



Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

División de Estudios de Posgrado e Investigación

**REGENERACIÓN NATURAL POST-INCENDIO DE BOSQUES DE PINO-ENCINO,  
CASO NEJAPA DE MADERO, OAXACA**

TESIS QUE PRESENTA

Rosario Aquino López

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS**

DIRECTOR:

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo

CO-DIRECTOR

Ángel Bustamante González



---

Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca.  
Agosto de 2023.







Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

División de Estudios de Posgrado e Investigación

**REGENERACIÓN NATURAL POST-INCENDIO DE BOSQUES DE PINO-  
ENCINO, CASO NEJAPA DE MADERO, OAXACA**

MAESTRIA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

TESIS QUE PRESENTA

Rosario Aquino López

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN  
AGROECOSISTEMAS**

DIRECTOR:

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo



---

Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca.  
Agosto de 2023.

La presente tesis titulada: **Regeneración natural post-incendio de bosques de pino-encino, caso Nejapa de Madero, Oaxaca**, fué realizada bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS**

DIRECTOR

DR. ERNESTO CASTAÑEDA HIDALGO



CO-DIRECTOR

DR. ÁNGEL BUSTAMANTE GONZÁLEZ



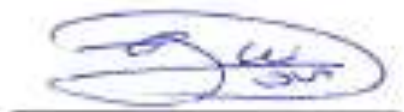
ASESOR

DR. GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ



ASESORA

DRA. GISELA M. SANTIAGO MARTÍNEZ



ASESOR

DR. SALVADOR LOZANO TREJO





Nombre de la Información Documentada:  
Formato Autorización de DEPI para entrega  
de Tesis.

Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.2.1,  
8.2.2, 8.2.3, 8.5.2

Código: ITVO-AC-PR-08-03

Revisión: 1

Página 1 de 1

Nazareno Xoxocotlan, Oaxaca, **30 Junio/2023**

OFICIO No DEP/0524/2023 (Mayúsculas)

**C. ROSARIO AQUINO LÓPEZ**  
**ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**  
**EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS**  
**PRESENTE**

Con base en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, respecto a la presentación del examen de grado, me es muy grato comunicarte que esta División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo, **AUTORIZA** la entrega del documento final de su tesis en formato digital (PDF) titulada: **"REGENERACIÓN NATURAL POST-INCENDIO DE BOSQUES DE PINO-ENCINO, CASO NEJAPA DE MADERO, OAXACA"**.

Cuyo contenido ha sido revisado y aprobado por su Comité Tutoral y cumple en lo general con el formato establecido para este documento, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Productividad de Agroecosistemas.

Sin más por el momento le felicito cordialmente por el logro de esta meta y le reitero el respaldo institucional de su Alma Mater.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*  
**"Ciencia y Tecnología para el Cambio"**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DE OAXACA**

**DR. GUSTAVO OMAR DÍAZ ZORRILLA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), a través del número de becario (1153828), con el tema de investigación: **Regeneración natural post-incendio de bosques de pino-encino, caso Nejapa de Madero, Oaxaca.**

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo general .....	4
1.2 Objetivos específicos .....	5
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 Los incendios forestales .....	6
2.2 Ecosistema de pino-encino .....	8
2.3 Efecto de los incendios en la vegetación .....	9
2.4 Efecto de los incendios en la regeneración natural .....	11
2.5 Relación fuego-regeneración pino-encino .....	11
2.6 Efectos de los incendios forestales en la provisión de servicios .....	14
2.7 Importancia de la calidad de planta post-incendio .....	15
2.7.1 Parámetros morfológicos que influyen en la calidad de planta .....	16
2.8 Índices de calidad de planta .....	17
2.9 Biomasa en el piso forestal .....	20

**CAPÍTULO III. CALIDAD MORFOLÓGICA DE LA REGENERACIÓN NATURAL  
POSTINCENDIO DE *Pinus douglasiana* Martínez DEL SUR DE  
OAXACA.....22**

Resumen.....	22
Abstract.....	23
3.1 Introducción.....	24
3.2 Metodología .....	26
3.2.1 Descripción de área de estudio.....	26
3.2.2 Selección de los sitios de muestreo. ....	26
3.2.3 Selección de las plantas.....	27
3.2.5 Análisis de datos. ....	29
3.3 Resultados .....	29
3.3.1 Índices de calidad de planta.....	29
3.4 Discusión.....	34
3.5 Conclusiones.....	40
3.6 Agradecimientos .....	41
3.7 Literatura citada .....	41

**CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA REGENERACIÓN Y PISO FORESTAL EN  
RODALINCENDIADO DEL SUR DE MÉXICO .....46**

Resumen.....	47
Abstract.....	48
4.1 Introducción.....	48
4.2 Métodos .....	50
4.2.1 Área de estudio.....	50
4.2.2 Sitios de muestreo .....	51
4.2.3 Inventario dasométrico arbóreo y muestreo del piso forestal.....	51
4.2.4 Análisis de laboratorio.....	53
4.2.5 Análisis de datos.....	53
4.3 Resultados .....	54
4.3.1 Biomasa superficial y arbórea.....	54



4.3.2 Estructura residual de los árboles adultos .....	56
4.3.3 Condiciones de la regeneración natural pino-encino .....	56
4.4 Discusión.....	59
4.4.1 Biomasa superficial .....	59
4.4.2 Estructura residual de los árboles adultos .....	60
4.4.3 Distribución espacial y condiciones de la regeneración natural .....	61
4.5 Conclusiones.....	63
4.6 Agradecimientos .....	63
4.7 Contribución por autor.....	64
4.8 Referencias .....	64
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>70</b>
<b>CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFÍA GENERAL .....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
3.1	Intervalos para determinar la calidad de planta en especies forestales.....	29
3.2	Análisis de varianza del efecto del fuego por severidad sobre la regeneración natural.....	30
3.3	Efecto de la severidad de incendio sobre los índices de calidad morfológica.....	30
4.1	Resumen del análisis de varianza del efecto del nivel de severidad de incendio sobre la biomasa del piso forestal.....	54
4.2	Efecto de la severidad de incendio sobre la biomasa del piso forestal, arbolado residual y regeneración natural.....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
3.1	Localización del área de estudio y niveles de severidad de incendio en Agua Blanca, Nejapa de Madero.....	26
3.2	Efecto de la severidad de incendio sobre los índices morfológicos de la regeneración.....	32
3.3	Clasificación de la regeneración <i>P. douglasiana</i> de acuerdo a su calidad morfológica y condiciones del sitio.....	33
4.1	Localización del área de estudio y sitios de muestreo en los diferentes niveles de severidad de incendio en Agua Blanca, Nejapa de Madero.....	52
4.2	Densidad de árboles por categoría diamétrica de <i>P. douglasiana</i> después del incendio. Nivel de severidad del incendio A) = bajo B) = medio C) =alto.....	57
4.3	Índice de distribución espacial L(t) de la regeneración natural. Nivel de severidad de incendio A) = bajo B) = medio C) =alto.....	58

## RESUMEN

El comportamiento de los incendios forestales varía por diversos factores, entre los cuales el nivel de severidad que condiciona la respuesta que tendrán los ecosistemas ante el fuego, principalmente la capacidad para regenerarse. Debido a esto surge la necesidad de evaluar el efecto post-incendio forestal sobre la calidad morfológica de la regeneración natural, la estructura residual y piso forestal, en el bosque de Agua Blanca Nejapa de Madero, Oaxaca. Se ubicaron 12 sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup>, en tres áreas con diferente condición de severidad de incendio (alto, medio y bajo). Se realizó un muestreo destructivo a plantas de 2 años de edad de *P. douglasiana*, determinando índices morfológicos de calidad, se realizó un inventario dasométrico arbóreo y del piso forestal para determinar su biomasa finalmente se registró las coordenadas (X, Y) de la regeneración natural para determinar su distribución espacial. Los resultados del nivel de severidad de incendio y calidad morfológica muestran efectos negativos y positivos en los índices de calidad, de acuerdo a la relación, altura y longitud de raíz, índice de lignificación e índice de Dickson en los tres niveles de severidad de incendio se presentó una buena calidad de planta; para la biomasa aérea, biomasa subterránea e índice de esbeltez, las plantas mostraron baja calidad. En cuanto a la biomasa total capturado en los compartimentos los resultados arrojaron que en el área de severidad de incendio alto almacena mayor biomasa específicamente en el material muerto superficial y que los árboles con mayor grosor y altura en el nivel de severidad bajo son los que más biomasa capturan. Se encontró que el incendio al haber pasado de un nivel bajo a un nivel de incendio alto la regeneración se promueve en un promedio de 434.37%. La distribución de la misma corresponde a un patrón agregado en los tres niveles. Este estudio es una contribución a la escasa investigación sobre la evaluación de la regeneración natural post-incendio y es un inicio para realizar actividades y proyectos de restauración y manejo adecuado de ecosistemas posincendio.

