) Densidad aparente y porcentaje de humedad

Se define como la relación de la masa del suelo entre el volumen total del mismo, se utiliza principalmente para calcular la porosidad total del suelo y en estudios de relación suelo-agua (Forsythe y Díaz, 1969, citado en Alvarado y Forsythe, 2005). Además es un indicador de la estabilidad del suelo y del crecimiento de las plantas (Florencia, 2010).

Existe una relación entre la densidad aparente y la porosidad, valores por debajo de  $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  indican una condición porosa del suelo; por el contrario si los valores de densidad son altos, indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, reducción de la aireación y cambios poco favorables en la tasa de infiltración (FAO, 2009).

En bosques de coníferas afectados por incendio, se ha encontrado un ligero incremento en la densidad aparente. Por ejemplo en Andosoles afectados por incendio superficial, incendio moderado y de copa severo fue de  $0.81 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $0.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $0.72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  respectivamente; mientras que para un bosque no afectado es de  $0.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Ángeles-Cervantes, 2010). Al respecto, en suelos de tipo Permafrost, Johstone y Chapin III (2006) reportaron valores de  $0.13$  a  $0.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en la parte no afectada y de  $0.38$  a  $0.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para los sitios afectados por incendio (en cinco sitios de EE.UU., Cánada y Alaska). Estos autores también encuentran una relación indirectamente proporcional con respecto al contenido de humedad del suelo y la densidad aparente. Ángeles-Cervantes (2010) encontró que bajo bosque de oyamel afectado por incendio superficial, de copa moderado y copa severo la humedad es de 57.35%, 64.07% y 56.68% respectivamente; mientras que en suelos sin perturbación es de 60.12%.

#### **d) Morfología del suelo (estructura y porosidad)**

Los poros del suelo son importantes para las plantas. El movimiento del agua, la capacidad de retención y su disponibilidad dependen de su tamaño, distribución, continuidad y porcentaje dentro del perfil (López, 2000). El espacio poroso se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos, sino por agua o aire.

Bullock *et al.* (1985) distingue tres tipos de poros: macroporos ( $\geq 500 \mu\text{m}$ ), mesoporos ( $50\text{-}500 \mu\text{m}$ ) y microporos ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ). Los poros más grandes no retienen agua contra la fuerza de gravedad y su papel es drenar y airear el suelo; en los mesoporos se lleva a cabo la penetración de raíces, y los microporos están implicados en la retención y circulación del agua, aire y nutrimentos disponibles para las plantas (FAO, 2015).

Una reducción de la porosidad del suelo afectará desfavorablemente la aireación y la capacidad de infiltración de agua; así mismo dificultará la penetración de raíces. La porosidad de un suelo se puede medir en forma directa suponiendo que es igual a la humedad de saturación y que son suelos con porosidad conectada (Flores y Alcalá, 2010).

Otro método para medir la porosidad y observar los componentes del suelo es el análisis morfológico, que a través de secciones delgadas (obtenidas de muestras inalteradas de suelo), se pueden describir e interpretar *in situ* tipos de poros y agregados, factores formadores de suelos, actividad microbiológica, entre otros, (Gutiérrez y Ortiz, 1999). Actualmente, las secciones delgadas, se utilizan para evaluar los efectos de factores ecológicos en disturbios como la degradación del suelo en terrenos abandonados y reforestados (Aviña-Hernández, 2015), y propiedades hídricas del suelo (Hernández-Ordoñez, 2014).

Bajo bosques de coníferas se han registrado porcentajes de porosidad variables, así como tipos de poros y agregados diversos. En el parque Nacional Cofre de Perote, Aviña-Hernández (2015), reportó 40% de porosidad, principalmente poros de tipo cavidad y canales, con agregación de tipo pedalmigajosa.

En Villa del Carbón Hernández-Ordoñez (2014), en suelos bajo bosque de *Quercus* sp. registró poros de empaquetamiento compuesto y 52.36% de porosidad superficial, con agregados de tipo migajoso, granular y bloques subangulares.

En suelos bajo bosque de Oyamel la porosidad total es de 49.60%; mientras que en sitios afectados por incendio superficial, copa moderado y copa severo reportó agregados carbonizados y porosidad total de 35.08%, 46.11% y 43.73%, respectivamente (Ángeles-Cervantes, 2010). El autor menciona que el incendio superficial aumenta el tamaño de los agregados; mientras que los incendios de mayor severidad los desintegran.



### **e) Capacidad de retención de humedad**

El contenido de agua es el componente elemental que influye en la estructura del suelo, su importancia radica en la solución y la precipitación de minerales, y sus efectos en el crecimiento de las plantas (FAO, 2015).

Las curvas de retención de humedad expresan la relación entre el potencial matricial y el contenido de agua en un suelo por distintas fuerzas que determinan su potencial hídrico, expresado en unidades de presión. El rango de potenciales matriciales en el que se determina la curva va desde 0 kPa (saturación) hasta aproximadamente -106 kPa en suelo seco (Flores y Álcala, 2010). En suelos afectados por incendio estas curvas no se han determinado.

Con base en lo anterior, se plantean las siguientes hipótesis

### **3. HIPÓTESIS**

- A mayor severidad de incendios, mayor será la modificación de las propiedades hídricas y físicas del suelo.
- Si los incendios generan una capa hidrófoba en la superficie del suelo entonces la infiltración y humedad disponible para la germinación, emergencia y supervivencia de plántulas será menor
- A mayor severidad de incendios el crecimiento de las plántulas será menor.

#### **4. OBJETIVOS**

- Evaluar como la severidad de los incendios modifica las propiedades físicas e hídricas de suelos forestales y su influencia en la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides*

#### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar el efecto de los incendios: superficial, incendio de copa e incendio copa severo sobre las propiedades hídricas y físicas del suelo.
- Evaluar la germinación, emergencia y supervivencia de plántulas en suelos de sitios afectados por incendio de diferente severidad.
- Evaluar el crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos de sitios afectados por incendio superficial, incendio de copa e incendio de copa severo.

## 5. MÉTODO

### 5.1 Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el cerro “La Soledad”, que se ubica en el municipio de Cardonal, al noroeste del estado de Hidalgo (Figura 1); se localiza en las coordenadas 99° 07’ 28” y 99° 05’ 44” Longitud Oeste, 20° 37’ 11” y 20° 37’ 56” latitud Norte.

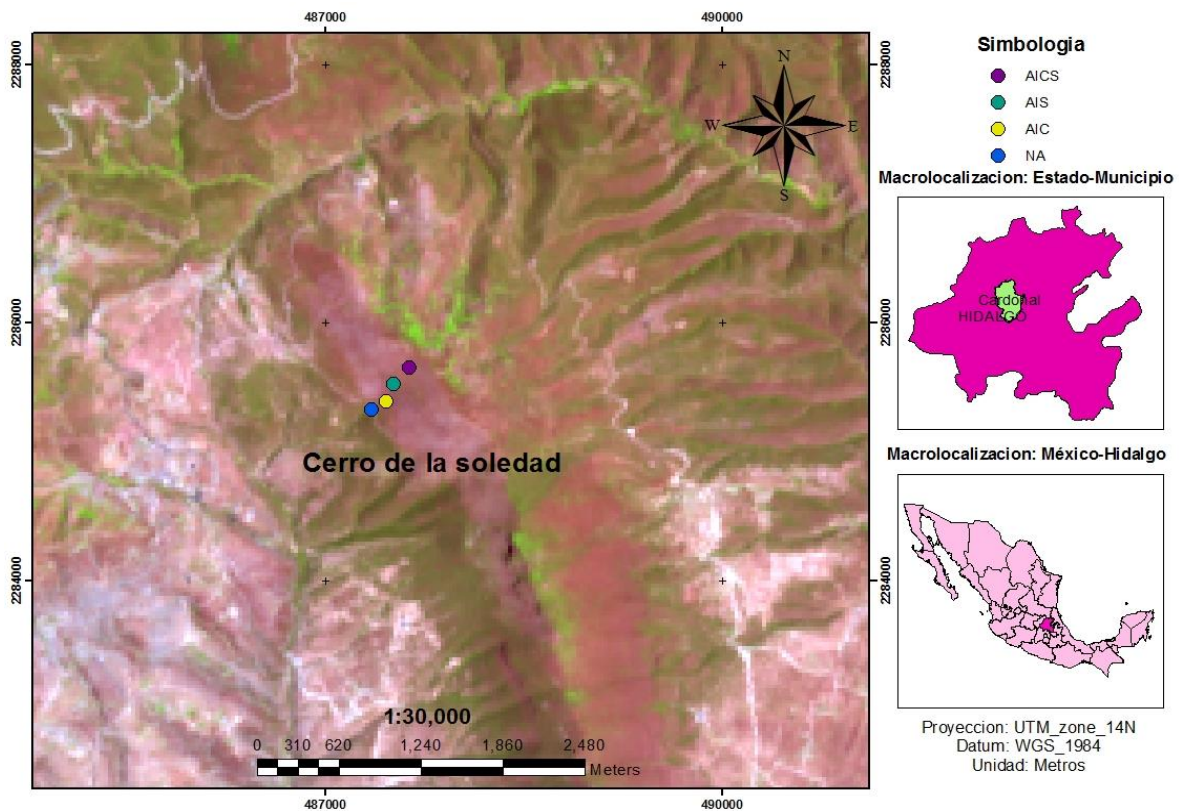


Figura 1. Localización del cerro “La Soledad”, Cardonal, Hidalgo

**Clima.** Presenta un clima semi-seco templado con humedad del 27%. Las precipitaciones medias anuales van de los 300 a 1100 mm, con un intervalo de temperatura de 12 a 22°C (INEGI, 2009).

**Geología.** La geología predominante corresponde al período Cretácico (57.75%), seguido del Neógeno (30.0%), Cuaternario (11%) y el Terciario (1%). Las rocas Ígneas extrusivas son de tipo toba ácida, volcano clástico y granodiorita.

Las rocas sedimentarias son de tipo caliza, caliza-lutita, limonita-arenisca, arenisca-conglomerado, conglomerado, caliza-arenisca y arenisca (INEGI, 2009).

Edafología. El tipo de suelo con mayor área de superficie es el Leptosol (67.7%) (INEGI, 2009), que son poco profundos (WRB, 2007).

Vegetación. La vegetación dominante y subdominante del estrato arbóreo corresponde a bosque de piñón-junípero (*Pinus cembroides* y *Juniperus flaccida*) (Pompa-Castillo, 2015). De acuerdo con el mismo autor en el estrato herbáceo ésta presente *Florenia resinosa* y algunas especies de las familias *Asteraceae*, *Cactaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae*, entre otras.

### **5.1.1 Sitios de muestreo**

Los sitios fueron seleccionados en campo, por su severidad de acuerdo con la clasificación de CONAFOR (2010) y Pompa-Castillo (2015). Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo: un sitio no afectado (NA) y tres sitios afectados: afectado por Incendio Superficial (AIS), afectado por Incendio de Copa (AIC) y afectado por Incendio de Copa Severo (AICS) (Figura 2). Todos los sitios presentan el tipo de suelo Leptosol cálcico.

*Sitio no afectado*, se encuentra en la parte media-baja del cerro, no tuvo contacto con el incendio, el estrato arbóreo dominante es de *Pinus cembroides* y *Juniperus flaccida*, los estratos herbáceo y arbustivo son abundantes.

*Afectado por incendio superficial*, se encuentra en la parte media del cerro, el cual se observa como un manchón de vegetación poco afectada, ya que el fuego afectó la capa de hojarasca y hasta un metro de altura la vegetación herbácea y arbustiva.

*Afectado por incendio de copa*, se ubica en la parte media-alta del cerro, es considerado de severidad media, ya que los árboles perdieron el follaje de las copas, pero permanecen las ramas. Los árboles principalmente afectados son de *P. cembroides*; actualmente la vegetación dominante es la herbácea.

*Afectado por incendio de copa severo*, se ubica en la parte más alta del cerro, los árboles fueron fuertemente afectados, perdieron totalmente la copa y ramas, y sólo quedaron fustes de *P. cembroides*, los cuales no sobrepasan una altura mayor a tres metros.



Sitio no afectado (NA)



Sitio afectado por incendio superficial (AIS)



Sitio afectado por incendio de copa (AIC)



Sitio afectado por incendio de copa severo (AICS)

Figura 2. Sitios de muestreo en el cerro "La Soledad", Cardonal, Hidalgo

## 5.2 Evaluación de las propiedades hídricas y físicas del suelo postincendio

### 5.2.1 Hidrofobicidad

Esta propiedad se evaluó con el método WDTP (*Water Drop Penetration Time*), que consiste en colocar una gota de agua en la superficie del suelo y registrar el tiempo que tarda en penetrar completamente en el suelo. En cada sitio se tomaron nueve registros por cada profundidad del suelo (0, 1, 2, y 3 cm) (Figura 3).



Figura 3. Evaluación de hidrofobicidad con el método WDTP en campo

### 5.2.2 Infiltración

El procedimiento para obtener los datos de infiltración en campo se realizó con el permeámetro Guelph modelo 2800KI, de la siguiente manera: primero se realizó un agujero de cinco centímetros de diámetro a una profundidad aproximada de seis centímetros, dentro de éste se colocó el permeámetro y se ajustó la válvula del reservorio, después se niveló el agua a cero centímetros. La velocidad de descenso se registró por medio de una escala graduada en intervalos constantes de tiempo. Cuando la velocidad de descenso se volvió constante se obtuvo R1; este valor es la tasa de infiltración, ya que en estos sitios no existen más de seis centímetros de profundidad en el suelo.

### 5.2.3 Densidad aparente y porcentaje de humedad

El método del cilindro se utilizó para determinar esta propiedad física, ya que permite obtener la muestra sin disturbar la estructura natural del suelo (FAO 2009). En cada sitio se tomaron tres muestras y se pesaron inmediatamente para obtener el peso húmedo. Posteriormente, se colocaron en un horno a 105°C y se obtuvieron las lecturas del peso seco cada 24 horas, hasta que éste fue constante. La densidad aparente se calcula de la siguiente manera (Guerra y Cruz, 2014):

$$DA = \frac{\text{masa del suelo seco (g)}}{\text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}}$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(\text{peso inicial del suelo} - \text{peso final del suelo})}{\text{peso final del suelo}} \times 100 (\%)$$

### 5.2.4 Análisis morfológico del suelo (estructura y porosidad)

En cada sitio se recolectaron tres muestras inalteradas de suelo húmedo (con cajas tipo Kubiena. Las muestras se procesaron en el taller del área de Génesis, Morfología y Clasificación de suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

El procedimiento que se realizó para la elaboración de secciones delgadas de suelos fue el propuesto por Murphy (1986). Éste consiste en poner a secar las muestras a la sombra durante 4-5 semanas. Posteriormente, se les aplica una mezcla de resina poliéster insaturada y monómero-estireno (relación 7:3) para endurecer la muestra; después se retiran las muestras de las cajas Kubiena y se cortan longitudinalmente con un disco de punta diamante. Para obtener una superficie uniforme, los cortes son pulidos y a las muestras se adhieren a un portaobjetos; se pulen hasta obtener un espesor de 30 µm. Finalmente se les coloca un cubreobjetos (Figura 4).

Para el análisis de porosidad se utilizaron seis fotografías de cada sección delgada; el conteo de la porosidad total se llevó a cabo con el programa *Image Pro. Plus* Versión 5. La descripción de la estructura se realizó con base en los conceptos y terminología de Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003). También se realizó el conteo de macro, meso y microporosidad por conteo de puntos a escala.



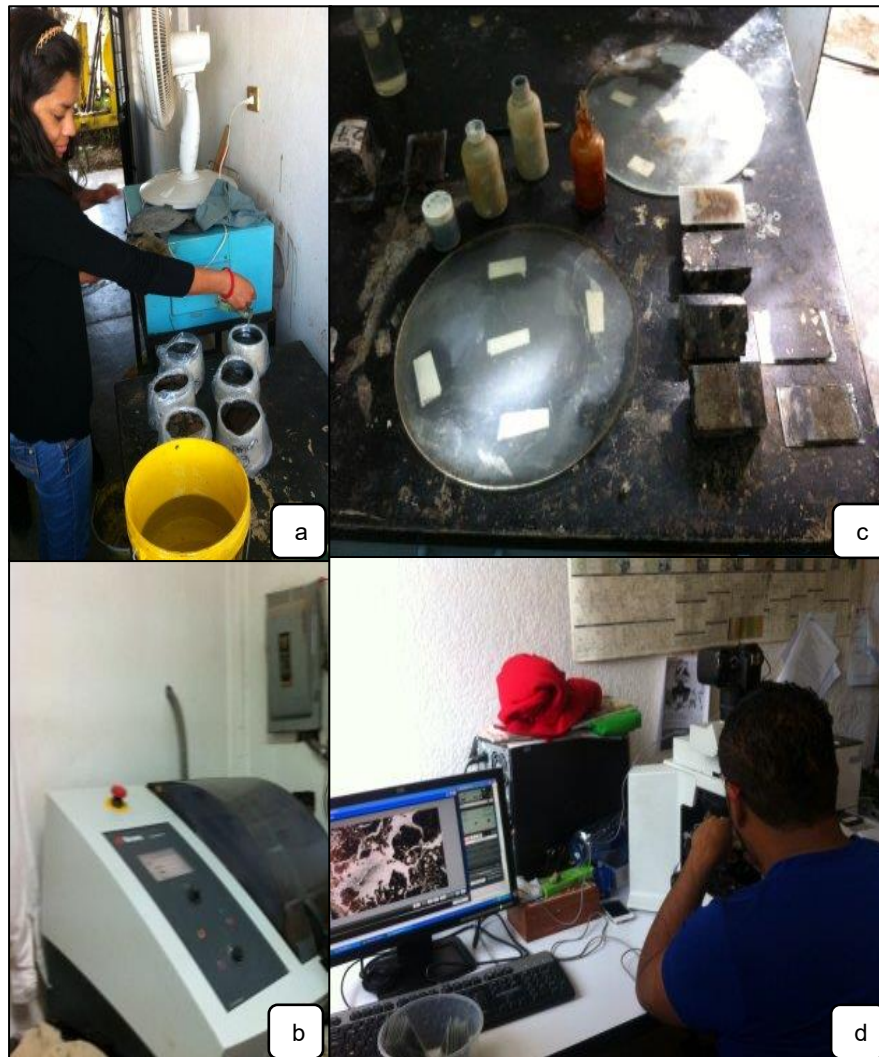


Figura 4. Procedimiento de análisis morfológico y de porosidad del suelo. a) Preparación de muestras inalteradas, b) corte de muestras con disco de punta diamante, c) obtención de secciones delgadas pulidas, y d) análisis de fotomicrografías.

### 5.2.5 Capacidad de retención de agua disponible

Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. El método que se utilizó fue de olla y membrana de presión. Se obtuvo la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) a una tensión de -33 kPa y -1500 kPa respectivamente. La diferencia entre CC y PMP nos da el valor de la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRA) (NOM-021-RECNAT-2000).

### **5.3 Recolecta y selección de semillas de *Pinus cembroides***

La obtención de semillas fue por recolecta directa de conos (temporada del año 2015) provenientes de árboles que se encuentran en piñonares del cerro la “La Soledad” entre San Miguel Tlazintla y el Santuario Mapethe, municipio de Cardonal y contiguo a la zona de trabajo.

Se recolectaron aproximadamente 300 conos de los cuales se obtuvieron poco más de 3,000 semillas. Las semillas se seleccionaron para tener un tamaño, peso, longitud y diámetro homogéneos; se revisaron individualmente, cuidando que no se presentaran lesiones como hongos, quebraduras, etc. Se midieron con Vernier (en milímetros) y se pesaron en balanza analítica (en gramos). Las semillas cuyo peso era menor a 0.6 gramos no se utilizaron ya que generalmente eran vanas.

### **5.4 Evaluación de germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio**

El suelo que se utilizó fue extraído de los sitios afectados por incendio y el sitio no afectado. De cada sitio se recolectaron dos kilogramos de suelo húmedo, ya que de acuerdo con la NOM-021-RENACT-2000, se obtiene mayor homogenización de las muestras. Con cada muestra se llenó una charola de germinación con capacidad de 40 cavidades.

En cavidad se sembró una semilla, a una profundidad de un centímetro (Meraz y Bonilla (2001), con tratamiento de escarificación de remojo en agua por 24 horas. El riego fue de 25 mL de agua por cavidad cada cuatro días, con periodos sin riego cada 20 días.

El número de semillas que germinaron se registró cuando emergió la radícula (Figura 5a). Se consideró la emergencia cuando los cotiledones salieron de la cubierta (Figura 5b) y la supervivencia como el número de plántulas vivas después de cinco meses de cultivo (Figura 5c, d, e y f). La evaluación se realizó cada dos días desde el inicio hasta el final del experimento. Además se realizó un conteo de cotiledones y longitud promedio de un cotiledón por plántula (Romero-González, 2005).

## 5.5 Evaluación del crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides* Zucc. en suelos postincendio

El crecimiento de las plántulas se evaluó midiendo los caracteres morfológicos del total de plántulas que sobrevivieron. En el suelo de NA fueron ocho plántulas, en AIS y AICS fueron 12, mientras que para AIC fueron 10.

Para cada plántula se obtuvieron los siguientes datos: 1) altura (A), 2) diámetro a la altura del cuello del tallo (D), 3) peso total húmedo (Ph), 4) peso total seco (Ps), 5) peso seco aéreo (Psa), 6) longitud de la raíz (Ar) , 7) peso seco de la raíz (Psr) y (8) número de raíces secundarias.

Todos los datos fueron medidos con regla graduada en centímetros, excepto el diámetro que se obtuvo con Vernier en milímetros.

Para obtener la biomasa, se seccionaron las plántulas en parte aérea y radical. Se pesaron en balanza analítica para obtener los pesos húmedos y posteriormente se colocaron en horno a 70 °C, y se pesaron nuevamente hasta obtener el peso seco constante (Gutiérrez *et al.*, 2015).

Para contar el número de raíces secundarias, se utilizaron las fotografías de cada plántula y se obtuvo el promedio de raíces que se generaron en cada suelo; además se obtuvo el porcentaje de raíces en relación al número de raíces de plántulas del suelo de NA.

Con los datos registrados se aplicaron los índices de calidad de plantas mencionados en el cuadro 1. Además, se obtuvo la capacidad de almacenamiento de agua en plántulas (CAA); que se propone como indicador de la cantidad de agua que una plántula es capaz de almacenar bajo las condiciones en que ésta siendo cultivada, se calculó con la siguiente fórmula:

$$CAA = Pth (g) - Pts (g)$$

Dónde:

Pts (g) = Peso total seco

Pth (g) = Peso total húmedo

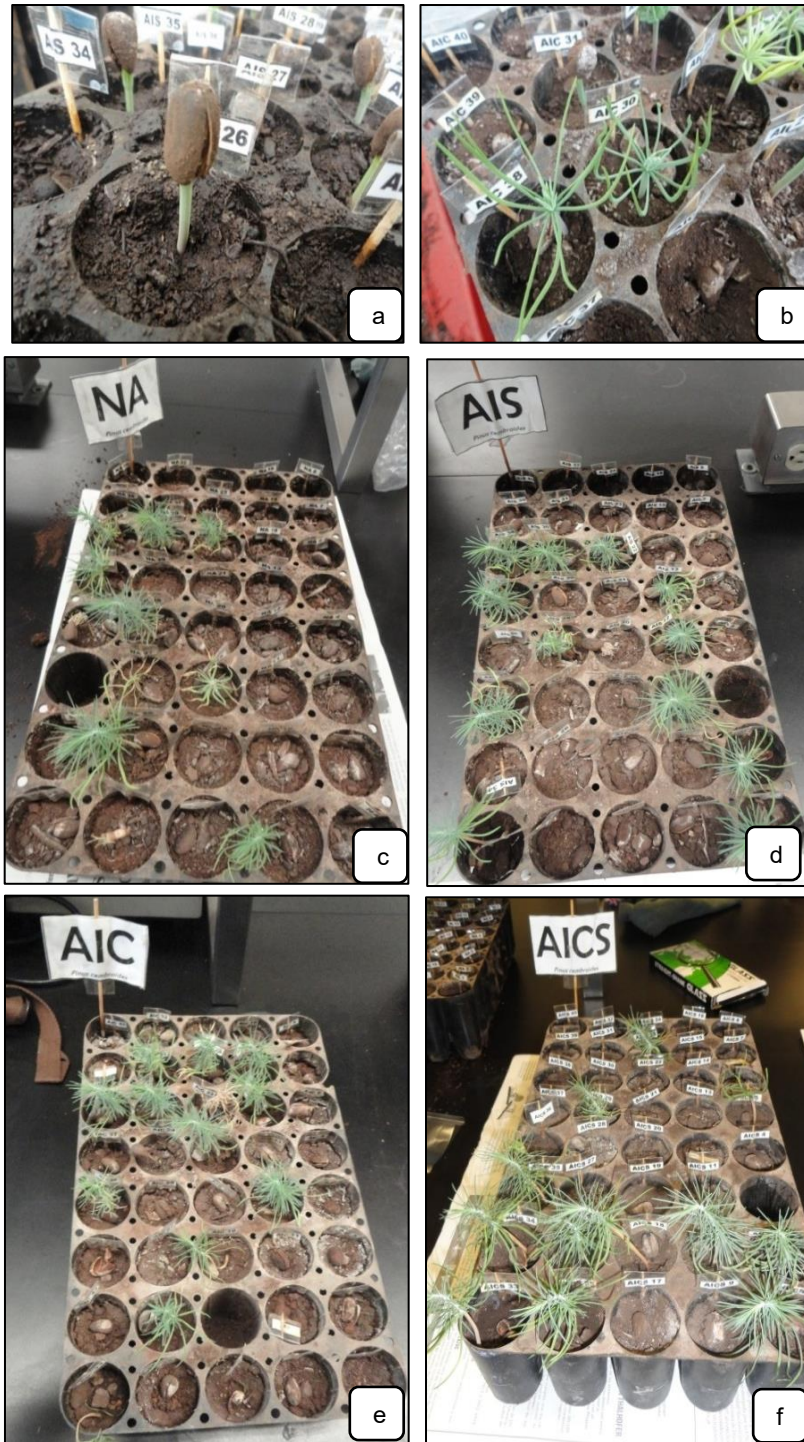


Figura 5. Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. (a) Germinación, (b) Emergencia y (c, d, e, f) Supervivencia. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

## **5.6 Análisis estadístico**

Para evaluar diferencias significativas de caracteres morfológicos, índices de calidad y las propiedades físicas e hídricas del suelo entre sitios, se realizó una prueba de *T-student* con  $P = \leq 0.05$ . Además se llevó a cabo un análisis de correlación múltiple entre las propiedades hídricas y físicas del suelo y los caracteres morfológicos de las plántulas de cada sitio con el programa *Stata 11.0*.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Propiedades hídricas y físicas en suelos postincendio

#### 6.1.1 Hidrofobicidad

En NA la capa superficial el suelo (0-1 cm de profundidad) presenta la clase fuertemente repelente. Los incendios superficiales son los únicos que eliminan esta repelencia superficial; mientras que en AIC disminuye a ligeramente repelente y en AICS la hidrofobicidad no se modifica. Cabe destacar que a mayor profundidad del suelo la hidrofobicidad disminuye (Cuadro 4).