**Palabras clave:** Biomasa, calidad, incendios, morfológica, regeneración.

## SUMMARY

The behavior of forest fires varies due to various factors, including the level of severity that determines the response that ecosystems will have before the fire, mainly the ability of forests to regenerate. Due to this, the need arises to evaluate the post-forest fire effect on the morphological quality of natural regeneration, the residual structure and forest floor, in the Agua Blanca Nejapa de Madero forest, Oaxaca. Twelve demonstration sites of 400 m<sup>2</sup> were located in three areas with different fire severity conditions (high, medium and low). A destructive test was carried out on 2-year-old *P. douglasiana* plants, determining morphological quality indices, a tree and forest floor dasometric inventory was carried out to determine their biomass, finally the coordinates (X, Y) of natural regeneration were produced. to determine its spatial distribution. The results of the fire severity level and morphological quality show negative and positive effects on the quality indices, according to the ratio, root height and length, lignification index and Dickson index in the three fire severity levels. it presented a good plant quality; for aerial biomass, underground biomass and slenderness index, the plants showed low quality. Regarding the total biomass captured in the compartments, the results showed that in the fire severity area it stores more biomass, specifically in the superficial dead material and that the trees with the greatest thickness and height in the low severity level are the ones with the most biomass. they capture. It was found that the fire, having gone from a low level to a high fire level, regeneration is promoted by an average of 434.37%. Its distribution corresponds to an aggregate pattern at the three levels. This study is a contribution to the scarce research on the evaluation of post-fire natural regeneration and is a start to carry out restoration activities and projects and proper management of post-fire ecosystems.

**Keywords:** Biomass, quality, fires, morphological, regeneration.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Los recursos forestales constituyen un patrimonio nacional que es prioritario conservar por su enorme capacidad de generar beneficios ecológicos y socioeconómicos (Durán *et al.*, 2014). Sin embargo, a nivel mundial la pérdida neta de superficie forestal disminuyó de 7.8 millones de ha/año, en la década de 1990 y a 4.7 millones de ha durante el período 2010-2020, debido a las diversas actividades antropogénicas y perturbaciones naturales derivados del cambio climático (FAO y PNUMA, 2020).

En México los incendios ocupan la tercera causa de pérdida de bosques tan sólo por debajo de la tala ilegal y los cambios de uso de suelo forestal a terrenos agrícolas y ganaderos (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2011), registrándose al año un promedio de 8,000 incendios forestales, siendo el Estado de Oaxaca una de las entidades con mayor extensión de pérdida de vegetación por incendio (CONAFOR, 2021).

La presencia y el comportamiento de un incendio en la vegetación pino-encino varía por diversos factores, entre los cuales el nivel de severidad, intensidad y duración que impone la respuesta que tendrá el ecosistema ante el fuego, como la capacidad de regenerarse naturalmente (Flores *et al.*, 2021). Después del régimen de un incendio los bosques tienden a sufrir cambios inmediatos en los patrones de distribución del arbolado residual y en la variación de las características de la estructura forestal que modifican el grado de competencia, crecimiento y regeneración del bosque a mediano plazo (Rubio-Camacho *et al.*, 2017). En gran medida la composición, calidad y continuidad del bosque dependen del éxito adecuado del renuevo incorporado por la regeneración lo que la convierte en uno de los procesos más importantes en el ciclo de vida del ecosistema (Moreno *et al.*, 2007; Muñoz, 2017).

La comunidad de Agua Blanca, Nejapa de Madero no es la excepción ante el incendio de su bosque en el año 2019 con una pérdida de vegetación de 19.28 ha de bosque. La presencia del incendio en el ecosistema pino-encino de la Comunidad ha desencadenado múltiples consecuencias donde se destaca de manera general más afectaciones de las que se perciben a simple vista. Por ejemplo, áreas sin existencia de regeneración natural, presencia de plagas descortezadores en los árboles residuales que quedaron más desprotegidos, la existencia de procesos erosivos del suelo debido por sus fuertes pendientes que lo hacen susceptible, alto contenido de combustible que limita la capacidad de crecimiento y desarrollo de la regeneración, siendo también un factor de riesgo para un nuevo incendio. Aunado a esto la evaluación de daños que incluye las pérdidas materiales en productos y en servicios, es decir los valores monetarios y no monetarios que el bosque le proporciona a la población.

Actualmente en Oaxaca limitadas son las investigaciones que se enfocan en conocer el efecto del fuego sobre la calidad de la regeneración, estructura residual y condiciones del piso forestal después de un incendio (Muñoz, 2017). Aunado a esto la normativa forestal vigente no hace énfasis en este aspecto básico y trascendental, que debe ser estudiado para asegurar la restauración de la masa forestal y que a futuro ofrezca los servicios ecológicos, económicos y sociales que demanda día a día la sociedad. Sumando el escaso conocimiento e intervención comunitaria en actividades silvícolas enfocadas a la restauración del área quemada, ha generado que la regeneración natural existente esté limitada en su capacidad para un buen crecimiento y desarrollo con buena calidad (Chávez, 2022). García-Barrios y González-Espinosa (2017), identifican la importancia de la intervención comunitaria en el manejo del bosque con el propósito de contribuir en la sostenibilidad de los ecosistemas. Solano *et al.* (2017), mencionan que las estrategias de conservación y manejo forestal se han basado en mecanismos verticales y centralizados de toma de decisiones desde el gobierno central.

De acuerdo a lo anterior, resulta necesario la aplicación de diversos conocimientos interdisciplinarios teórico-práctico, analítico, reflexivo, crítico y profesional aporten las herramientas que permitan evaluar el efecto post-incendio forestal sobre la regeneración natural, calidad de los brinzales, la estructura residual y condiciones del piso forestal que permitirá conocer la condición real del ecosistema después de un incendio, de tal manera que la información generada permitirá definir si las características que tiene la regeneración aunado a la estructura residual, y condiciones del piso forestal post-incendio garantizará una supervivencia y crecimiento adecuado del renuevo para la restauración del ecosistema. Incluyendo a la comunidad que depende directamente de



los recursos del bosque sea participe en las decisiones, elaboración y ejecución de las estrategias y alternativas de manejo a proponer mediante un enfoque incluyente y participativo que contribuya para la recuperación del área quemada cuya función directa ha sido proveer de bienes y servicios ecosistémicos a la población que dependen de alguna manera más cercana del recurso.

Se espera que este estudio marque pauta para posteriores investigaciones sobre estudios relacionados con la dinámica de la regeneración natural y su calidad y la afinación metodológica de evaluación de parámetros dasométricos críticos en el manejo forestal sustentable, ya que la información generada puede ser un elemento indispensable en la toma de decisiones sobre el manejo sustentable de los ecosistemas resultantes pos-incendio.

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto post-incendio forestal sobre la calidad morfológica de la regeneración natural, la estructura residual y piso forestal, en el bosque de Agua Blanca Nejapa de Madero, Oaxaca.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Evaluar la calidad morfológica de la regeneración natural de pino-encino bajo tres niveles de severidad de incendio.
2. Determinar el efecto pos-incendio sobre la estructura residual, regeneración y condiciones del piso forestal.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Los incendios forestales**

Villers (2006) menciona que un incendio forestal juega un papel muy importante en la estructura, funcionamiento y dinámica de los bosques, pero cuando se propaga sin control en los recursos naturales causa importantes daños negativos a la vegetación, fauna y suelo; causando importantes pérdidas ecológicas y socioeconómicas (Gil, 2020).

Actualmente los incendios forestales son un disturbio ecológico frecuente en los ecosistemas de bosque templado (Quintero-Gradilla *et al.*, 2019). En México, el 98% de los incendios forestales son principalmente por actividades antropogénicas, el 2% restante son causados por factores naturales (Flores-Garnica, 2021).

Los incendios específicamente en los bosques de pino-encino son variables en severidad a causa de las particularidades del sitio, por lo tanto, se distinguen tres tipos de incendio que implican diferentes daños en el ecosistema.

1. Incendios superficiales. Afectan combustibles vivos y muertos sobre el suelo como pastizales, hojas, ramas, ramillas, arbustos, regeneración natural, troncos, zacates, humus, entre otros (CONAFOR, 2021).
2. Los incendios subterráneos es donde el fuego se propaga bajo la superficie del suelo, quemando las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca este incendio se caracteriza por no crear llamas y casi nada de humo (CONAFOR, 2021).
3. Los incendios de copa, donde el fuego quema completamente a los árboles propagándose de copa en copa y de manera superficial, este tipo de incendio es el más peligroso, destructivo y el más difícil de controlar, se presentan cuando hay vientos fuertes y pendientes muy pronunciados (PPC, 2014).

En Oaxaca como en gran parte del país, los incendios forestales son en su mayoría provocados, la identidad se encuentra dentro de los cinco segundos estados que complementan las 10 identidades con mayor superficie afectada, hasta el 4 de noviembre del año 2021 en Oaxaca se han registrado 148 incendios forestales que han dejado un total del territorio estatal afectado de 31,741 ha de bosque (CONAFOR, 2021).

Esto ha provocado un aumento en la degradación de los servicios ecosistémicos que cada vez va empeorando y por lo tanto la atención hacia estos tipos de investigación debe ser prioritaria ya que todos los seres humanos dependemos exclusivamente de los bienes y servicios ecosistémicos de la Tierra.

## **2.2 Ecosistema de pino-encino**

Los bosques templados son ecosistemas ubicados en las zonas de clima templado de México, en el que predomina la vegetación con especies arbóreas y perennes. Es decir que no pierden sus hojas. Los bosques templados ocupan una superficie de 34.2 millones de ha, representando el 24.8% del territorio nacional principalmente se distribuyen en mayor grado en el norte y sur de Baja California, a lo largo de las Sierras Madre Occidental y Oriental, en el Eje Neovolcánico, la Sierra Norte de Oaxaca y en el sur de Chiapas. En altitudes entre 2,000 y 3,400 m. Gracias al Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) se han registrado 57 de las 62 especies de pinos del país, así como 124 especies de encinos. En estos bosques se concentra poco más del 50% de las existencias maderables del país. (CONAFOR, 2021).