Cuadro 4. Hidrofobicidad en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo

| Profundidad | 0 cm                           |       | 1 cm                           |       | 2 cm                           |       | 3 cm                          |       |
|-------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Sitio       | Tiempo (s)                     | Nivel | Tiempo (s)                     | Nivel | Tiempo (s)                     | Nivel | Tiempo (s)                    | Nivel |
| NA          | 77 ( $\pm 122$ ) <sup>a</sup>  | FR    | 88 ( $\pm 172$ ) <sup>a</sup>  | FR    | 8 ( $\pm 4$ ) <sup>a</sup>     | LR    | 10 ( $\pm 70$ ) <sup>a</sup>  | LR    |
| AIS         | 3 ( $\pm 4$ ) <sup>b</sup>     | NR    | 109 ( $\pm 129$ ) <sup>a</sup> | FR    | 47 ( $\pm 87$ ) <sup>a</sup>   | LR    | 30 ( $\pm 3$ ) <sup>a</sup>   | LR    |
| AIC         | 6 ( $\pm 4$ ) <sup>cd</sup>    | LR    | 165 ( $\pm 393$ ) <sup>a</sup> | FR    | 186 ( $\pm 393$ ) <sup>a</sup> | FR    | 8 ( $\pm 3$ ) <sup>a</sup>    | LR    |
| AICS        | 93 ( $\pm 150$ ) <sup>ad</sup> | FR    | 8 ( $\pm 8$ ) <sup>ab</sup>    | LR    | 9 ( $\pm 8$ ) <sup>a</sup>     | LR    | 28 ( $\pm 106$ ) <sup>a</sup> | LR    |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con  $P \leq 0.05$  ( $\pm D.E.$ ): desviación estándar; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo. Nivel de repelencia; NR: no repelente; LR: ligeramente repelente; FR: fuertemente repelente; EXR: extremadamente repelente.

#### 6.1.2 Infiltración

En NA el suelo presenta una infiltración de  $3961 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ . Tras un incendio superficial, esta propiedad no se ve afectada significativamente; sin embargo en AIC y AICS disminuye hasta 64 y 67% respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Infiltración en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo

| Sitios | Tiempo promedio ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) | Valores mín. y máx. ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) |
|--------|---|---|
| NA     | 3961 ( $\pm 2305$ ) <sup>a</sup>                  | 1350-7290   |
| AIS    | 3788 ( $\pm 1809$ ) <sup>a</sup>                  | 1980-6768   |
| AIC    | 1403 ( $\pm 616$ ) <sup>b</sup>                   | 540-1890  |
| AICS   | 1298 ( $\pm 377$ ) <sup>b</sup>                   | 855-1680  |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con  $P \leq 0.05$  ( $\pm D.E.$ ): desviación estándar; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

### 6.1.3 Densidad aparente y porcentaje de humedad

La Da y porcentaje de humedad en suelo bajo bosque de piñón-junípero no afectado fue de 0.90 g·cm<sup>3</sup> y 35% respectivamente. Los incendios de cualquier severidad no afectan significativamente estas propiedades; sin embargo los incendios tienden a incrementar la Da y reducir el contenido de humedad (Cuadro 6).

Cuadro 6. Densidad aparente y porcentaje de humedad en suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo

| Sitio | Densidad aparente<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Humedad<br>%           |
|-------|--|------------------------|
| NA    | 0.90 (± 0.21) <sup>a</sup>                 | 35 (± 8) <sup>a</sup>  |
| AIS   | 1.03 (± 0.12) <sup>a</sup>                 | 29(± 3) <sup>a</sup>   |
| AIC   | 0.98 (± 0.16) <sup>a</sup>                 | 34 (± 6) <sup>a</sup>  |
| AICS  | 0.97 (± 0.08) <sup>a</sup>                 | 34 (± 4) <sup>ab</sup> |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con P=0.05 (±D.E.): desviación estándar; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

### 6.1.4 Estructura y porosidad del suelo

En general las secciones delgadas de los sitios afectados presentaron residuos orgánicos carbonizados, que son una evidencia de que en la zona ocurrieron incendios. También se observa que la estructura del suelo cambia de acuerdo con la severidad del fuego. Además, se aprecia que en AICS la capa superficial es similar a la de mayor profundidad del sitio NA, ya que en estos sitios se presenta erosión, lo que posiblemente eliminó los primeros 3-4 cm del suelo (Figura 6).

En suelos bajo bosque de piñón-junípero no afectado y sitios afectados por incendio se observaron agregados de bloques subangulares, que disminuyen a mayor severidad de incendios; la formación de microagregados se observa principalmente en los tres sitios afectados por incendios.

Los poros de empaquetamiento compuesto se presentaron en todos los sitios; sin embargo disminuyen en los sitios afectados por incendios, en los que se presentan canales y cavidades (AIS), empaquetamiento complejo (AIC) y fisuras entre agregados (AICS), como puede verse en la Figura 7.

El suelo bajo bosque no afectado presentó 38% de porosidad total. En suelos afectados por incendio disminuye, aunque no significativamente.

En NA el porcentaje de macroporos fue de 15%; mientras que en AIS, AIC y AICS disminuye, aunque no significativamente. Respecto al porcentaje de mesoporos en NA se presenta el 8% y en los suelos de sitios afectados se observa un incremento significativo, presentándose el mayor valor en AIS (17%); mientras que el porcentaje de microporos en NA fue de 15% y en los sitios afectados disminuye significativamente.

Los porcentajes promedio de tipos de poros, agregados, porosidad total y macro, meso y microporosidad se encuentran en el cuadro 7.

#### **6.1.5 Capacidad de retención de agua**

En los suelos de NA el porcentaje de CC y PMP registraron valores más altos que en los suelos postincendio. Sin embargo la capacidad de retención de agua (agua disponible para las plántulas) en AIS, AIC y AICS fue de 16, 6 y 14% respectivamente, en tanto que, NA presentó el valor más bajo (5%) (Figura 8).



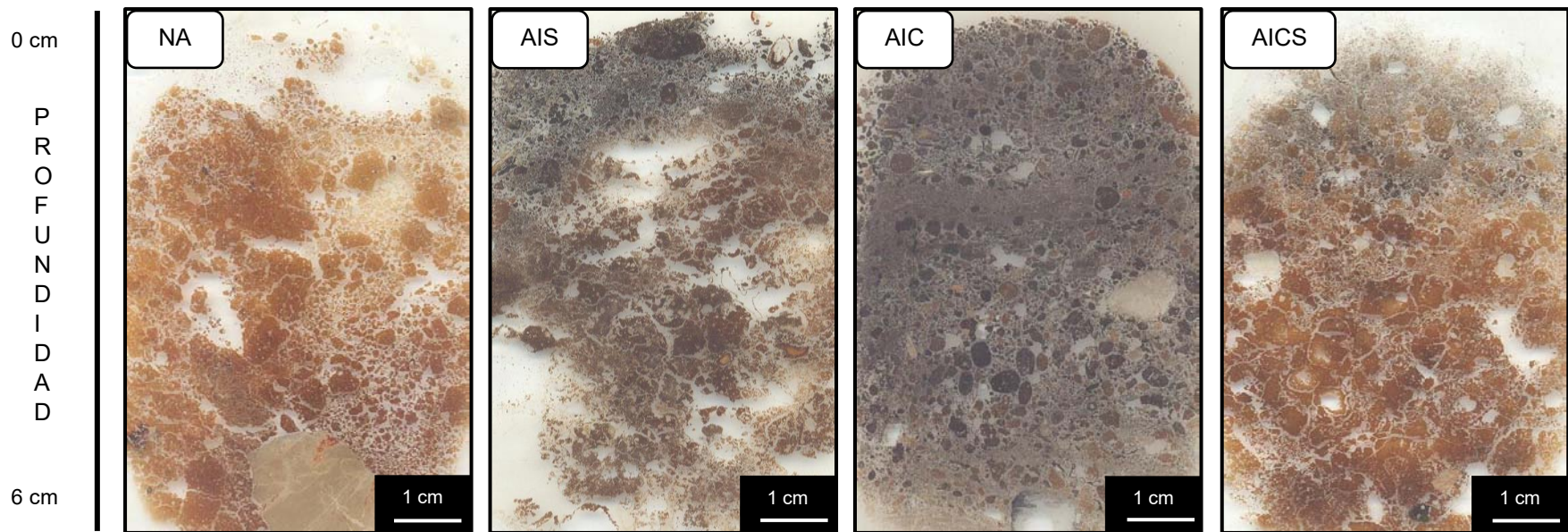


Figura 6. Muestras de secciones delgadas de suelos afectados por incendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

Cuadro 7. Estructura y porosidad del suelo en sitios postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo

| SITIO | Tipos de agregados            | Tipos de poros                        | %               |                  |                  | Porosidad total |
|-------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
|       |                               |                                       | Macroporos      | Mesoporos        | Microporos       |                 |
| NA    | Bloques subangulares (52.7%)  | Empaquetamiento Compuesto (34%)       | 15 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup>   | 15 <sup>a</sup>  | 38 <sup>a</sup> |
|       | Granular (6.2%)               | Fisuras entre agregados (4%)          | (±12)           | (±4)             | (±6)             | (±12)           |
|       | Microagregados (3.1%)         |                                       | 1-38            | 1-17             | 5-29             |                 |
| AIS   | Bloques subangulares (30.6%)  | Empaquetamiento Compuesto (25%)       | 7 <sup>a</sup>  | 17 <sup>b</sup>  | 8 <sup>b</sup>   | 32 <sup>a</sup> |
|       | Migajoso (20.4%)              | Canales (5%)                          | (±5)            | (±8)             | (±5)             | (±5)            |
|       | Microagregados (13.6%)        | Cavidades (2%)                        | 2-17            | 5-29             | 3-16             |                 |
| AIC   | Granular (3.4%)               |                                       |                 |                  |                  |                 |
|       | Microagregados (22.75%)       | Empaquetamiento Compuesto (26%)       | 9 <sup>a</sup>  | 15 <sup>bc</sup> | 11 <sup>b</sup>  | 35 <sup>a</sup> |
|       | Migajoso (22.75%)             | Empaquetamiento Complejo (7%)         | (±9)            | (±5)             | (±5)             | (±13)           |
| AICS  | Bloques subangulares (13%)    | Cavidades (2%)                        | 0-31            | 5-25             | 3-19             |                 |
|       | Granular (6.5%)               |                                       |                 |                  |                  |                 |
|       | Migajoso (40.2%)              | Empaquetamiento Compuesto (26%)       | 10 <sup>a</sup> | 11 <sup>ac</sup> | 11 <sup>bc</sup> | 33 <sup>a</sup> |
| AICS  | Microagregados (16.75%)       | Fisuras dentro y entre agregados (7%) | (±6)            | (±5)             | (±4)             | (±4)            |
|       | Bloques subangulares (10.05%) |                                       | 3-25            | 5-20             | 6-16             |                 |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con P=0.05, (±D.E.): desviación estándar, (mín.-máx.): valores mínimos y máximos; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

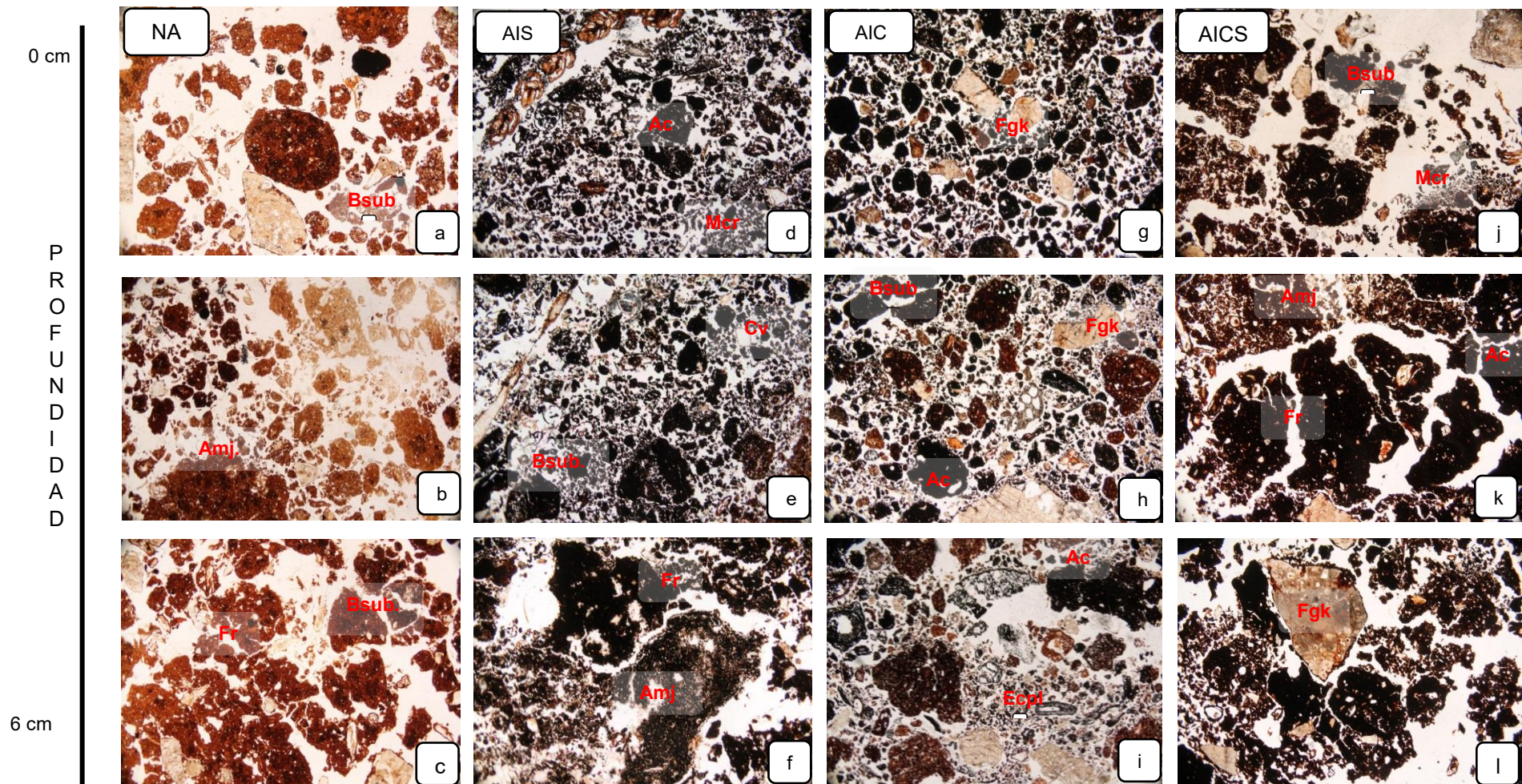


Figura 7. Fotomicrografías de suelos afectados postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo; NA (a, b, c); AIS (d, e, f); AIC (g, h, i); AICS (j, k, l). Agregados carbonizados (Ac); Agregados de tipo migajoso (Amj); Agregados de bloques subangulares (Bsub); Microagregados (Mcr); Poros de empaquetamiento compuesto (Ecpt); Poros de empaquetamiento complejo (Ecpl); Fisuras (Fr); Cavidades (Cv); Fragmentos de roca (Frk).