El estado de Oaxaca es la entidad con mayor diversidad biológica del país, en el territorio se encuentran todas las formaciones forestales y ocupa el tercer lugar nacional con mayor superficie arbolada. Del territorio estatal, 67.1% está cubierto por superficies forestales (6, 295, 473.77 ha). El ecosistema de pino encino representa el 24% del total de la superficie forestal estatal que ocupa 1,524,088.14 ha (COESFO, 2023). En la entidad la

vegetación pino encino, se desarrolla en zonas con temperaturas promedio entre 12 y 25 °C, aunque en invierno la temperatura puede llegar hasta por debajo de cero grados. Son ecosistemas subhúmedos a templado húmedos, con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm. Crecen sobre suelos muy variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos, por lo general con abundante materia orgánica y hojarasca (SEMARNAT, 2018). La formación se compone de los tipos de vegetación: bosque de pino-encino (BPQ) y bosque de encino-pino (BQP) (IEFyS,2014).

### **2.3 Efecto de los incendios en la vegetación**

Los ecosistemas forestales en México, especialmente los bosques templados, son afectados anualmente por incendios forestales (Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). Respectivamente, algunos de estos ecosistemas son dependientes del fuego, es decir, requieren que estas perturbaciones ocurran para mantener su sustentabilidad. En ese sentido, es importante considerar que no todos los incendios forestales son iguales y que los ecosistemas no responden de la misma manera ante ese impacto.

La relación de la vegetación y los incendios forestales se centra en la modificación en su estructura, composición y servicios ecosistémicos (Ubeda y Sarricolea, 2016). Asimismo, las distintas especies vegetales presentes en los distintos ecosistemas responden de forma diferencial al fuego, dependiendo de sus habilidades para tolerarlo y de los mecanismos de regeneración que posean. En especies carentes de adaptaciones de resistencia o tolerancia al fuego, los incendios, incluso cuando su intensidad es baja,

pueden causar una alta mortalidad. Si estas adaptaciones están ausentes en gran parte de las especies que componen la comunidad, el impacto sobre el ecosistema puede cambiar drásticamente la dinámica y composición de la vegetación y el resto de la cadena trófica. Así, el mantenimiento de las poblaciones, y la comunidad en general, dependen exclusivamente de la resistencia de las semillas en el suelo, o presentes en las plantas, de la capacidad de rebrote de las plantas dañadas, y de la recolonización del sitio desde sectores no afectados (Jaksic y Fariña, 2015).

Adicionalmente las especies leñosas pueden soportar un incendio y recuperarse, sin embargo, las especies herbáceas después ven dificultades en el crecimiento, debido a la competencia por la humedad y luz con especies leñosas. Además, el mismo indica que la fisionomía vegetal se modifica pasando de bosque arbóreo a matorral transcurridos cuatro años del incendio, ya que algunas de las especies arbóreas crecen como arbustos.

La sucesión ecológica es un proceso de cambio dinámico, gradual y ordenado en un ecosistema, manifestado por el progresivo reemplazo de una comunidad por otra. La dinámica sucesional de la vegetación que ocurrirá en un determinado lugar será dependiente, entre otras cosas de la severidad de la perturbación. Por ejemplo, tras disturbios severos como en incendios de gran intensidad, la sucesión vegetacional probablemente comenzará con la llegada de especies colonizadoras como líquenes y musgos, que lentamente darán paso al establecimiento de plantas con flores. En contraste, cuando los disturbios son leves, la sucesión vegetacional puede comenzar a partir de regeneración vegetativa o rebrote de los individuos sobrevivientes (Fernández *et al.*, 2016). Estos procesos de recolonización pueden tomar tiempos muy largos, en la

medida que la capacidad de dispersión de la vegetación a partir de áreas no quemadas es muy limitada y los suelos han sido erosionados (Jaksic y Fariña, 2015).

## **2.4 Efecto de los incendios en la regeneración natural**

La incorporación de nuevos individuos por semilla a una masa forestal destruida por el fuego, de forma que se asegure su persistencia es un proceso complejo y dependiente de numerosos factores; algunos de ellos son todavía poco conocidos y otros presentan una gran variabilidad (Alaníz-Rodríguez, 2012). La regeneración natural juega un papel fundamental en el mantenimiento de la diversidad de los bosques (Norden, 2014). Una característica fundamental para asegurar la sostenibilidad del recurso florístico (Muñoz, 2017).

## **2.5 Relación fuego-regeneración pino-encino**

La relación fuego-regeneración se define a través de varios procesos ecológicos, que van desde la disponibilidad de la semilla, la competencia interespecífica, hasta las condiciones topográficas y climáticas, entre otras. Específicamente, la disponibilidad de semilla está limitada por la producción de conos, la variación de la densidad del arbolado (como fuente de semilla) y el alcance de dispersión de las semillas de pino (Haire y McGarigal, 2010). De esta forma, la regeneración está supeditada a ciertos micro-hábitats



para su establecimiento, emergencia, supervivencia y crecimiento, como el dosel de arbustos sucesivos adyacentes o del mismo arbolado, así como el suelo desnudo.

En las especies de pino, por ejemplo, para las especies adaptadas al fuego como *Pinus douglasiana* Martínez, *P. durangensis* Martínez, *P. oocarpa* Schiede ex Schlecht. *P. devoniana* Lindl. provistas de conos serótinicos, el número de piñas y la edad hasta la que las semillas conservan su viabilidad son factores críticos para la regeneración después del incendio (Flores-Rodríguez, 2021). El fuego, al provocar la termo dehiscencia de las piñas, libera una gran cantidad de semillas, proporcionando una ventaja sustancial en la regeneración a las estirpes que poseen esa característica. Varios factores que actúan sobre el microambiente del lecho de germinación y potencialmente críticos para la supervivencia de las plántulas se ven modificados por el incendio.

Dependiendo de la intensidad y severidad del fuego, se produce una puesta en luz del sotobosque, cambiando sus condiciones de temperatura y humedad y las de protección de la semilla frente a la depredación por aves y roedores. Ello puede afectar de forma grave a la disponibilidad de semilla y la supervivencia inicial de las plántulas. Sin embargo, los lugares más severamente quemados pueden ser ventajosos para la regeneración, ya que en ellos puede inicialmente demorarse la reinvasión del resto de la vegetación y limitarse así la competencia a los brinzales de pino (Martínez-Garza *et al.*, 2022).

Por otra parte, se reporta que el incendio suscita la emergencia de encinos y su capacidad de rebrotes ya que existe un banco de encinas bajo el dosel de los pinos que persisten pequeños y al quemarse la parte aérea los encinos tienden a rebrotar y germinar

adecuadamente sin la necesidad de realizar una reforestación. Se ha documentado que los incendios en los bosques mixtos promueven la presencia y dominancia de especies del género *Quercus*. Esto justifica la capacidad de rebrotamiento de la mayor parte del género, misma que es estimulada ante los efectos del aumento de la temperatura del suelo. Sin embargo, esta característica de emitir rebrotes a partir de la base del tronco, o de la raíz después de la muerte de las partes aéreas, es lo que puede capacitarlos mejor para regenerarse bajo condiciones ambientales postincendio. En relación al presente estudio se observó en su mayoría la presencia de regeneración por rebrotes y poca reincorporación de plántulas por semilla y esto puede ser debido a que la incineración de la capa de hojarasca induce a la vulnerabilidad de las pocas bellotas dispersadas a ser más fácilmente visibles por la fauna que se alimentan de (pájaros y ardillas).

Otro factor relacionado a estas observaciones en campo es la limitada asociación de la regeneración de encinos por bellotas, ya que en particular las bellotas pierden su viabilidad al perder su humedad lo cual significa que el fuego provoca condiciones más cálidas y secas del área y por lo tanto también aumenta la mortalidad de bellotas debido a la desecación provocada por el aumento de la temperatura. De esta manera, la mayoría de especies de encinos requieren de una formidable humedad en sus bellotas para mantenerse viables ya que después del fuego pierden esta viabilidad al cabo de 4 a 6 semanas por pérdida de su humedad. Sin embargo, López et al. (2015), opina que la regeneración por rebrotes no logra una continuidad posterior ya que después del incendio se presenta condiciones más secas y con el tiempo se restablecen las condiciones más húmedas y al madurar el bosque de pino y cerrarse el dosel por otras especies el encino

presenta problemas en la incorporación disminuyendo la densidad que se tiene inicialmente.

El éxito de la regeneración natural después de una perturbación depende de diversos factores bióticos y abióticos y de la intervención humana lo que condiciona el establecimiento con éxito de las especies y de la biodiversidad en general. El manejo forestal de un bosque perturbado depende de cierta manera de la respuesta de la regeneración natural que asegure la sostenibilidad del recurso a futuro. Es por ello la importancia de este tipo de estudios hacia la regeneración post-incendio ya que forma parte de un indicador del estado y dinámica del bosque y que debe ser incluido en cualquier evaluación técnico ya que las intervenciones pueden traer efectos en los ciclos fenológicos de la flora con efectos sobre la producción, dispersión, germinación y patrones de distribución de las nuevas plantas y tener en cuenta las interacciones intra e inter específicas de cada especie y su variabilidad entre individuos, entre hábitats y entre año (Norden, 2014).