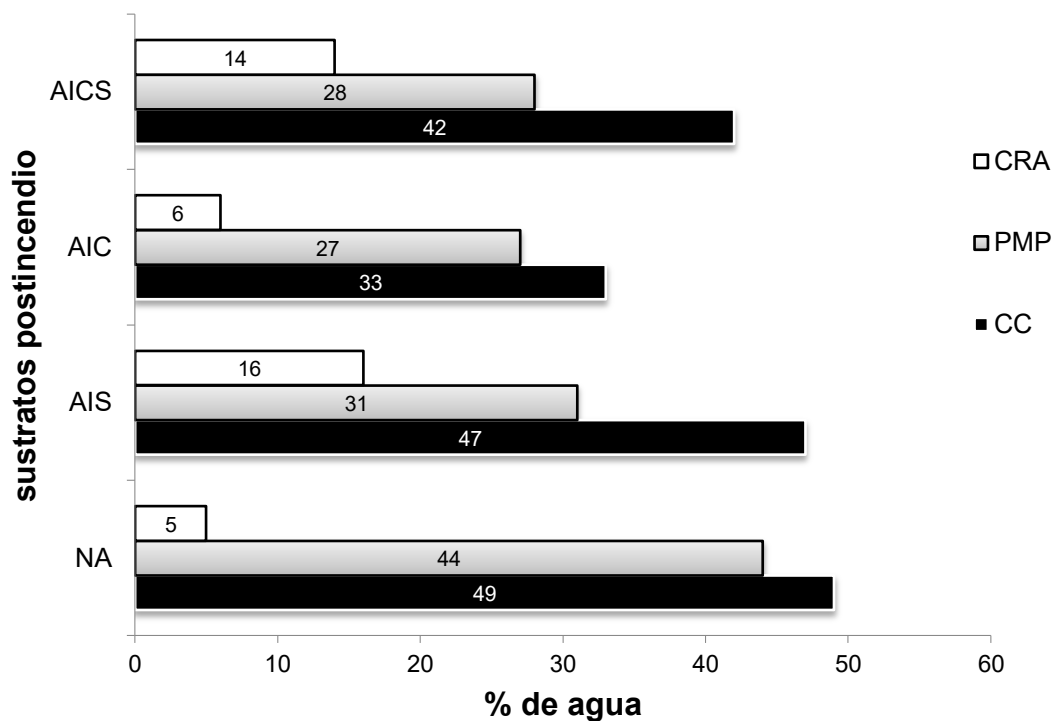


Figura 8. Porcentajes obtenidos de las curvas de retención de humedad de suelos postincendio bajo bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo. CC: Capacidad de campo (T=0.3 Bar); PMP: Punto de marchitez permanente (T=15 Bar); CRA: Capacidad de retención de agua.

## 6.2 Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides*, en suelos postincendio

Las semillas que se sembraron y germinaron en todos los suelos, registraron en promedio un peso de 0.993 g (DE=0.12), una longitud de 1.62 cm (DE=0.12) y un diámetro de 0.969 cm (DE=0.13).

La germinación, emergencia y supervivencia de plántulas fue mayor en suelos postincendio (Figura 9).

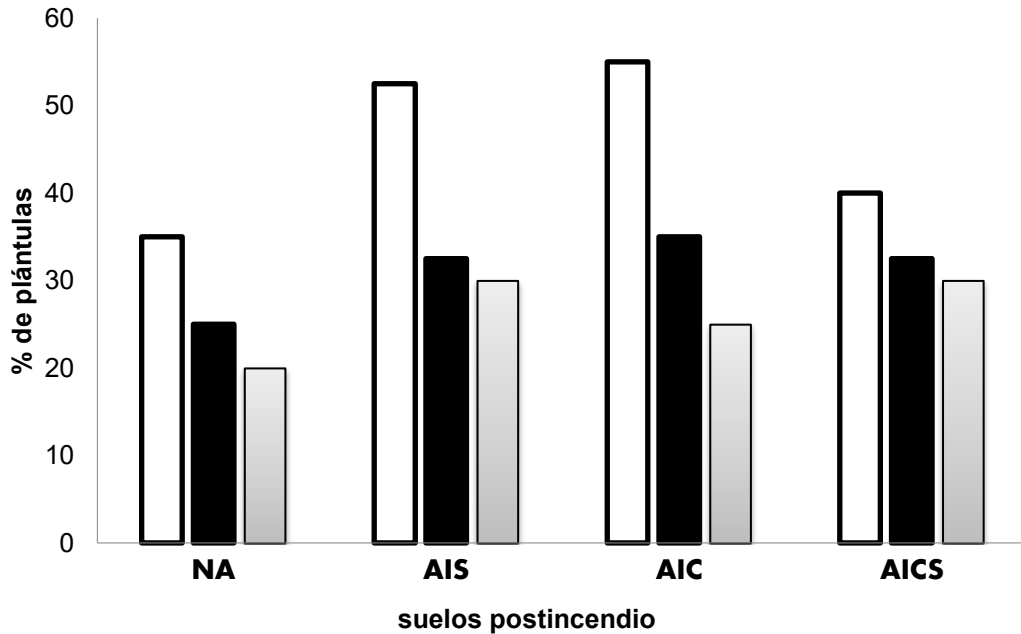


Figura 9. Porcentaje total de germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

### 6.2.1 Germinación

En los suelos de sitios afectados por incendio, la velocidad y porcentaje de germinación fue mayor que en NA (Figura 10).

La germinación comenzó 10 días después de la siembra en AIC; mientras que en los otros suelos inició a los 23 días. El último registro de germinación fue a los 74 días para AIC, a los 68 días en AIS y a los 71 días en NA y AICS.

En el suelo NA el porcentaje de germinación fue 35%, en suelos AIS y AIC incremento a 52.5% y 55% respectivamente, mientras que en AICS fue del 40%.

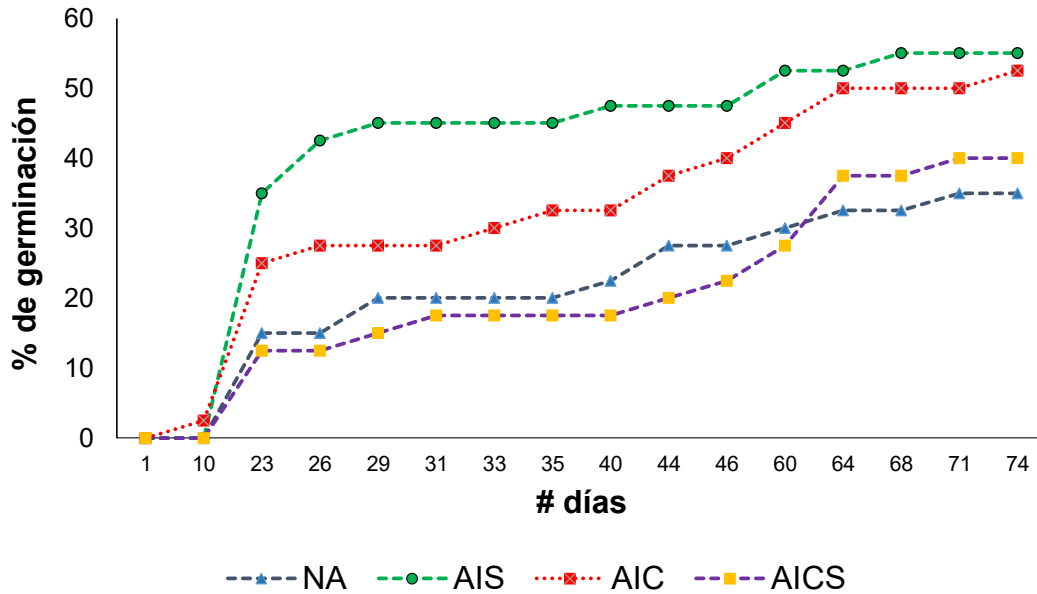


Figura 10. Velocidad de germinación de semillas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

### 6.2.2 Emergencia

La emergencia de plántulas de *Pinus cembroides* no ocurrió de forma homogénea en el tiempo; en AICS comenzó a los 29 días después de la siembra, en AIC y AIS ocurrió a los 31 y 33 días respectivamente, mientras que en el suelo NA ocurrió hasta los 46 días (Figura 11).

En NA y AICS se obtuvo un porcentaje de 78.57%, y 81.25% respectivamente, mientras que en suelo de AIS fue de 63.63%, y en AIC fue de 66.66%.

El número de cotiledones registrados en todos los sitios va de 10 a 14, y la longitud promedio fue de 3.13 cm (DE=0.55) para todas las plántulas.

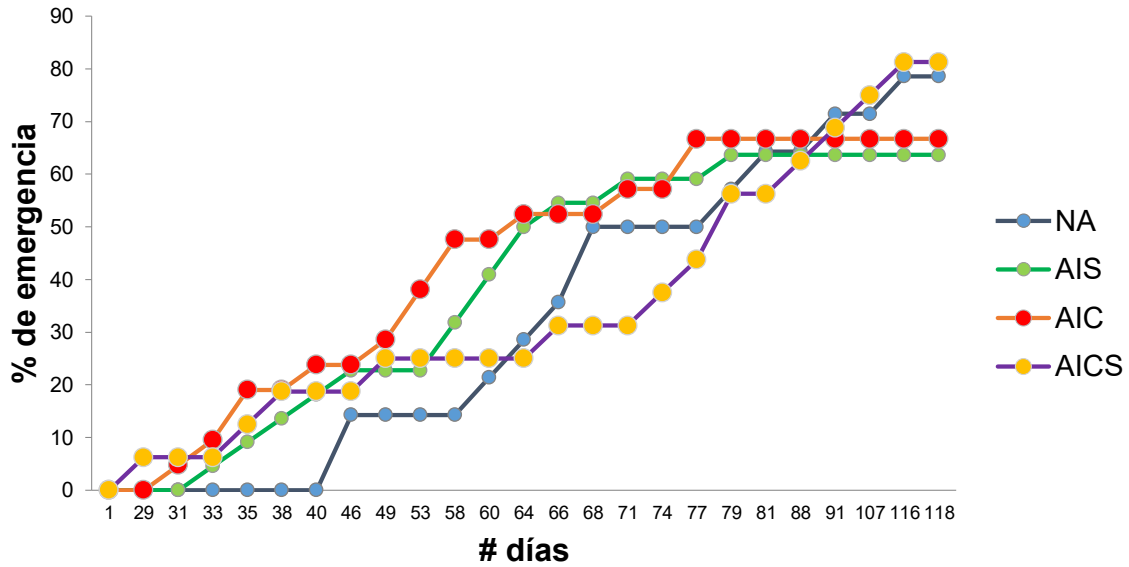


Figura 11. Porcentaje de emergencia de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

### 6.2.3 Supervivencia

El porcentaje de supervivencia de plántulas se obtuvo respecto a las plántulas emergidas en cada suelo y que quedaron vivas al final del experimento. En el suelo de NA se registró el 72.72%, en AIS incrementó 85.71%, en AIC fue 71.24%, mientras que en AICS se obtuvo el valor más alto de supervivencia con 92.30%.

La causa de mortalidad de semillas germinadas y plántulas emergidas fue por hongo *Fusarium* sp. (Figura 12), según el Dr. David Cibrián Tovar (comunicación personal).



Figura 12. Mortalidad de plántulas de *Pinus cembroides* por *Fusarium sp.*, en suelos postincendio.



### 6.3 Crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio

A) *Caracteres morfológicos*. En general, la altura aérea, diámetro y biomasa seca total fueron mayores en suelos de sitios afectados por incendio, los valores promedio, mínimos y máximos se presentan en el cuadro 8.

**Altura.** La altura promedio de plántulas del suelo de NA fue de 7.61 cm, en plántulas de suelos de AIC y AICS se registraron diferencias significativas, aumentando a 8.68 y 9.13 cm respectivamente.

**Diámetro.** No se registraron diferencias significativas entre el suelo de NA y los suelos de sitios afectados por incendio. Sin embargo el promedio más alto registrado fue 2.5 mm en AIC, mientras que el más bajo (1.7 mm) se obtuvo en NA.

**Biomasa total seca.** En suelo de NA se obtuvo un promedio de 0.105 g, mientras que en los suelos de sitios afectados incrementó a mayor severidad de incendios, sin embargo no se presentaron diferencias significativas.

**Longitud y biomasa seca de la raíz.** En suelo NA el crecimiento promedio de la raíz fue de 9.59 cm, mientras que en suelos afectados por incendios disminuyó significativamente a 5.55 cm en AIS, 5.61 cm en AIC y 6.05 cm en AICS. Sin embargo, en promedio la biomasa seca en plántulas en suelos de NA y suelos postincendio fue 0.02 g.

**Numero de raíces secundarias.** Las plántulas en suelo de NA generaron en promedio 3.37 raíces secundarias; mientras que en suelos afectados por AIC y AICS incrementó significativamente a 4.8 y 5.25.

Cuadro 8. Caracteres morfológicos de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio de Cardonal, Hidalgo

| Sitio | Altura<br>(A)<br>(cm)                         | Diámetro<br>(D)<br>(mm)                       | Biomasa seca<br>total<br>(BST)<br>(g)          | Longitud de la<br>raíz<br>(Ar)<br>(cm)      | # raíces<br>secundarias<br>(Rsec)<br>(cm) |
|-------|---|---|--|---|---|
| NA    | 7.61 ( $\pm$ 1.43) <sup>a</sup><br>5.5 - 9.4  | 1.7 ( $\pm$ 0.438) <sup>a</sup><br>1 - 2      | 0.105 ( $\pm$ 0.040) <sup>a</sup><br>0.06-0.17 | 9.59 ( $\pm$ 5.30) <sup>a</sup><br>5.4-20.6 | 3.37 ( $\pm$ 2.07) <sup>a</sup><br>0-7    |
| AIS   | 8.39 ( $\pm$ 1.02) <sup>a</sup><br>6.5 - 9.9  | 1.88 ( $\pm$ 0.226) <sup>a</sup><br>1.5 - 2   | 0.115 ( $\pm$ 0.026) <sup>a</sup><br>0.07-0.17 | 5.55 ( $\pm$ 0.90) <sup>b</sup><br>4.5-7.4  | 3.33 ( $\pm$ 1.83) <sup>a</sup><br>2-7    |
| AIC   | 8.68 ( $\pm$ 1.60) <sup>b</sup><br>6 - 10.7   | 2.06 ( $\pm$ 0.599) <sup>a</sup><br>1 - 3.5   | 0.122 ( $\pm$ 0.027) <sup>a</sup><br>0.07-0.16 | 5.61 ( $\pm$ 1.82) <sup>b</sup><br>0.7-6.8  | 4.8 ( $\pm$ 1.98) <sup>b</sup><br>2-8     |
| AICS  | 9.13 ( $\pm$ 1.45) <sup>b</sup><br>7.1 - 12.2 | 1.96 ( $\pm$ 0.257) <sup>a</sup><br>1.5 - 2.5 | 0.127 ( $\pm$ 0.037) <sup>a</sup><br>0.06-0.2  | 6.05 ( $\pm$ 1.23) <sup>b</sup><br>4.8-8.4  | 5.25 ( $\pm$ 2.45) <sup>b</sup><br>3-8    |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con  $P=0.05$ , ( $\pm$ D.E.): desviación estándar, (mín.-máx.); valores mínimos y máximos; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

### B) Índices de calidad de plantas.

Al considerar que a nivel nacional no existen valores establecidos de los índices de calidad de planta, se utilizaron los criterios generales reportados en el cuadro 1 y los valores promedio obtenidos en el sitio NA; por lo tanto, se consideraron plántulas vigorosas las que registraron valores  $\leq 4.89$ . Para la relación A/R, se consideraron plántulas con proporción adecuada las de valores  $\leq 5.43$ . El valor para ICD fue  $\geq 0.011$ ; mientras que para el índice de lignificación fue  $\geq 26.13\%$ . Respecto a la capacidad de almacenamiento de agua (CAA) el valor fue  $\geq 0.20$  g (Cuadro 9).

Cuadro 9. Índices de calidad de plantas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio de Cardonal, Hidalgo

| Índice de robustez (IR)     | Relación biomasa seca aérea- radical (A/R) | Índice de calidad de Dickson (ICD) | Índice de lignificación (IL)<br>% | Capacidad de almacenamiento de agua CAA (g) |
|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 4.89 (± 2.12) <sup>a</sup>  | 5.43 (± 3.05) <sup>a</sup>                 | 0.011 (± 0.004) <sup>a</sup>       | 26.13 (± 4.38) <sup>a</sup>       | 0.20 (± 0.09) <sup>a</sup>                  |
| 2.75 - 9.4                  | 2.4 - 12                                   | 0.005 - 0.018                      | 20.69 - 33.33                     | 0.19 - 0.45                                 |
| 4.55 (± 0.850) <sup>a</sup> | 5.80 (± 2.61) <sup>a</sup>                 | 0.012 (± 0.005) <sup>a</sup>       | 19.33 (± 4.95) <sup>a</sup>       | 0.34 (± 0.08) <sup>a</sup>                  |
| 3.25 - 6.27                 | 2.4 - 10                                   | 0.007 - 0.024                      | 13.24 - 25.81                     | 0.24 - 0.51                                 |
| 4.67 (± 2.21) <sup>a</sup>  | 6.05 (± 2.44) <sup>a</sup>                 | 0.012 (± 0.004) <sup>a</sup>       | 26.81 (± 5.57) <sup>ab</sup>      | 0.34 (± 0.08) <sup>a</sup>                  |
| 2.14 - 10.3                 | 3.67 - 12                                  | 0.007 - 0.019                      | 20 - 39.29                        | 0.17 - 0.44                                 |
| 4.81 (± 1.40) <sup>a</sup>  | 7.71 (± 3.18) <sup>a</sup>                 | 0.011 (± 0.004) <sup>a</sup>       | 24.03 (± 2.50) <sup>ab</sup>      | 0.40 (± 0.09) <sup>b</sup>                  |
| 3.2 - 8.13                  | 4 - 14                                     | 0.006 - 0.18                       | 18.75 - 26.32                     | 0.26 - 0.56                                 |

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas con P=0.05, (±D.E.): desviación estándar, (mín.-máx.); valores mínimos y máximos; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS: sitio afectado por incendio de copa severo.

**Índice de robustez (IR).** El valor promedio de este índice fue mayor en plántulas en suelo de NA; sin embargo en plántulas de suelos postincendio no hubo diferencias significativas. En el suelo de NA el número de plántulas vigorosas fueron 6, en los suelos AIS y AICS incrementaron a 8; mientras que en el suelo AIC fueron 7 (Figura 13).

**Relación biomasa seca aérea- radical (A/R).** El valor promedio de la relación A/R en plántulas de suelo de NA fue de 5.8; mientras que en los suelos postincendio este valor es más alto (aunque no significativamente), con valores de 5.8, 6.05 y 7.71 respectivamente. El número de plántulas consideradas como proporcionadas fueron 5 en NA, en suelos AIS fueron 7, mientras que en suelos AIC y AICS fueron 4 y 3 respectivamente (Figura 14).

**Índice de calidad de Dickson.** En suelos NA y AICS se obtuvo un promedio de 0.011; en tanto que, en AIS y AIC fue de 0.012. De acuerdo con el promedio de NA, se obtuvieron 4 plántulas de calidad en este suelo; mientras que en suelos de sitios afectados incrementó el número de plántulas a 8, 6 y 5 para AIS, AIC y AICS respectivamente (Figura 15).

**Índice de lignificación.** El índice de lignificación no mostró diferencias significativas entre plántulas de suelo de NA y suelos postincendio; sin embargo entre suelos de AIS y los incendios de mayor severidad si hubo diferencias significativas, se registraron valores promedio de 19.33% (AIS) y 26.82% y 24.03% para AIC y AICS respectivamente. El número de plántulas con valor alto de lignificación en suelo NA fueron 4, mientras que en AIS no sobrepasaron el valor promedio. En AIC y AICS se registraron 6 y 2 plántulas respectivamente (Figura 16).

**Capacidad de almacenamiento de agua en plántulas.** En NA fue de 0.20 g, y con respecto a las plántulas de AIS y AIC no hubo diferencias significativas, pero, en plántulas de AICS la CAA incrementó significativamente a 0.40 g. El número de plántulas con mayor CCA en suelos de NA fueron 3, en AIS y AIC fueron 7, mientras que en AICS fueron 9 (Figura 17).

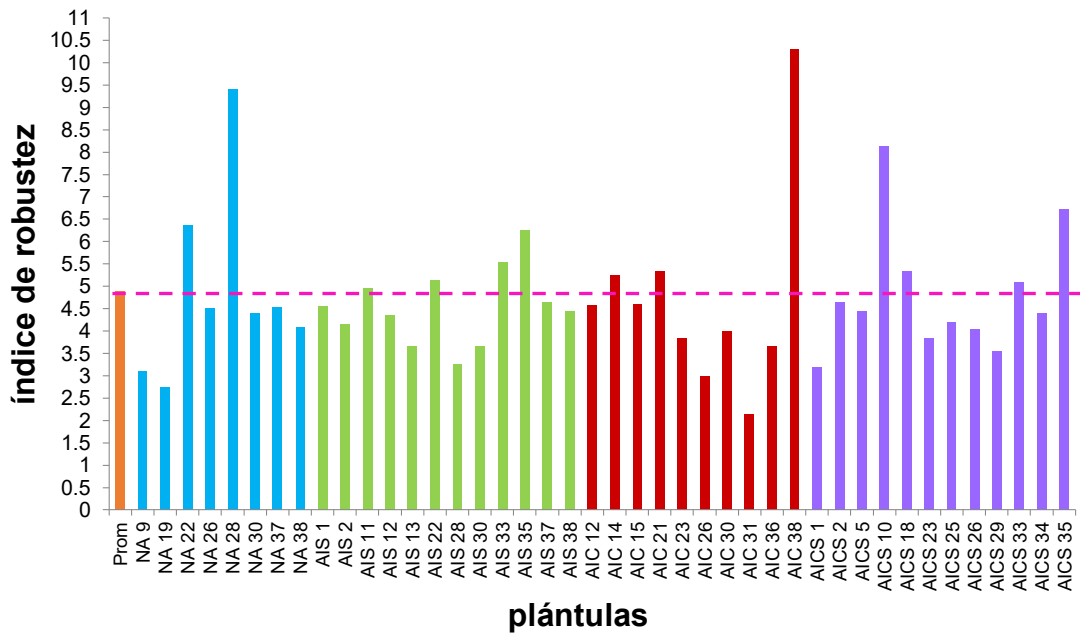


Figura 13. Índice de robustez en plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

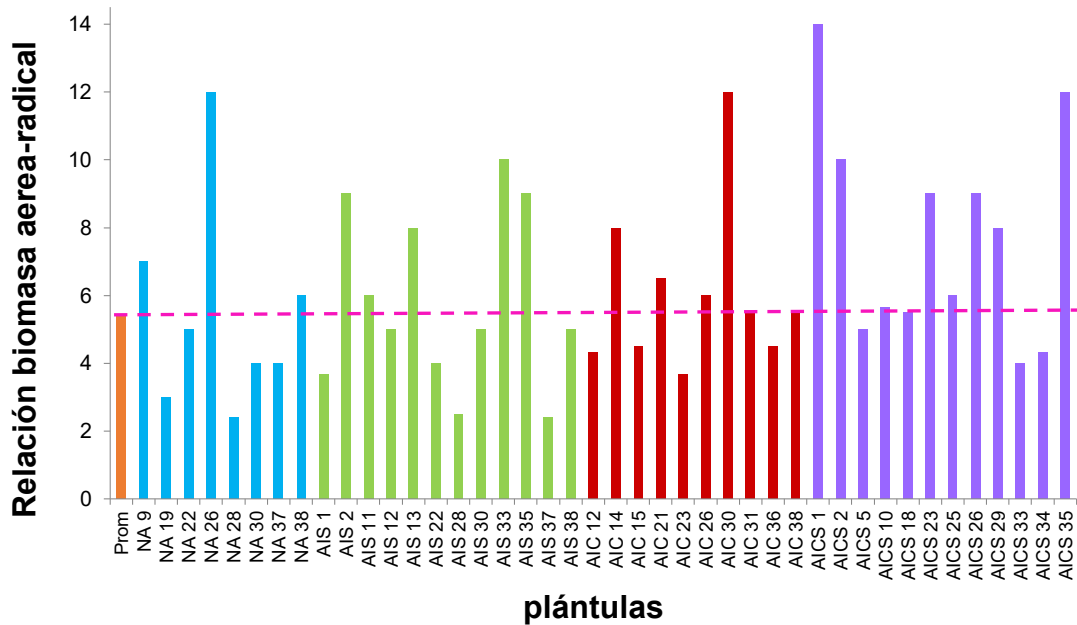


Figura 14. Relación biomasa seca aérea-radical en plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