## **2.6 Efectos de los incendios forestales en la provisión de servicios ecosistémicos**

Los incendios en los ecosistemas son complejos y variados y afectan a una serie de importantes servicios ecosistémicos, puesto que el fuego tiene la capacidad de afectar el estado físico-químico y ecológico de los sistemas hídricos, alterar muchos aspectos del ciclo del carbono y desencadenar cambios en el tipo y estructura de la vegetación (Harper

*et al.*, 2018). La severidad de los incendios es definida como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego y es uno de los factores más críticos para determinar el efecto ecológico de los incendios en los ecosistemas (García-Llamas *et al.*, 2019). Los incendios forestales son una perturbación abiótica que ha afectado el suministro de agua y la capacidad de recuperación de los bosques. El fuego sea natural o no, tiene un doble efecto sobre la capacidad de los ecosistemas para beneficiar a los seres humanos. Los incendios naturales frecuentes de baja gravedad pueden ayudar a mantener una buena salud de los ecosistemas forestales, los incendios son cada vez más grandes y graves pueden generar daños mucho más complejos (Robinne *et al.*, 2019).

Algunas zonas del mediterráneo se encuentran especies autóctonas que están adaptadas a los incendios, con una biomasa menos inflamable y son capaces de recuperarse después de un incendio, entonces pueden reducir la escala espacial y la intensidad de un incendio, considerándose que prestan un servicio de regulación de incendios. Por el contrario, las especies exóticas con abundante biomasa combustible y en continuidad horizontal o vertical, pueden aumentar la intensidad del fuego y no proporciona un servicio si no una pérdida del servicio ecosistémico (Depietri y Orenstein, 2020).

## **2.7 Importancia de la calidad de planta post-incendio**

La calidad de la planta es uno de los componentes más importantes de los que depende el éxito de la restauración de una cubierta vegetal (Prieto *et al.*, 2018). Una planta de calidad es aquella que además de cumplir con ciertas características morfológicas

también es capaz de alcanzar niveles definidos de supervivencia, crecimiento y desarrollo en el sitio que se encuentra (se aclimata), debido a que posee ciertas propiedades morfológicas y fisiológicas que se lo permiten (Vicente-Arbona, 2019).

La calidad de una planta cambia en el tiempo, variando con su estado fenológico y, probablemente, con su edad. Así, la resistencia a situaciones de estrés de una planta no es la misma durante el periodo de reposo vegetativo que al producirse la elongación de los tallos (Méndez-Espinoza y Vallejo-Reyna, 2019). La exigencia de la planta de calidad es mayor cuanto más limitante sea el medio donde se ejecuta la restauración.

#### 2.7.1 Parámetros morfológicos que influyen en la calidad de planta

La calidad morfológica de una planta hace referencia a un conjunto de caracteres, tanto de naturaleza cualitativa como cuantitativa, sobre la forma y estructura de esta (Cobas *et al*, 2020). Siendo una planta capaz de alcanzar un desarrollo (supervivencia y crecimiento) óptimo. Esta capacidad de la planta les permite una mejor respuesta frente a los factores propios de un sitio determinado, y que van a manifestarse a través de su capacidad para superar, las limitadas propiedades físicas del suelo después de un disturbio, la competencia con otras especies por luz, nutrimentos y agua que le permitan crecer, aprovechando todo el potencial que ofrece una estación (Norden, 2014).

Los caracteres morfológicos de naturaleza cuantitativa que habitualmente son empleados en el control de calidad de especies forestales, son el tamaño de la planta o alguna de sus partes y la proporción entre ellas. Todas las especies autóctonas de *Pinus* y *Abies*,

todas las especies arbóreas de *Quercus* y *Fagus sylvatica* están sujetas a una normativa nacional, que ha sido ampliada y ligeramente modificada por algunas administraciones autonómicas. Dichas legislaciones establecen unos rangos de alturas y unos diámetros de cuello mínimos en función de la edad de las plantas dentro de los cuales deben estar comprendidos los lotes de brinzales empleados en trabajos de revegetación para ser considerados de calidad cabal (Ibarra, 2003).

Los atributos morfológicos más usados para la determinación de la calidad de una planta forestal son el diámetro (D), altura (A), peso seco total (PST), peso fresco total (PFT), peso seco de la parte aérea (PSA) y peso seco de raíces (PSR) (Escobar-Alonso, 2019). Existen intervalos de calidad para los atributos morfológicos y algunos fisiológicos para varias coníferas mexicanas, que permiten clasificar la calidad de los pinos (cespitosos y no cespitosos) y de las latifoliadas (Rueda-Sánchez *et al*, 2014). Numerosos parámetros se han incluido en las investigaciones con pinos mexicanos. Sin embargo, no existe un análisis sobre su frecuencia de uso, el éxito que han tenido de cada uno de ellos en la regeneración.

## **2.8 Índices de calidad de planta**

El éxito de la regeneración natural después de un incendio forestal radica principalmente en la calidad de la planta, esta calidad se determina por atributos morfológicos medibles y calificables. Por lo tanto, el diagnóstico de la calidad de una planta forestal para ser considerada como de alta calidad, puede determinarse mediante índices morfológicos de calidad (Ramos-Huayapa, 2020).

Un índice de calidad es la combinación de dos o más parámetros morfológicos o fisiológicos que describe atributos abstractos de la planta como son el balance y la robustez, y representa el valor más cercano para predecir el rendimiento de la planta en campo, comparado con lo que pudiera determinar cualquier parámetro individual. Entre los índices para determinar la calidad de planta se destacan las siguientes:

1. Índice de robustez. Es la relación entre la altura de la planta (cm) y el diámetro del cuello de la raíz (mm); es un indicador de la resistencia de la planta a la desecación por el viento, de la supervivencia y del crecimiento potencial en sitios secos y su valor debe ser menor a seis. Un valor inferior indica una mejor calidad de la planta, arbolitos más robustos, bajos y gruesos es son más aptos para sitios con limitación de humedad; valores superiores a seis sugieren una desproporción entre el crecimiento en altura y el diámetro, como pueden ser tallos elongados con diámetros delgados, describen ejemplares más vulnerables a daños por viento, sequía y heladas (Sáenz *et al.*, 2014).

$$IR = \frac{\textit{Altura (cm)}}{\textit{Diámetro al cuello de la raíz (mm)}}$$

2. Relación altura del tallo y longitud de la raíz principal. (AT/LR). Predice el éxito de la plantación y debe existir equilibrio y proporción entre la parte aérea y el sistema radical de las plantas (Noguera-Tabalera *et al.*, 2014).

$$R A/LR = \frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Longitud de Raíz (cm)}}$$

3. Relación peso seco de la parte aérea y el peso seco del sistema radicular (R PSA/PSR). Esta proporción se caracteriza por reflejar el desarrollo de la planta, representa el balance entre el área de transpiración y el área de absorción de agua. Para determinar el cociente se utilizan los pesos secos de ambas partes; en este sentido, una planta de calidad debe tener un coeficiente de relación lo más bajo posible, de tal forma que se asegure su sobrevivencia (Villalón *et al.*, 2016).

$$R PSA/PSR = \frac{\text{Peso seco ereo (g)}}{\text{Peso seco radical (g)}}$$

4. Índice de calidad de Dickson (ICD). Expresa la potencialidad de la planta en relación con la sobrevivencia y el crecimiento. Este sirve para comparar la calidad de la planta de distintos tamaños, debido a que relaciona varios parámetros y establece cuan proporcionada se encuentra la planta en cuanto a tamaño y peso. Valores altos representan plantas de mejor calidad ya que por una parte el desarrollo de la planta es elevado y al mismo tiempo las fracciones aéreas y radical están equilibradas (Ureta-Leones *et al.*, 2018). Este índice es el mejor parámetro para indicar la calidad de planta, ya que expresa el equilibrio de la distribución de la masa y la robustez (Ramos y Lombardi, 2020).



$$ICD = \frac{Peso\ seco\ total\ (g)}{\frac{Altura\ (cm)}{Diámetro\ (mm)} + \frac{Peso\ seco\ parte\ aérea\ (g)}{Peso\ seco\ raíz\ (g)}}$$

5. Índice de lignificación (IL). Evalúa parámetros de peso. Las plantas con valores altos de lignificación son más resistentes a daños físicos, y al manejo hasta su establecimiento en campo definitivo (Orozco *et al.*, 2010). El índice de lignificación consiste en determinar el porcentaje de peso seco, con relación al contenido de agua en las plantas, lo cual expresa el nivel de pre-acondicionamiento de las plantas donde los valores óptimos de lignina presentes en las coníferas están entre 25 y 30% (Prieto *et al.*, 2009).

$$IL = \left( \frac{Peso\ seco\ total\ (g)}{Peso\ fresco\ total\ (g)} \right) * 100$$

## 2.9 Biomasa en el piso forestal

La biomasa es la cantidad o volumen de materia seca presente en una planta; ésta puede ser aérea, subterránea o total; incluyendo en el primer caso las hojas, flores, frutos, puntas, ramas, y tronco; y en el segundo se incluye la raíz principal, raíces secundarias, y demás raíces existentes (Rodríguez, 2008). La determinación de biomasa en un bosque permite estimar los montos de materia orgánica en cada uno de sus componentes (Villegas-Jiménez *et al.*, 2013).

La densidad arbórea es un indicador que permite de manera sencilla y objetiva caracterizar la acumulación de la biomasa en los ecosistemas forestales, en especial en áreas donde la regeneración se está estableciendo, debido a que representa la demanda de árboles por espacio de crecimiento y permite conocer el arreglo de la vegetación además, en el manejo forestal es un criterio importante para modificar la tasa de crecimiento de los árboles, por lo tanto, en el almacenamiento de biomasa (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

La determinación de biomasa en un bosque permite estimar los montos de materia orgánica en cada uno de sus componentes (Villegas-Jiménez *et al.*, 2013). Por otra parte, la cantidad de los combustibles superficiales en los bosques son indicadores de las condiciones de vulnerabilidad y de riesgos de sufrir incendios en localidades específicas (Hernández *et al.*, 2016).