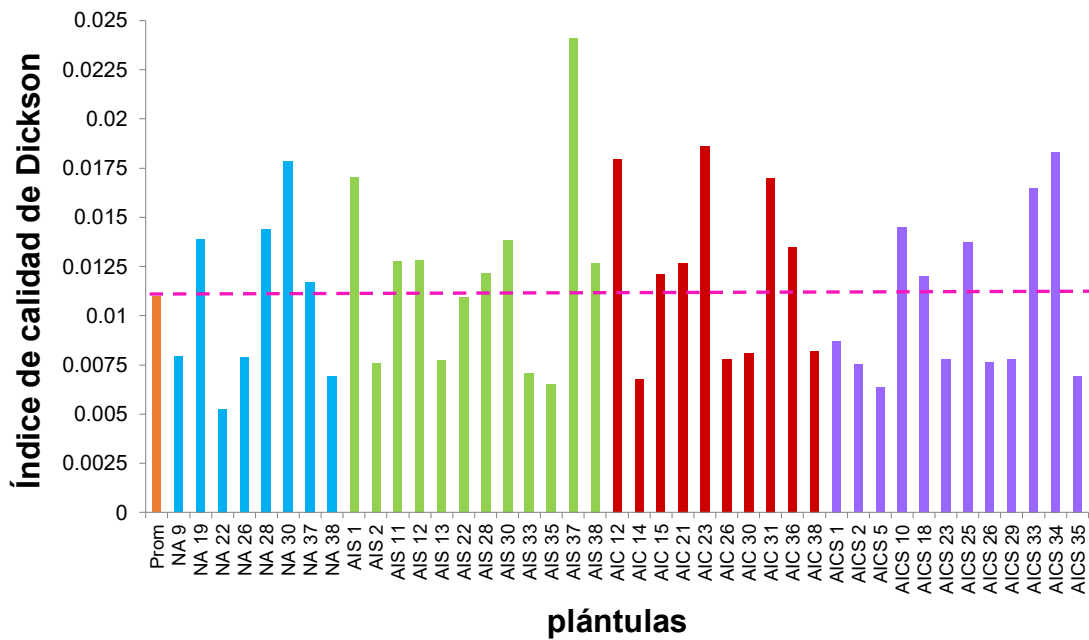


Figura 15. Índice de calidad de Dickson en plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

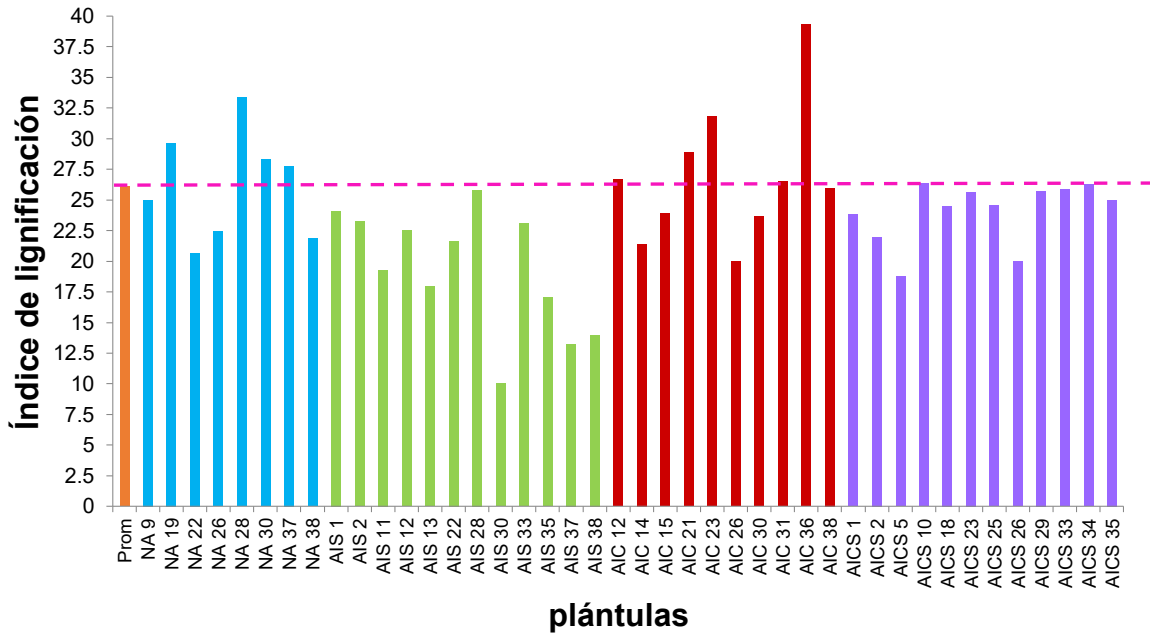


Figura 16. Índice de lignificación en plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio. NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

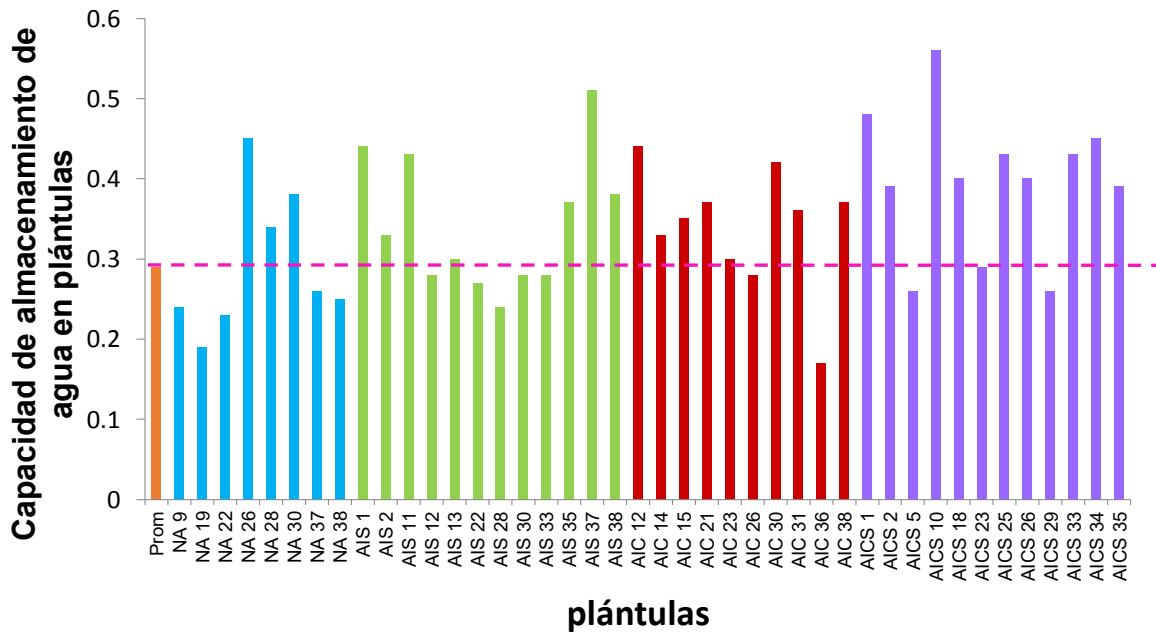


Figura 17. Capacidad de almacenamiento de agua en plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio; NA: sitio no afectado; AIS: sitio afectado por incendio superficial; AIC: sitio afectado por incendio de copa; AICS; sitio afectado por incendio de copa severo.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 Efecto de los incendios en las propiedades hídricas y físicas de los suelos

#### *Hidrofobicidad*

La hidrofobicidad superficial en suelos de NA es fuertemente repelente, lo cual se debe a que de los pinos generan hojas resinosas. Las resinas tardan en degradarse y son repelentes al agua. Tesler *et al.* (2008) y Zavala *et al.* (2014), mencionan que de manera natural existe repelencia superficial en suelos bajo vegetación de pino. En Alemania, se ha registrado bajo bosque de coníferas en estado natural, una repelencia promedio de 230 s (fuertemente repelente) (Butzen, *et al.*, 2015) y en España, Zavala *et al.* (2014) encontraron repelencia extrema. Es de destacar que a mayor profundidad del suelo la hidrofobicidad disminuye por que las resinas ya están más degradadas, lo cual también fue encontrado por Tesler *et al.* (2008).

El incendio superficial disminuyó la hidrofobicidad en la superficie del suelo, debido a que a altas temperaturas se destruyen los compuestos hidrófobos (DeBano 2000). Al respecto Orozco-Méndez (2015) reportó que en esta zona se alcanzó una temperatura de 250°C.

El incendio de copa ocasionó una disminución de la hidrofobicidad en la capa superficial, ya que alcanzó temperatura de 600°C (Orozco-Méndez, 2015); o bien, se perdió la capa de cenizas por erosión. Sin embargo, entre uno y dos centímetros mantuvo una alta repelencia, probablemente porque la caída de las hojas quemadas generó nuevamente una capa hidrófoba.

En AICS se nota que ha ocurrido erosión, y con ello la pérdida de la capa superficial, ya que la estructura del suelo de cero a dos centímetros de profundidad es similar a la capa de dos a cuatro centímetros del NA, y por ello presentó una alta repelencia en la superficie.

### *Infiltración*

En AIC y AICS la infiltración disminuyó en un 64 y 67% respectivamente, respecto al sitio no afectado. En la misma zona de estudio Aviña-Hernández (2015) registró una menor tasa de infiltración en los sitios afectados por incendio de mayor severidad. Esto concuerda con Ubedax y Sala (1996) y Ángeles-Cervantes (2010), ya que mencionan que a mayor severidad de incendios se reduce la tasa de infiltración.

La reducción de la tasa de infiltración en AIC y AICS puede deberse a que en estas condiciones la falta del estrato arbóreo, así como el color negro del suelo, permiten que la temperatura del suelo sea mayor, y genera que los gases del suelo ejerzan una presión para salir, por lo tanto, se limita la entrada de agua. Este proceso se puede explicar mejor con la figura 18 donde se muestran las condiciones en las que se encuentran los sitios de estudio.

### *Densidad aparente y porcentaje de humedad*

La densidad aparente del suelo no se modificó significativamente por incendios en suelo bajo *P. cembroides*, lo que contrasta con Florencia (2010) que en Argentina, registró una  $D_a$  de  $0.50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos bajo bosque de *Austrocedrus chilensis*; en tanto que en suelos afectados por incendio de baja y alta severidad fue de  $0.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $0.60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

En bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional el Chico (Ángeles-Cervantes, 2010); reportó una  $D_a$  de  $0.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; mientras que en suelos afectados por incendio superficial, moderado y severo, fue de  $0.81 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $0.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $0.72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente. En el estado de Michoacán, en suelo bajo bosque de coníferas de *Pinus- juniperus- Quercus- Alnus*, se registró en promedio  $1.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , mientras que suelos afectados por incendio de baja y alta severidad fue de  $1.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente (Jordán, *et al.*, 2011).



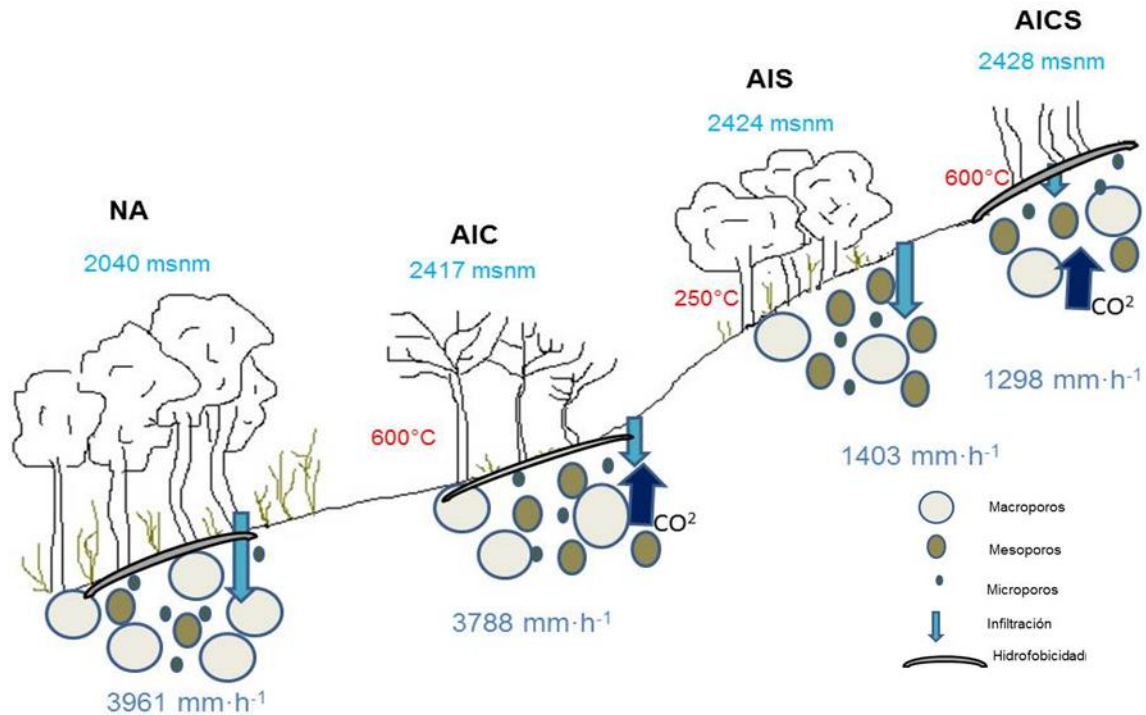


Figura 18. Diagrama de las características de sitios afectados por incendio, en un bosque de piñón-junípero, Cardonal, Hidalgo.

### *Micromorfología del suelo (estructura y porosidad)*

Poco se conoce sobre la morfología del suelo bajo bosques y sitios afectados por incendios forestales. En este estudio, la porosidad total fue similar en todos los sitios, sin embargo los cambios morfológicos, se presentaron principalmente en la estructura y tamaño de poros.

En el sitio NA, principalmente se observan agregados de bloques subangulares con poros de empaquetamiento compuesto, los cuales se forman por la actividad biológica. Este tipo de estructura, es similar a lo reportado por Hernández-Ordoñez (2014), quien bajo bosque de *Quercus sp.* registró agregados de tipo migajoso, granular, bloques subangulares y poros de empaquetamiento compuesto. Por otra parte, Ángeles-Cervantes (2010) bajo bosque de *Abies regiligiosa*, registró agregados de bloques subangulares y poros de tipo fisuras. Por lo tanto, se puede inferir que este tipo de estructura es característica de sitios bajo bosque de coníferas.