## CAPÍTULO III

### CALIDAD MORFOLÓGICA DE LA REGENERACIÓN NATURAL POSTINCENDIO DE

#### *Pinus douglasiana* Martínez DEL SUR DE OAXACA

### [MORPHOLOGICAL QUALITY OF NATURAL POST-FIRE REGENERATION OF

#### *Pinus douglasiana* Martínez FROM SOUTHERN OAXACA]

Rosario Aquino-López<sup>1</sup>, Ernesto Castañeda-Hidalgo<sup>2\*</sup>, Gerardo Rodríguez-Ortiz<sup>2</sup>,  
Gisela M. Santiago-Martínez<sup>2</sup>, Salvador Lozano-Trejo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante del Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Tecnológico Nacional de México.<sup>2</sup>Profesores investigadores del Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Tecnológico Nacional de México. Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

\*Autor por correspondencia: casta\_h50@hotmail.com

#### Resumen

El éxito de la regeneración natural en los ecosistemas de pino-encino después de un incendio forestal depende de diversos factores, uno de ellos es la calidad de planta. La investigación se realizó en 2022 con

el objetivo de evaluar la calidad de la regeneración de *Pinus douglasiana* Martínez en tres áreas con diferente condición de severidad de incendio. Se realizó un muestreo destructivo a plantas de dos años de edad para la determinación de índices morfológicos de calidad de planta. El nivel de severidad y calidad morfológica se diferenciaron a través de análisis de varianza y prueba de separación de medias (Duncan, 0.05). Los resultados muestran diferencias significativas entre nivel de severidad de incendio ( $p \leq 0.05$ ) en los índices de calidad altura, biomasa de hojas, biomasa de raíz, biomasa aérea, biomasa total, relación altura y longitud de raíz. No encontrándose significancia ( $p > 0.05$ ) para longitud de raíz, biomasa de tallo, relación biomasa aérea y biomasa de raíz e índice de Dickson. De acuerdo a la relación altura y longitud de raíz, índice de lignificación e índice de Dickson se presentó una buena calidad de planta en los tres niveles de severidad de incendio. Para la biomasa aérea, biomasa subterránea e índice de esbeltez, las plantas mostraron baja calidad. Se obtuvieron los cocientes más altos en diámetro (4.15 mm), altura (26.03 cm), área foliar (321.2 cm<sup>2</sup>) y biomasa total (5.84 g) para el área de severidad alto. Las áreas incendiadas son adecuadas para la regeneración natural y se mejora si se conjuntan con actividades silvícolas que perfeccionen su calidad a futuro.

**Palabras clave:** *Pinus douglasiana*, biomasa, índices morfológicos, severidad.

### **Abstract**

The success of natural regeneration in pine-oak ecosystems after a forest fire depends on various factors, one of which is the quality of the plant. The quality of the regeneration of *Pinus douglasiana* Martínez was evaluated in three areas with different fire severity conditions. In 2022, a destructive test was carried out on two-year-old plants, determining morphological indices of plant quality. The level of severity and morphological quality were differentiated through analysis of variance and means separation test (Duncan, 0.05). The results show significant differences between the fire severity level ( $p \leq 0.05$ ) in the height quality indices, aerial leaf biomass, root biomass, biomass, total biomass, height and root length ratio. Not finding significance ( $p > 0.05$ ) for root length, stem biomass, aerial biomass and root biomass ratio and Dickson index.

According to the relationship, root height and length, lignification index and Dickson index in the three levels of fire severity, a good plant quality was presented. For the aerial biomass, underground biomass and slenderness index, the plants showed low quality. The highest ratios in diameter (4.15 mm), height (26.03 cm), leaf area (321.2 cm<sup>2</sup>) and total biomass (5.84 g) were obtained for the high severity area. Burnt areas are suitable for natural regeneration and are improved if combined with silvicultural activities that improve their quality in the future.

**Keywords:** Biomass, morphological indices, *Pinus douglasiana*, severity.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La calidad de una planta forestal es un factor de importancia que incide en la supervivencia y desarrollo de la regeneración natural después de una perturbación. A nivel nacional, las investigaciones sobre los efectos postincendio en cuanto a la evaluación de la calidad de planta en el nuevo establecimiento de la cubierta vegetal, es escasa (Sáenz *et al.* 2014). En México, los incendios forestales son perturbaciones continuas a los cuales están expuestos los ecosistemas de clima templado año tras año (Flores *et al.* 2021). Durante el período 2015-2020 se contabilizaron en promedio 6 965 incendios que afectaron a 464 168.30 ha por año (CONAFOR 2022). Particularmente, el estado de Oaxaca se encuentra dentro de los cinco segundos estados que complementan los diez estados con mayor superficie afectada por incendios, con un promedio de 153 incendios por año, afectando superficies significativas del bosque pino-encino.

Las características morfológicas y físicas de la regeneración natural preincendio son modificadas después de una alteración que puede generar efectos positivos o negativos (Fernández-Méndez *et al.* 2016). Por lo tanto, la presencia de un incendio forestal influye en el proceso de desarrollo, crecimiento y perpetuidad de un ecosistema, principalmente en la reducción de su capacidad de suministro de bienes y servicios ecosistémicos (Muñoz 2017, Cortes-Cabrera *et al.* 2018)

En el bosque de pino-encino crece una de las especies con mayor importancia socio-económica en el mercado forestal, el *Pinus douglasiana* Martínez; especie endémica de 20–40 m de altura, copa redondeada,

corteza densa y algo áspera, ramas extensas y hojas perennifolias. Una característica específica de esta especie es la producción de conos serótinicos, particularidad de desarrollo de los estróbilos largamente ovoides que implica la necesidad de altas temperaturas para abrir y distribuir sus semillas (Quipse-Santos 2017). En Oaxaca, esta especie forma parte del género que cuenta con más programas de manejo forestal sustentable, ya que forma el primer eslabón de producción para el abastecimiento requerido por la industria forestal debido a que es una madera blanda de aserrío fácil y especialmente por sus buenos incrementos en volumen, rendimientos en superficie y producción de resina en campo.

Uno de los elementos importantes que interfieren en el establecimiento y éxito inicial de la regeneración de la especie *P. douglasiana* después de un incendio es la calidad morfológica (Sáenz-Reyes *et al.* 2014). Sin embargo, la importancia de calidad de planta reside en tener plantas con características morfológicas deseables que le permitan mejores expectativas de vida. Para calificar una planta forestal desde el vértice de su calidad, se emplea una cadena de atributos morfológicos, los más utilizados para su determinación son la altura de la planta, diámetro al cuello de la raíz, peso seco total, peso fresco total, peso seco del tallo, peso seco de raíces y área foliar. Estos atributos permiten determinar los índices de calidad de planta como son el Índice de Esbeltez, la relación Peso aéreo/Peso seco raíz, el Índice de Dickson y el Índice de Lignificación (Escobar-Alonso 2019, Villalón-Mendoza *et al.* 2016).

Actualmente, en la entidad son limitadas las investigaciones que se enfocan en conocer el efecto del fuego sobre la calidad morfológica de especies maderables después de un incendio, fundamental para asegurar la sostenibilidad del recurso forestal a través del tiempo.

La comunidad de Agua Blanca, Nejapa de Madero, no ha sido la excepción ante el incendio de su bosque, la escasa intervención y organización comunitaria en actividades silvícolas enfocadas a la restauración de áreas quemadas, ha generado que la regeneración natural esté limitada en su capacidad para un buen crecimiento y desarrollo con buena calidad (Chávez-Pascual *et al.* 2017). García-Barrios y González-Espinosa (2017) identificaron la importancia de la intervención comunitaria en el manejo del bosque con el

propósito de contribuir en la sostenibilidad de los ecosistemas. La evaluación de la calidad y atención de la regeneración natural después de un incendio forestal es importante para fundamentar la toma de decisiones sobre el manejo del ecosistema posterior al incendio, para contribuir en la recuperación de los servicios ecosistémicos.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar la calidad de planta post-incendio bajo tres niveles de severidad del fuego a partir de índices morfológicos en Agua Blanca, Nejapa de Madero, Oaxaca.

## 3.2 METODOLOGÍA

**3.2.1 Descripción de área de estudio.** La investigación se desarrolló en la localidad de Agua Blanca, Nejapa de Madero, distrito de San Carlos Yautepec, estado de Oaxaca. Se ubica a una altitud media de 1 176 m, entre las coordenadas 16° 39' 25" N y -95° 44' 28" O (INEGI 2018) (Figura 3.1).