El incendio superficial modificó principalmente en la porosidad, ya que disminuyó el porcentaje de macro y microporos, pero se generó un aumento de la mesoporosidad, lo que permitió ofrecer una mayor cantidad de agua disponible para las plántulas. Sin embargo, al no generar poros de transmisión ( $\geq 500 \mu\text{m}$ ) no modificó la tasa de infiltración, la cual es similar a la de NA.

Los incendios de copa y copa severo presentaron un cambio en la estructura del suelo; puesto que, se generaron mayor cantidad de microagregados. Esto se atribuye a la temperatura alcanzada en ambos sitios, que de acuerdo con Orozco-Méndez (2015) fue de  $600^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura propició la expansión del aire atrapado en los poros, y generó microexplosiones que disgregaron el material (Ángeles-Cervantes, 2010).

#### *Capacidad de retención de humedad*

En sustratos de sitios afectados por incendio, no se han realizado estas pruebas; sin embargo, se observó que en los sitios postincendio el agua disponible para las plántulas fue mayor.

## **7.2 Germinación, emergencia y supervivencia de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio**

### *Germinación y emergencia*

En los suelos de sitios AIS, AIC y AICS la velocidad y el porcentaje total de germinación y emergencia fueron mayores que en el suelo de NA. La mayor velocidad de germinación en los suelos postincendio puede atribuirse a la cantidad de agua disponible, ya que el proceso de germinación requiere principalmente de humedad (Salisbury, 1992; Khan, 2013; Mc Donald, 2010).

El efecto de los suelos postincendio, fue similar al obtenido por Sandoval *et al.* (2001), quienes utilizaron *peat most*, riego ilimitado y un polímero; por lo que se puede considerar que los incendios generaron suelos adecuados para la germinación, incrementando su velocidad (10 días), en contraste con el NA (que fue a los 23 días). La CONAFOR (2015) señala que la germinación, en laboratorio, ocurre a los 17 días.

Las plántulas de *Pinus cembroides* obtenidas en este estudio, registraron un mayor número y longitud de cotiledones que lo reportado para la misma especie, en procedencias cercanas a la zona. Romero-González (2005) registró de 9 a 10 hojas y longitudes promedio de 1.44, 1.35, 1.12, 1.25 y 1.40 mm en la Mesa, San Miguel Tlazintla, el Arenalito, Pontadho y el Porvenir, respectivamente. Esto se atribuye a la variabilidad genética, ya que los conos y semillas son recolectados en la misma zona, pero en diferentes años. Esto coincide con Ángeles-Cervantes (1984), quien encontró para una misma localidad, que el tamaño y peso de semillas varía a lo largo de un gradiente altitudinal.

En el cerro de la Soledad, habían prevalecido años secos y nula producción de semillas, lo que permitió a los árboles almacenar sus recursos, posteriormente cuando las condiciones fueron favorables, se produjeron semillas más grandes con embriones más grandes, que produjeron plántulas más grandes. Daskalokou y Thanos (2010), mencionan que la supervivencia en *Pinus halepensis* es mayor cuando el tamaño y número de cotiledones aumenta.

### **7.3 Supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides***

El mayor porcentaje de supervivencia se obtuvo en AIS (85.71%) y AICS (92.30%) y se relacionó con la disponibilidad de agua en estos suelos; ya que el agua disponible es de 16 y 14%, respectivamente. Al respecto Johnstone y Chapin III (2006) también registraron mayor supervivencia en sitios afectados por incendio, la mayor supervivencia se localizó en sitios húmedos con buen drenaje, (aunque no mencionan la severidad de los incendios).

Al incrementarse la velocidad de germinación y emergencia de plántulas en los suelos de AIS, AIC y AICS, también se incrementó el crecimiento de las plántulas, debido a que tenían mayor porcentaje de agua disponible en el suelo, lo que influyó en un mayor crecimiento; y por lo tanto, las plántulas presentaron una altura mayor que las plántulas de suelo de NA. Además, Orozco-Méndez (2015) registró una mayor concentración de fósforo (0.5, 0.22 y 0.6 ppm para AIS, AIC y AICS, respectivamente) y 0.04 ppm en NA; lo que influyó en el crecimiento de la planta (Marschner, 2012).

En los tres suelos postincendio la parte aérea creció más que la raíz, (Figura 19); mientras que en las plántulas del suelo de NA ocurrió lo contrario, pero la biomasa total fue similar en todas las condiciones; ya que, la planta puede asignar estos recursos para el desarrollo de la raíz o para el desarrollo de la parte aérea (Córdoba *et al.*, 2011). Lo cual ha sido reportado para otras especies, por ejemplo: *Genista umbellata* y *Lycium intricatum* las cuales elongan su raíz cuando existe una disminución de agua disponible pero la biomasa es la misma (Padilla, 2008).

Las plántulas en los suelos afectados por incendio de todas las severidades, registraron una altura promedio similar con lo reportado por Lima-Rojas (2008) que a cinco y siete meses de cultivo obtuvo 7.97 y 8.98 cm, respectivamente, en sustrato 1:1:1 de *peat most-agrolita-vermiculita*. Por otra parte, en sustrato de turba-musgo y tierra lama (16 tratamientos diferentes), *Pinus cembroides* alcanzó una altura promedio de 10.9 cm a los cuatro meses de cultivo (Sandoval *et al.*, 2001).

Los diámetros de las plántulas registrados en NA, AIS, AIC y AICS, son bajos de acuerdo con los registros nacionales. Lima-Rojas (2008) registró un diámetro promedio de 2.64 mm a los cinco meses de cultivo; Gutiérrez *et al.* (2015) reportó 4.61 mm a los 9.5 meses de cultivo y Sandoval *et al.* (2001) registraron 2.2 mm a los 4 meses de cultivo; mientras que Gonzáles *et al.* (2005) obtuvieron un diámetro promedio de 1.59 mm a un mes de cultivo para *Pinus cembroides var. cembroides*. Sin embargo, estos estudios no mencionan si el tallo esta lignificado o no, puesto que se observó que cuando la plántula acaba de emerger el tallo (aun verde) tiene mayor diámetro.

La biomasa total seca en plántulas de *Pinus cembroides* es similar a lo registrado por Lima-Rojas (2008), quien obtuvo un valor promedio de 0.37 g en plántulas de cinco meses de cultivo; y Sandoval *et al.* (2001) reportaron 0.41 g en plántulas de cuatro meses cultivo.

### *Índices de calidad de plantas*

No se encontraron diferencias significativas entre los índices de calidad de plantas entre el sitio no afectado y los tres sitios afectados por incendio, por lo que, para este estudio de pino piñonero parece no funcionar. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento de agua en las plántulas que crecieron en suelos postincendio, incrementó a mayor severidad de incendios; por lo que, se propone que para cada especie y lote de cultivo (producido bajo condiciones óptimas), se realicen criterios específicos en cuanto a la calidad de planta.

Los estudios que se realizan para producir plántulas de buena calidad se basan en el mejoramiento de atributos morfológicos y fisiológicos; implementando diferentes sustratos, micorrizas, fertilizantes, diversos tamaños y materiales de envases, etc. Sin embargo, se dejan de lado las características morfofisiológicas de la especie y las condiciones naturales a las que estarán expuestas.

Es por ello que los valores de índices de calidad en este experimento son bajos en relación con lo obtenido en otros estudios de *Pinus cembroides*, por ejemplo: Gutiérrez *et al.* (2015); González *et al.* (2005); Sandoval *et al.* (2001) y Lima-Rojas (2008), lo cual no quiere decir en suelos postincendio la calidad sea baja o mala, pero brinda información valiosa sobre el crecimiento de plántulas de esta especie.

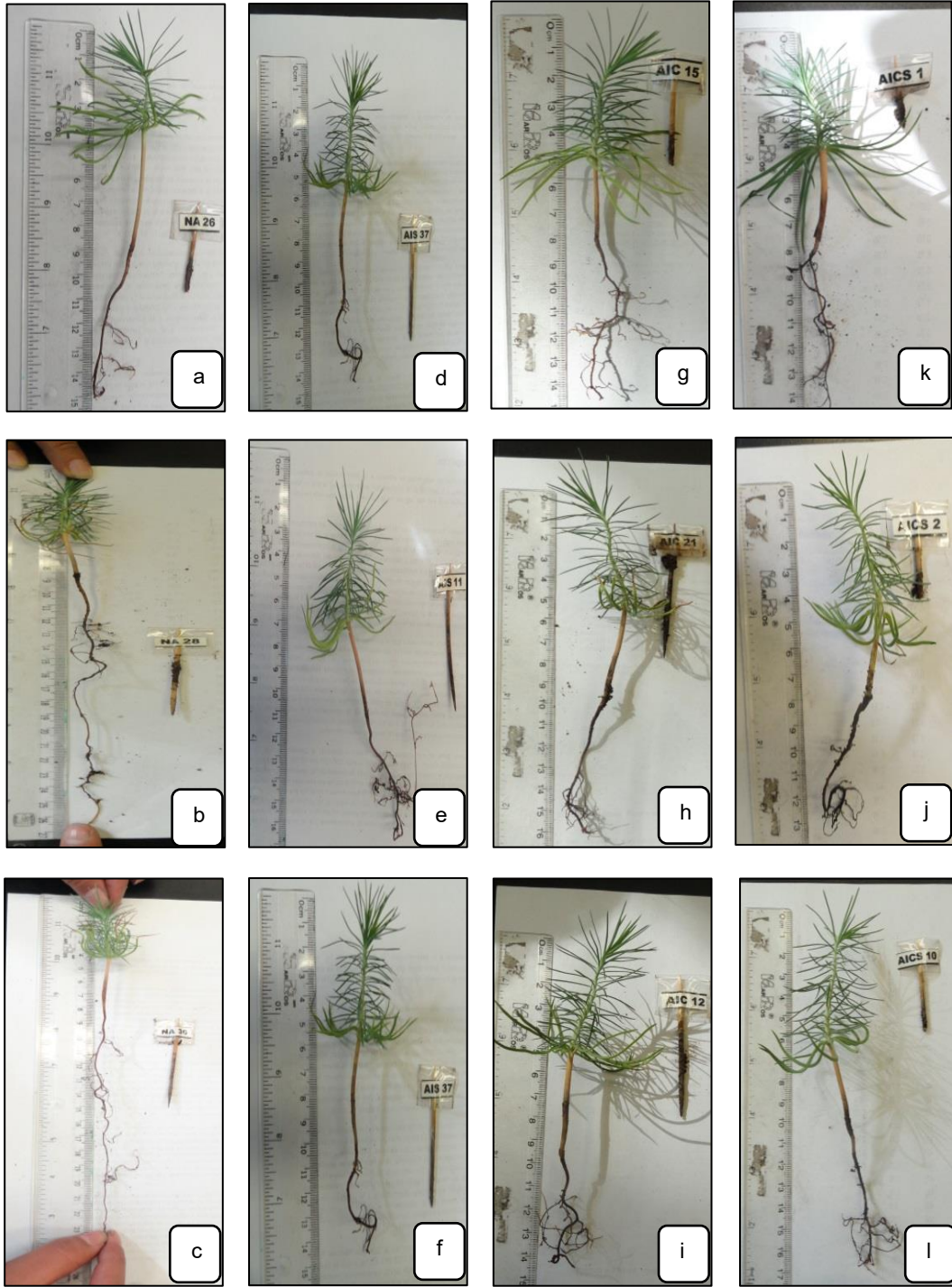


Figura 19. Altura aérea y longitud radical de plántulas de *Pinus cembroides* en suelos postincendio: NA: Sitio no afectado(a, b, c); ASI: Afectado por incendio superficial (d, e, f); AIC: Afectado por incendio de copa (g, h, i) y AICS: Afectado por incendio de copa severo (j, k, l).

## 8. DISCUSIÓN GENERAL

En suelos bajo bosque de piñón-junípero existe hidrofobicidad fuertemente repelente en la superficie, debido a la resina que emite la hojarasca de *P. cembroides* y *Florenzia resinosa*. Por otra parte, la infiltración en este suelo, es muy rápida debido al alto porcentaje de macroporos, lo que también permite un mayor crecimiento longitudinal de la raíz. La disminución del porcentaje de mesoporos, disminuye la acumulación de agua y ocasiona que no se desarrollen raíces secundarias; que en conjunto explica el menor crecimiento en altura aérea, biomasa total seca y capacidad de almacenamiento de agua en plántulas.

En los suelos de sitios AIS y AIC, la hidrofobicidad superficial disminuye a no repelente y ligeramente repelente, respectivamente; mientras que en AICS permanece fuertemente repelente por que la capa superficial en este suelo se perdió por erosión.

En los tres sitios postincendio principalmente cambia la estructura y porosidad del suelo: ya que en los microporos (dentro de macroagregados) están ocupados con aire, que con la temperatura que alcanza el suelo (250-600°C), se expanden y generan pequeñas explosiones formando microagregados.

La estructura que se forma disminuye el porcentaje de macroporos y microporos, pero incrementa el de mesoporos; lo cual reduce la infiltración, y permite que el agua disponible para las plántulas sea mayor, porque el arreglo de las partículas de suelo (más pequeñas) permite que el agua tenga mayor superficie de contacto, y por lo tanto, la germinación, supervivencia y crecimiento de las plántulas incrementa. Además la presencia de mesoporos, promueve el desarrollo de raíces secundarias en un 40 y 50% más que el registrado en el NA.

De los tres sitios postincendio, el sitio afectado por incendio de copa severo, al presentar porcentajes de macro, meso y microporosidad en proporciones equilibradas, favorece el crecimiento de las plántulas en altura aérea, biomasa seca total y capacidad de almacenamiento de agua en plántulas; por lo que los bosques de *Pinus cembroides* afectados por incendios de mayor severidad pueden recuperarse.