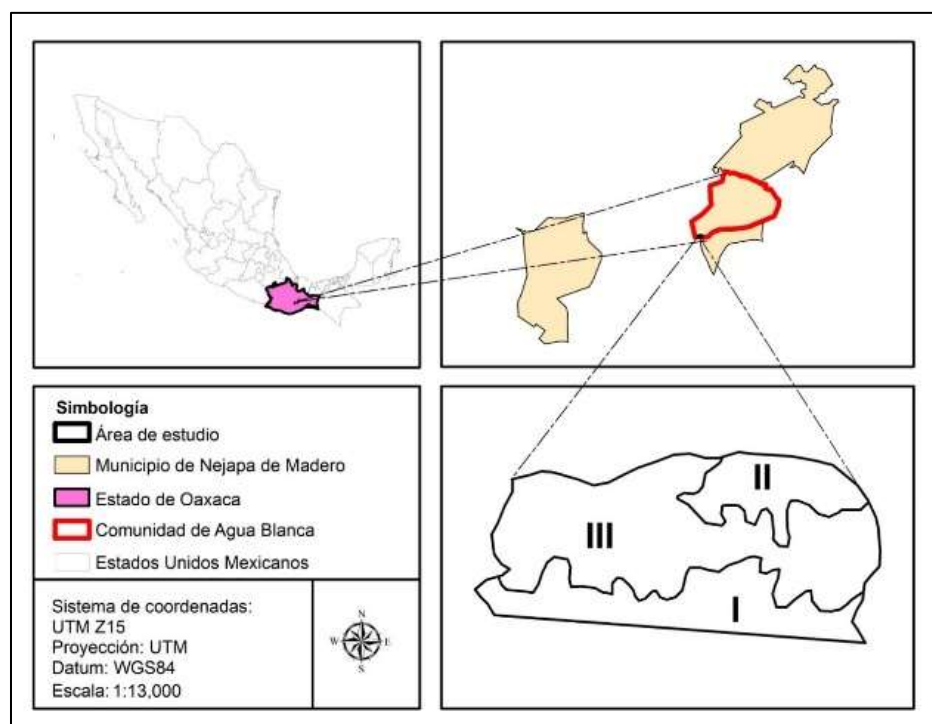


Figura 3.1. Localización del área de estudio y niveles de severidad de incendio en Agua Blanca, Nejapa de Madero.

Fuente: Elaboración propia.

El clima es C(w2), catalogado como templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C; lluvias en verano con una precipitación media anual de 1,800 mm (CONABIO 2020). En la comunidad habitan 401 personas, las cuales pertenecen a la etnia mixe. Posee una superficie total de 9 325 ha, una orografía montañosa y alberga diferentes estructuras vegetales conformadas por encino-pino, pino-encino, pastizales y selva baja caducifolia (Figura 3.1).

**3.2.2 Selección de los sitios de muestreo.** En el 2022 se realizaron recorridos de campo e identificación de los diferentes niveles de severidad de incendio (NSI) ocurrido dos años atrás en una superficie de 19.89 ha. Para la generación de los datos se establecieron 12 sitios circulares de 400 m<sup>2</sup> tomando en cuenta la compensación por pendiente acorde a la metodología reportada por Chávez-Pascual *et al.* (2017). Se distribuyeron cuatro sitios de manera dirigida por cada área con distinto NSI (I bajo, II medio y III alto). La condición de severidad de los mismos se determinó con base en la variabilidad de las condiciones topográficas (pendiente, exposición, altitud) y densidad arbórea, a través de recorridos de campo y con ayuda del software ArcGis 10.3 y fotografías satelitales se sobrepuso el área de estudio para corroborar el paso del fuego.

**3.2.3 Selección de las plantas.** El estudio se realizó con plantas de dos años de edad de la regeneración natural de *P. douglasiana* en los tres NSI. Se utilizaron 4 plantas seleccionadas al azar por cada sitio de muestreo, obteniendo así 48 plantas para su posterior análisis.

**3.2.4 Indicadores de calidad de planta.** Las variables evaluadas a las plantas fueron altura de planta (A, cm), longitud del tallo (LT, cm) y longitud de la raíz (LR, cm); estas medidas se obtuvieron con el uso de una regla graduada; el diámetro del cuello de la raíz (DCR, mm), se realizó con un vernier digital (*Powerbuilt-647740M* con precisión  $\pm 0.2$  mm). El método destructivo para las muestras de *P. douglasiana* consistió en separar las partes vegetativas de la planta; tallo, acículas y raíces. Se determinó el peso húmedo (PH, g), con el uso de una balanza analítica marca Shimadzu modelo ATY224 con precisión de  $\pm 0.1$  mg; posteriormente las partes vegetativas de la planta se introdujeron en bolsas de papel estraza con su



identificación. Estas muestras se deshidrataron durante cuatro días en una estufa de secado marca *Memmert* modelo 100-800 hasta obtener su peso constante. Finalmente, las partes vegetativas de las muestras se pesaron en una balanza digital para obtener la biomasa en seco (PS, g). El área foliar (AF, cm<sup>2</sup>) de las plantas se determinó mediante el programa *ImageJ*®. Primeramente, se realizó el escaneo de las acículas de cada planta con el uso de un escáner marca EPSON L380, posteriormente las imágenes se procesaron en el programa.

Con los valores de las variables se determinaron los índices de calidad de planta: 1. Índice de robustez (IR), relaciona la altura (cm) y el diámetro del cuello de la raíz (DCR, mm) de la planta; indica la resistencia de planta a factores ambientales, valores mayores a seis indican menor resistencia y menor a seis, mayores resistencias (Villalón-Mendoza *et al.* 2016). 2. Índice de calidad de Dickson (ICD), el cual adjunta varios atributos morfológicos en un solo resultado, representando plantas de mejor calidad con valores igual o mayor a 0.50 (Cobas López *et al.* 2020). 3. La relación altura y longitud de la raíz (RA/LR), mismo que pronostica el éxito de las plantas en campo, se considera que debe haber equilibrio y proporción entre la parte aérea y la parte subterránea de las plantas; valores menores a dos representan calidad para este índice (Sáenz Reyes *et al.* 2014). 4. Índice de proporcionalidad biométrica (IPB) o relación biomasa seca aérea con biomasa seca raíz; esta proporción se caracteriza por reflejar el desarrollo de la planta y calidad; para ello, los valores deben ser menores a dos (Vicente-Arbona *et al.* 2019). 5. Índice de lignificación (IL; %), que es el porcentaje de peso seco con relación al potencial hídrico en las plantas; los valores altos representan más resistencia a daños físicos (Ramos-Huapaya y Lombardi-Indacochea 2020).

Con las variables evaluadas se realizó el diagnóstico de la calidad de la planta para los diferentes niveles de severidad de incendio. Los intervalos óptimos para calificar la calidad de una planta forestal de clima templado, de acuerdo a Vicente-Arbona *et al.* (2019) (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Intervalos para determinar la calidad de planta en especies forestales.

Variable	Calidad y rango		
	*Alta	**Media	***Baja
Altura (A)	15-25	10-14.9	<10
Diámetro (D)	≥ 4	2.5-3.9	<2.5
Índice de esbeltez (IE)	<6	6-8	>8
Relación altura/longitud de raíz (R AL/LR)	<2	2.1-2.5	>2.5
Relación biomasa aérea/biomasa raíz (R BA/BR)	1.5-2	2.1-2.5	>2.5
Índice de Calidad de Dickson (ICD)	>0.5	0.49-0.5	<0.2

\*Calidad alta: Planta con ausencia total de indeseables características. \*\*Calidad media: plantas que tienen en menor proporción características indeseables. \*\*\*Calidad baja: Plantas que registran más valores de calidad media y que no garantiza su supervivencia en campo.

Fuente: Vicente-Arbona *et al.* (2019).

**3.2.5 Análisis de datos.** Los valores de las variables se capturaron en una base de datos. Se realizó un análisis estadístico con el programa *Statistical Analysis System*® verificando los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas respectivas de Shapiro-Wilk y Bartlett ( $\alpha > 0.05$ ), algunas variables se transformaron a logaritmo natural. Los niveles de severidad e índices de calidad se diferenciaron mediante el modelo lineal generalizado (PROC GLM) y prueba de medias (Duncan). Asimismo, se realizó un análisis Clúster para agrupar la calidad de planta, características físicas del área y sus relaciones entre los niveles de severidad.

### 3.3 RESULTADOS

**3.3.1 Índices de calidad de planta.** El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre el NSI ( $p \leq 0.05$ ) en: A, biomasa de hojas (BH), biomasa de raíz (BR), biomasa aérea (BA), biomasa total (BTOT), relación (A/LR) e Índice de esbeltez (IE) (Cuadro 3.2). Las variables BH, BR, BTOT mostraron los mayores promedios en el NSI alto (Cuadro 3.3.).

Cuadro 3.2 Análisis de varianza del efecto del fuego por severidad sobre la regeneración natural.

Variable	Nivel de severidad de incendio			
	GL error	$\sqrt{CME}$	Cuadrados medios	CV (%)
Diámetro al cuello (DCR; mm)	41	0.2	0.04 <sup>ns</sup>	35.79
Altura (A; cm)	41	0.15	0.02**	10.06
Longitud de raíz (LR; cm)	41	0.08	0.007 <sup>ns</sup>	18.12
Biomasa de tallo (BT; g)	41	0.46	0.21 <sup>ns</sup>	91
Biomasa de hojas (BH; g)	41	0.46	0.21*	84
Biomasa de raíz (BR; g)	41	0.46	0.21*	97
Biomasa aérea (BA; g)	41	0.45	0.20*	83
Biomasa total (BTOT; g)	41	0.45	0.20*	83
Índice de esbeltez (IE)	41	0.11	0.01*	22.98
Relación AL/LR	41	0.62	0.38*	25.58
Relación BA/BR	41	0.72	0.005 <sup>ns</sup>	17.29
Índice de Dickson (ICD)	41	0.07	0.004 <sup>ns</sup>	16.47
Índice de lignificación (IL)	41	0.03	0.0009*	3.7
Área foliar (AF; cm <sup>2</sup> )	41	0.32	0.1 <sup>ns</sup>	15.04

GL= Grados de libertad. CV= Coeficiente de variación. CMC= Cuadrado medio del error. \*\* = Altamente

significativo ( $p \leq 0.01$ ). \* = Significativo ( $p \leq 0.05$ ). ns=No significativo ( $p > 0.05$ )

Cuadro 3.3 Efecto de la severidad de incendio sobre los índices de calidad morfológica.

Variable	Nivel de severidad de incendio		
	Bajo	Medio	Alto
Diámetro (D; mm)	2.6 ± 0.40 a	2.65 ± 0.30 a	4.15 ± 0.70 a
Altura (A; cm)	27.34 ± 2.53 a	17.23 ± 1.05 b	26.03 ± 2.33 a
Longitud de raíz (LR; cm)	15.1 ± 1.63 a	16.56 ± 1.24 a	17.06 ± 2.48 a
Biomasa de tallo (BT; g)	0.86 ± 0.24 ab	0.70 ± 0.11 b	1.50 ± 0.32 a
Biomasa de hojas (BH; g)	1.42 ± 0.46 b	1.61 ± 0.29 b	3.41 ± 0.62 a
Biomasa de raíz (BR; g)	0.39 ± 0.15 b	0.42 ± 0.06 b	0.87 ± 19 a
Biomasa aérea (BA; g)	2.28 ± 0.69 b	2.32 ± 0.40 b	4.92 ± 0.90 a
Biomasa total (BTOT; g)	2.70 ± 0.86 b	2.75 ± 0.46 b	5.84 ± 1.07 a
Relación BA/BR	7.16 ± 0.91 a	5.36 ± 0.31 a	6.34 ± 0.68 a
Índice de Dickson (ICD)	7.36 ± 0.89 a	5.63 ± 0.35 a	6.99 ± 0.72 a

Letras distintas en la misma fila representan diferencias significativas (Duncan 0.05). La media se incluye ±

error estándar. (n=44 número de muestras).

Fuente: Elaboración propia

No se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en las variables DCR, LR, BT, relación BA/BR, ICD y AF. Las variables que generaron mayor coeficiente de variación y mostrando alta heterogeneidad ( $> 30\%$ ) fueron BA, BH, BR y BTOT.

De acuerdo a los intervalos para calificar la calidad de una planta forestal, las plantas procedentes del NSI alto fueron calificadas de alta calidad y como de media calidad las plantas provenientes del NSI medio y bajo.

Las plantas que generaron mayor BTOT fueron originadas del NSI alto ( $5.84 \pm 1.07$  g/árbol).

La parte que más captura biomasa con un promedio de ( $3.41 \pm 0.62$  g/árbol) son las hojas seguido del tallo y raíz para este nivel de severidad.

En el almacenamiento de BA, los valores oscilaron de 2.28 en el NSI bajo a 4.92 g planta<sup>-1</sup> en el NSI alto. Por consiguiente, la producción de BR fluctuó de 0.39 en el NSI bajo hasta 0.87 g planta<sup>-1</sup> en el NSI alto (Cuadro 3.3). La variación en las biomásas presenta correlación con la supervivencia en concordancia con el DCR, a menor peso de planta menor supervivencia en esta especie.

En cuanto a la variable A, los valores en este estudio fluctuaron de 17.3 cm en el NSI medio, hasta 26.66 cm en los niveles alto y bajo. Mientras que el DCR entre los NSI mostró un comportamiento constante un promedio de 3.13 mm. Con el DCR las plantas se calificaron de media y baja calidad. Al mismo tiempo, el ICD mostró un valor promedio de 6.66 en todos los NSI, lo que clasifica a las plantas con calidad alta. La LR mostró un promedio en los tres NSI de 16.24 cm, no habiendo diferencias estadísticamente significativas. Las plantas procedentes del NSI alto mostraron valores más dominantes de biomasa radical 0.87.

Para la relación A/LR en las plantas provenientes de los tres NSI, se calificaron de alta calidad con un promedio de 0.23, 0.16 y 0.21 cm mm<sup>-1</sup> para el nivel bajo, medio y alto. La relación BA/BS arrojaron un promedio de 6.28 g para los tres NSI, los valores registrados califican a las plantas como de baja calidad ya que los resultados están fuera del intervalo para este índice. Lo que expresa que la biomasa para la mayoría de plantas es desproporcional entre la parte aérea y la raíz.

Respecto al IE calificó a las plantas con calidad baja para plantas provenientes de la severidad baja y alta, y una calidad media para plantas del nivel medio, con un valor promedio de 7.45 cm, lo que indica que la planta crece 7.45 cm en altura por cada mm de diámetro al cuello de la raíz (Figura 3.2). Resultados más altos en este índice indica que el tallo de la planta es más elongado con diámetros menores.

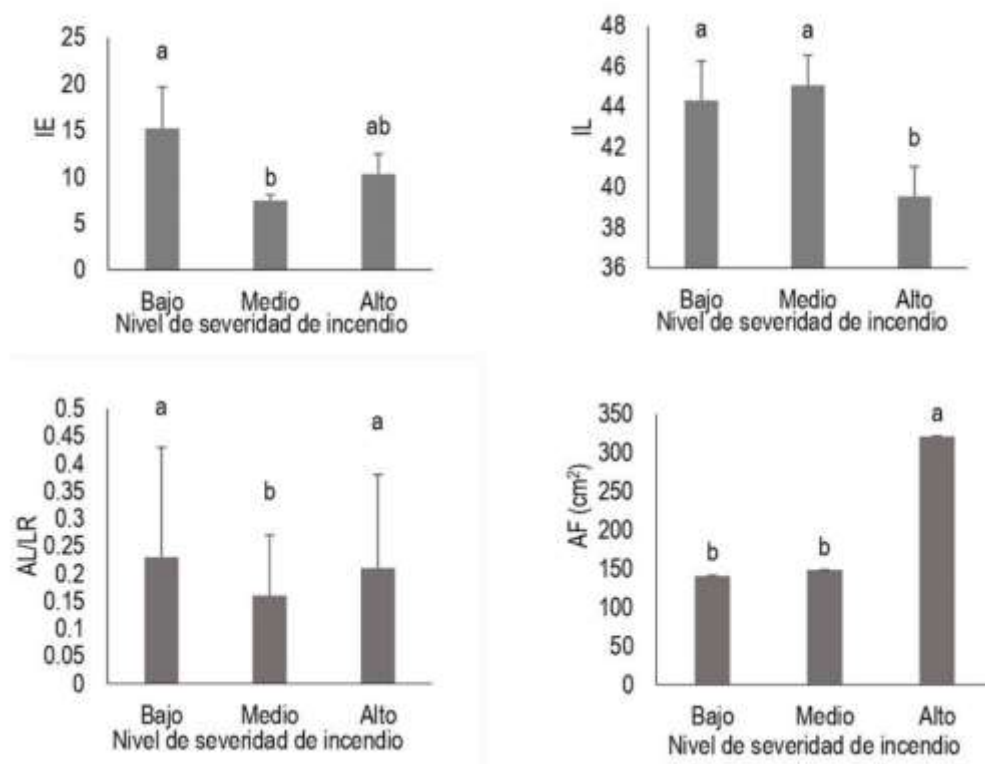


Figura 3.2 Efecto de la severidad de incendio sobre los índices morfológicos de la regeneración. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas (Duncan 0.05). Las líneas verticales sobre las barras indican el error estándar.

Para el IL se obtuvieron valores de 39.54 % de lignificación en las plantas provenientes de la severidad alta, en el nivel medio y bajo presentaron mejores resultados, 44.3 y 45.06 %, respectivamente (Figura 2). Los resultados se encuentran dentro del rango en porcentaje de lignina para coníferas, lo que contribuye a incrementar el crecimiento en altura. El AF mostró el mayor promedio (321.2 cm<sup>2</sup>) en el NSI alto, seguido del nivel medio (148.43 cm<sup>2</sup>) y finalmente el nivel bajo (140.63 cm<sup>2</sup>) (Figura 2).

El análisis clúster a partir del método de distancia entre grupos permitió la clasificación de la especie *P. douglasiana*, a partir de la composición de variables empleadas en la determinación de la calidad y las variables cualitativas del sitio como; pendiente, exposición y altitud (Figura 3.3).

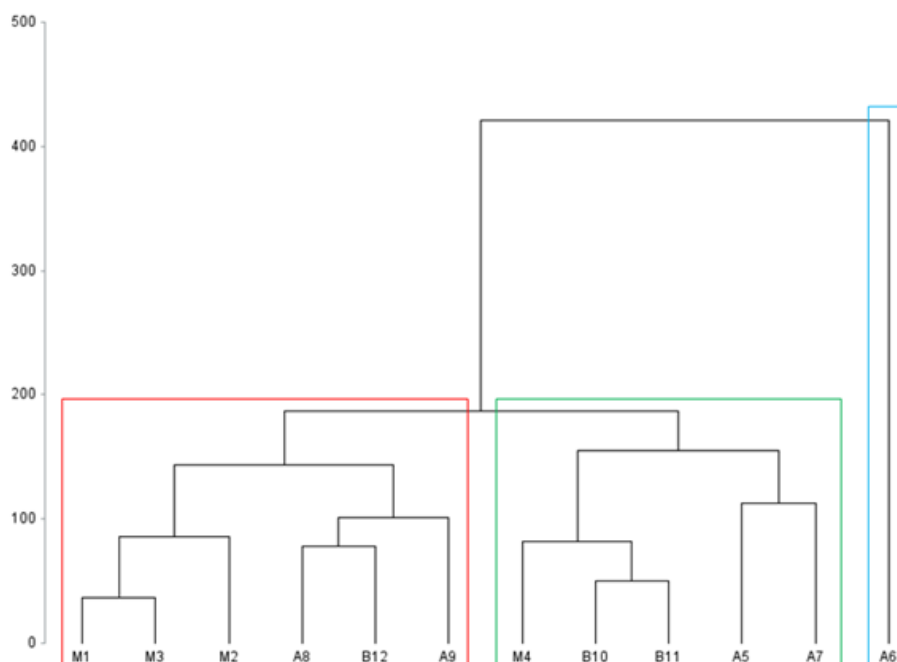


Figura 3.3. Clasificación de la regeneración *P. douglasiana* de acuerdo a su calidad morfológica y condiciones del sitio.