## 9. CONCLUSIONES

- A mayor severidad de incendios, mayor es la modificación de las propiedades hídricas y físicas en suelos Leptosoles cálcicos.  
El incendio superficial y de copa forman microagregados y aumentan el porcentaje de mesoporos, disminuyen la hidrofobicidad superficial y la infiltración.  
Los incendios de copa severo también forman microagregados, y además generan equilibrio entre los diferente tamaños de poros.
- Los incendios generan cambios en la estructura y porosidad del suelo, lo que favorece la disponibilidad de agua para la germinación, emergencia, supervivencia y crecimiento de plántulas de *Pinus cembroides*,
- A mayor severidad de incendios, el crecimiento en altura aérea, biomasa seca total y capacidad de almacenamiento de agua es mayor.



## 10. LITERATURA CITADA

- Alvarado A. y Forsythe W., 2005, Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica, *Agronomía Costarricense* **29(1)**: 85-94.
- Ángeles-Cervantes E., 1984, Producción de semillas de un piñonar del estado de Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México. D.F.
- Ángeles-Cervantes, 2010, Efectos ecológicos de los incendios forestales sobre el bosque de Oyamel, Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Aviña-Hernández, 2015, Tratamientos mineralógicos para incrementar el éxito de reforestación con *Pinus cembroides* y otras coníferas. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México. D.F.
- Azcoa B., y Talon M., 2008, Concepto de hormona vegetal. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Graw Hill, España.
- Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), 2007. IUSS, Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Bewley D.J., Bradford K. J., H. Henk W., y Nonogaki H., 2013, Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy. *Springer*, New York. p.381.
- Bidwell R., 1979, Fisiología vegetal, 1ra Edición. Cano G. (Trad.) AGT Editor, S. A. México, D. F. 784 pp.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., 1985. Handbook for soil thin section description. *Waine Research Publications, Wolverhampton, UK.*
- Butzen V., Seeger M., Marruedo A., De Jonge L., Wengel R., Ries J. y Casper M., 2015, Water repellency under coniferous and deciduous forest-

- Experimental assessment and impact on overland flow, *Catena*. **133**: 255-265.
- Carrillo-Flores J., 2009, Estructura y regeneración de *Pinus cembroides* subs. *Orizabensis* D. K. Bailey en Santa María Las Cuevas, Tlaxcala. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Celis R., Peña, V., Cavazos L., y Aguirre J., 2010, Caracterización morfológica de las semillas y consumo de reservas durante la emergencia de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre y domesticado. Facultad de Agronomía, San Luis Potosí, México. **27**: 61-87.
- Cerdá A. y Doerr, S., 2008, The effect of ash and needle cover on Surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*. **74(3)**: 256-263.
- Certini Giacomo, Effects of fire on properties of forest soils: a review, *Oecología* **143**: 1-10.
- Cetina V., Sánchez S., 1989a, Efecto de la intensidad de luz en el desarrollo inicial de *Pinus cembroides* Zucc. Memorias del III Simposio de Pino Piñonero. p. 51-53.
- Cetina V., Sánchez S., 1989b, Efecto de la temperatura en la velocidad y en el porcentaje de germinación en *Pinus cembroides* Zuuc. Memorias del III Simposio de Pino Piñonero. p. 40-41.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2010, Incendios forestales: Guía práctica para comunidades, tercera edición, Jalisco, México. p. 5-15.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2015, recuperado en: [http://www.conafor.gob.mx/innovacion\\_forestal/?\\_zpz=993](http://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?_zpz=993) (consulta 12-04-2016).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2016, Reporte Semanal de Resultados de Incendios Forestales del 1 de enero al 10 de marzo de 2016. Recuperado en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=5855&grupo=10> (consulta 10-03-2016).

- Córdoba D., Vargas J., López J., Muñoz A., 2011, Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pincea* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencias* **45**: 493-506.
- Daskalokou E. y Thanos A., 2010, Postfire seedling dynamics and performance in *Pinus halepensis* Mill. Populations, *Acta Oecológica*, **36**: 446-453.
- DeBano L. F., 2000, Water repellency in soil: a historical overview. *Journal of Hydrology*. **4**: 4-32.
- Duque R., Arbeláez P., Jaramillo F. y León D., 2004, Hidrofobicidad en Andisoles bajo robedal (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Crupressus lucitancia*) en la cuenca de la quebrada piedras blancas (Medellín, Colombia). Facultad de Ciencias Agropecuarias de Colombia., Medellín, Colombia.
- Fernández G. y Johnston M., 2006, Crecimiento y temperatura, fisiología vegetal Eds. Squeo F.A. & Cardemil L., Universidad de la Serana 20, Chile. p. 1-28.
- Flannigan M., Stocks B.J. y Wotton B.M., 2000, Climate change and forest fires. *The Science of the Environment*, **262**: 221-229.
- Florencia M., 2010, Propiedades del suelo en bosques quemados de *Austrocedrus chilensis* en Patagonia, Argentina, *Bosque* **31(2)**: 140-149.
- Flores L. y Alcalá J., 2010, Manual de procedimientos analíticos, Laboratorio de Física de suelos, Instituto de Geología, UNAM. México. D.F. 56 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2009, Guía para la descripción de suelos, 4ta edición, (trad.) Ronald Vargas Rojas, Roma. 100 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2015. Recuperado en <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/> (consulta 23-04-2016).

- Gobbi M., Sancholuz L., 1992, Regeneración post-incendio del ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) en los primeros años, *Bosque* **13(2)**: 25-32.
- González A., García M., Cetina A., Vargas H. J., Trinidad S. y Romero M., 2005, Variación morfológica e índice de calidad en plantas de *Pinus cembroides* var. *cembroides* Zucc., *Revista Ciencia Forestal en México*. 20-44 pp.
- Guerra H. Eloisa., Cruz F. Gerardo, 2014, Métodos de evaluación y diagnóstico para agua y suelo, FES Zaragoza, UNAM. México. D.F.
- Gutiérrez J., Dante A., Rodríguez A., Villanueva A., García S., Romo J., 2015, Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. *Agrociencia*, **49**: 205-219.
- Gutiérrez. M., Ortiz C., (trad.), 1999, Manual para la descripción Micromorfológica de Suelos. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, México.
- Hernández-Ordoñez J., 2014, Diagnostico y habilitación de suelos forestales con presencia de manganeso-hierro, caso Villa del Carbón, Estado de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México. D. F.
- Herrera J., Alizaga R., Guevara E. y Jiménez V., 2006: Germinación y crecimiento de la planta, Fisiología de la producción de los cultivos tropicales **vol. 4**, Editorial Universidad de Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009, Prontuario estadístico municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Cardonal Hidalgo.
- Johstone J. y Chapin III S., 2006, Effects of Soil Burn Severity on Post-Fire Tree Recruitment in Boreal Forest, *Ecosystems*, **9**: 14–31.
- Jordán A., Zavala L., Mataix-Solera J., Nava A. y Alanis N., 2011, Effect of fire severity on water repellenc and aggregate stability on Mexican Volcanic soils, *Catena* **84**: 136-147.

- Khan T. O., 2013, *Forest Soils, Properties and Management*. Springer.
- Kucera B., Cohn M. y Leubrier Metzger G. 2005, Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. *Seed Science Research*.**15**: 281-307.
- Lima-Rojas L. 2008: Producción de *Pinus greeggi* y *Pinus cembroides* con *Pisolithus tinctorius* y su relación con la calidad. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Lipiec J., Wójciga A. y Horn R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil y Tillage Research* **103**: p.170-177.
- Lloret F., 2004, Régimen de incendios y Regeneración. En: Valladares, F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid, España. p. 101-125.
- López F., 2000. Relaciones hídricas en el continuo agua–suelo–planta–atmósfera. Universidad Nacional de Colombia. 88 pp.
- Maderey L., 2005, Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. Serie Textos Universitarios 1, México. D.F.
- Mari, E. y Galassi M., 2010, ¿Factores ambientales o herbívora controlan la emergencia de plántulas en un bosque fluvial del río Paraná?, *Asociación Interciencia*, Caracas, Venezuela **35(8)**: 605-612.
- Marín-García S. M., 2016, El papel del fuego en el repoblamiento de *Pinus cembroides* Zuuc. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México. D. F.
- Marschner P., 2012, Mineral nutrition higher plant, third edition, Academic Press is an imprint of Elsevier. USA.

- Mayor A., Bautist S., Llovet J., Bellot J., 2007, Postfire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: seven years of catchment-scale, *Catena*, **71**: 68-75.
- McDonald M., 2010, Physiology of Seed Germination, Department of Horticulture and Crop Science, USA.
- Méndez-Hernández J., 2009, Análisis del impacto del fuego en la regeneración sexual del pino canario a lo largo de una cronosecuencia de incendios en la Isla de la Palma (Canarias). Tesis de doctorado, Universidad de la Laguna, España.
- Meraz G. y Bonilla B., 2000, Análisis y tratamientos pregerminativos en las semillas de *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus durangensis* Mart., *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Universidad Autónoma Chapingo, México. **6(1)**: 15-20.
- Morales-Bautista J., 2013, Propuesta de administración Silvícola para la producción de piñón en el ejido la Florida, Cardonal, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Muñoz H., Sáenz J., Coria V., García J., Hernández J. y Manzanilla G., 2014, Calidad de planta en el vivero forestal, La Dieta Municipio de Zitácuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* **6(27)**: 72-89.
- Murphy, C. P., 1986. Thin section preparation of soils and sediments. Academic. Berkhamsted, UK.
- Neary D., Ice G., Jackson R., 2009, Linkages between forest soil and water quantity and quality. *Forest Ecology and Management*. **258**: 2264-2281.
- NOM-021-RECNAT, 2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, D.F. México. 85 pp.

- Olivo V. y Buduba. C., 2006, Influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. *Bosque*, Argentina. **27(3)**: 267-271.
- Orozco-Méndez M., 2015, Incendios y su efecto en los minerales del suelo en un bosque de pino piñonero. En: Memorias del 11° Congreso de Investigación, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México. D.F.
- Padilla F., 2008, Factores limitantes y estrategias de establecimiento de las plantas leñosas en ambientes semiáridos. Implicaciones para la restauración. *Ecosistemas*, **17(1)**: 155-159.
- Pichardo-Arriaga A., 2012, Aprovechamiento de agua residual en la producción de plántula de Pino (*Pinus cembroides*) en sustratos hidropónicos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México.
- Pompa-Castillo E., 2015, Efecto de los incendios sobre la diversidad florística en el Bosque de pino piñonero en Cardonal, Hidalgo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México. D.F.
- Prieto R., 2004. Factores que influyen en la producción de planta de *Pinus* spp. en vivero y en su establecimiento en campo. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Raven P., 1992, Biología de plantas. Editorial Reverté S.A. España.
- Rodríguez D. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa. México, D. F. 156 pp.
- Romero A., García Mya E., Françoise Passini M., 1996, *Pinus cembroides* s. l. y *Pinus johannis* del Antiplano Mexicano: una síntesis. *Acta botánica Gallica: Bonaty Letter*, **143(7)**: 681-693.
- Romero-González O., 2005, Variación morfológica de conos y semillas de cinco procedencias de *Pinus cembroides* Zuuc en Hidalgo, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

- Rzedowsky J., 2006, Vegetación de México, 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. D.F.
- Sáenz J., Muñoz H., Pérez C., Rueda A., Hernández J., 2014, Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero "Morelia, estado de Michoacán. Nota científica.
- Salisbury F. y Clean R., 1992, Plant physiology. 4ta Edition. González X. (Trad). Editorial Wadsworth Publishing. México. D.F. 759 pp.
- Sandoval C., Cetina M., Yeaton R., Mohedano L., 2001, Sustratos y polímeros en la producción de planta de *Pinus cembroides* Zucc. bajo condiciones de invernadero, Revista Chapingo, *Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **6(2)**: 143-150.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2013, Incendios Forestales en México, temporada 2013. México. D.F. 21 pp.
- Shvidenko A. y Nilsson S., 2000, Extent, distribution, and ecological role of fire in Russian forest. En: Kasischte E. y Stocks B. (Eds.) Fire, climate change, and carbon, cycling in the boreal forest. Springer-Verlag, New York. p. 132-150.
- Stoops G., 2003, Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Society of America, Madison, Wisconsin, USA.*
- Tesler N., Wittenberg L., Malkinson D., Greenbaum N., 2008, Fire effects and short-term changes in soil water repellency-Mt. Carmel, Israel. *Catena*. **74**: 185-191.
- Ubeda X. y Sala M., 1996, Cambios en la física de suelos e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio Forestal, En: Grandal d'A. y Pagés V. (Eds.) IV Reunión de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología O Castro (A Coruña). p. 559-572.



- United States Department of Agriculture (USDA), 2001, Soil Quality Test Guide USDA, Agricultural Research Service Natural Resources Conservation Service Soil Quality Institute. 82 pp.
- Vázquez C., Batis, M., Alcocer, M., Gual M. y Sánchez C., 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto de Ecología, UNAM. México. D.F.
- Vega H., Perez P., Fonturbel M., Cuiñas M., Fernández C., Hernando C. y Guijarro M., 2004, Efectos de diferentes niveles de severidad del fuego sobre la emergencia y mortalidad inicial de plántulas de *Pinus pinaster* Ait. Departamento de Protección Ambiental, Madrid, España.
- Villar S., 2003, Importancia de la calidad de planta en los proyectos de revegetación, En: Rye-Benayas J.M., Espigares P.T., Nicolau I. J. Restauración de Ecosistemas Mediterráneos, Universidad de Alcalá, España. p. 65-86.
- Villers L. y López B., 2004. Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche, En: Villers L. y López B. (Eds.) Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
- Wightman K. y Cruz S., 2003, La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de plantas. *Foresta Veracruzana*. **5(1)**: 41-51.
- Zavala L., García J., Gordillo A., Jordán A. y Mataix-Solera J., 2014, Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma* **226–227**: 170–178.