La letra inicial indica el nivel de severidad de incendio, M: medio B: bajo A: alto y el número de identificación del sitio.

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron tres grupos en función de la calidad morfológica y factores ambientales. El primer grupo (rectángulo rojo) se conformó por plantas que se calificaron como de mejor calidad determinadas por el IL y IE en una exposición norte y un 58 % de pendiente; esto puede ser atribuido a que en esta exposición y particularmente en la exposición noreste se tiene una menor cantidad de radiación solar directa lo largo del año, por lo tanto, tienden a ser más húmedas con menor temperatura que las exposiciones sur. Asimismo,

presenta mayor diversidad de plantas, lo que provoca que la especie de *P. douglasiana* esté en competitividad con otras especies.

En el segundo grupo (rectángulo verde), respecto al factor exposición, la regeneración presentó mejor altura en la orientación este. Análogamente la humedad de la exposición noreste benefició una mayor altura, con respecto a la exposición norte, donde las plantas presentaron menor altura. Ramírez-Contreras (2004) reporta una mayor altura y diámetro en regeneración ubicada en la exposición suroeste. Análogamente la luminosidad favoreció una mayor altura, con respecto a la exposición norte y este; y debido a la nuevas herbáceas y vegetación intolerante a la sombra que promueve la competitividad entre plantas, en respuesta a este factor las coníferas desarrollan mayor altura.

En el tercer grupo (rectángulo azul) las plantas presentes en la exposición sur se diferenciaron por tener mayor AF y menor IL, y aunque no se han establecidos rangos para calificarlas en términos de calidad, se consideran plantas aptas con mayores probabilidades de sobrevivencia en relación a la mayoría de índices determinados; esto puede ser por la posición del terreno, ya que en la mayor parte del día existe mayor radiación solar en pendientes del 20 %, donde las plantas presentaron mayor LR desarrollando una morfología pivotante con mayor capacidad de absorción del recurso agua. De este modo, después de un incendio de severidad alta las propiedades del suelo se perciben afectadas, aumentando la hidrofobicidad. En el área de severidad alta, se encontraron evidencias de cenizas blancas, lo que indica la previa combustión de toda la vegetación, dejando desprovisto al suelo, generando en los primeros meses después del incendio una volatilización de nutrientes lo que aumenta y afecta la temperatura del suelo, y por ende produce la pérdida de agua por evaporación disminuyendo la disponibilidad de este recurso (Stavi 2019).

### **3.4 DISCUSIÓN**

El DCR de las plantas provenientes de los tres NSI no mostraron diferencias significativas y de acuerdo a la prueba de medias Duncan el mayor diámetro de 4.15 mm fue para plantas del nivel alto. Sánchez y Murillo (2004) destacan en su estudio un valor promedio de 4 cm en plantas de dos años de edad en vivero como

criterio límite de salida a campo para su sobrevivencia (Cuadro 3). Rueda-Sánchez *et al.* (2012) reportan para plantas de siete meses de edad en especies arbóreas de clima templado, promedios de DCR de 2.4 mm. Por su parte, Sáenz *et al.* (2014) obtuvieron promedios de 3.6 mm en *P. greggii* y 7.1 mm en *P. michoacana*. Vicente-Arbona *et al.* (2019) encontraron un intervalo de DCR de la especie *P. greggii* de 4 a 6 mm; mientras que Villegas-Jiménez *et al.* (2013) a los 5.5 meses reportaron un diámetro de 2.49 mm en *P. pseudostrobus*. El DCR de especies del género *Pinus* incide en la supervivencia de las plantas en los primeros meses de establecimiento, ya que está principalmente relacionada con la provisión de carbohidratos no estructurales y con el desarrollo de las raíces (Luna, 2019). Prieto *et al.* (2009), afirman que las plantas con diámetros mayores a 5 mm son los más robustos y resistentes frente a daños. Muñoz *et al.* (2015) ratifican que plantas mayores de 4 mm de DCR son las más resistentes a doblarse por vientos o lluvias. De acuerdo a lo anterior las plantas encontradas respecto a su DCR no califican en este valor de referencia por lo tanto indica que están vulnerables a doblamiento por viento e incapaces de sostener tallos muy elongados. Esto puede deberse a las condiciones en las que se encuentran las plantas en el sitio, al estar agrupadas compitiendo por luz limitándose a crecer en diámetro.

Los valores que se obtuvieron para la variable A de planta fueron superiores al valor obtenido por Castellanos-Acuña *et al.* (2013) en plantas de siete meses de edad cultivado en vivero con 8.8 cm; diferente al valor reportado por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2020), de 25.1 cm en *P. pseudostrobus* y *P. oaxacacana*. Para la especie *P. pseudostrobus* Rueda-Sánchez *et al.* (2012) obtuvieron promedios 2.4 mm de diámetro y 13.7cm de altura. Por su parte, Sáenz-Romero *et al.* (2010) reportaron un promedio de 22.3 cm de altura y 4.3 mm de diámetro. Villegas-Jiménez *et al.* (2016) dan a conocer una altura de 16.6 cm y un diámetro de 2.49 mm a los 5.5 meses de edad en plantas de vivero. Grossnickle (2012) argumenta que atributos morfológicos como la A, permite definir la estructura de la planta, y esta define cual es la más óptima para cada especie. Sin embargo, Ureta *et al.* (2018) destacan que la altura es una característica importante cuando en el área se presentan condiciones adversas y que es oportuno una suficiente altura en situaciones



de competitividad. En este contexto, Reyes *et al.* (2018) deducen que plántulas con mayor A y menor DCR son los más vulnerables a sufrir daños mecánicos, pero que la planta achaparrada es más susceptible a ser pisada por animales, afectada por plagas y enfermedades; para este caso, es recomendable que las plantas tengan un buen tamaño que le permita competir con la nueva vegetación herbácea y arbustivos. En el presente estudio se encontró que las plantas con mayor altura se encuentran en el NSI medio y alto en las exposiciones n y so; esto se explica porque estas áreas presentan mayor espacio abierto y esto permite la entrada de más horas luz favoreciendo el crecimiento en altura, a diferencia de las plantas suprimidas en el NSI bajo que se encuentran restringidas en crecimiento por la vegetación asociada; sin embargo, son plantas que presentan mayor resistencia por los resultados favorables en sus DCR.

Buamscha *et al.* (2012) argumenta que las plantas tratan de desarrollar una raíz pivotante y profunda para absorber la mayor cantidad posible de agua cuando se encuentra en situaciones limitantes. La BR es una característica adaptativa que se relaciona positivamente con el crecimiento y supervivencia de la regeneración (Córdoba-Rodríguez *et al.* 2010). La BR en el estudio presentó valores más elevados en las plantas procedentes de la severidad alta, con un promedio de 0.87 g en correlación a los otros niveles. Según Fonseca (2017), la BR representa entre el 10 y 40 % de la BTOT, la relación BR y BTOT no es constante por los limitantes de un sitio después de una perturbación, así como de la variabilidad de los factores ambientales (Gárate y Blanco 2013). La diferencia de resultados para la variable LR en el presente estudio puede atribuirse a las diferentes condiciones ambientales en las que se encuentran, particularmente en el área de severidad de incendio alto que se encuentra en altas pendientes y en exposición sur con temperaturas más intensas, lo que modifica la morfología de la raíz de las plantas para su sobrevivencia. Para la mayoría de plantas en todos los NSI presentaron raíces pivotantes con fibrosidad, lo que indica que son raíces más activas que aumentan la superficie de la raíz para llegar a horizontes más profundos para absorber agua y nutrientes y por ende, es la parte donde se lleva a cabo las relaciones simbióticas. Esta capacidad de las plantas de desarrollar una mayor longitud de raíces aumenta las expectativas de desarrollo.

La calidad alta en plantas procedentes de los tres NSI calificadas por la relación A/LR, puede ser atribuido a sus ajustes en la relación fuente-demanda de agua en las plantas. Buamscha *et al.* (2012) indican que cuanto más elongado es el tallo de una planta, menor relación positiva es la A/LR. Fisiológicamente, una buena relación raíz/tallo puede tener mejor oportunidad en la absorción y distribución de agua, por lo tanto, la planta tendrá menor exigencia del vital líquido y tenderá a un crecimiento más rápido (Close *et al.* 2010).

Respecto al índice BA/BS las plantas fueron calificadas de baja calidad, con valores obtenidos muy por encima de los rangos establecidos para este índice. Robles-Villanueva *et al.* (2017) encontraron valores máximos de tres en plantas de dos años de edad. Por su parte, Aguilera-Rodríguez *et al.* (2016), reportaron valores de 3.1 a 4.6 g en plantas establecidas en campo. En este sentido, Hernández-Ramos *et al.* (2017), mencionan que una planta de buena calidad presenta cocientes bajos en esta relación. Córdoba-Rodríguez *et al.* (2011) enfatiza que la Relación BA/BS con valores altos es común cuando las distintas especies se encuentran en un estrés hídrico, por lo que las plantas mantienen un equilibrio entre la hidratación por agua y la transpiración del follaje. En este estudio es evidente que existe una desproporcionalidad entre la parte aérea y subterránea de las plantas, donde la biomasa subterránea es menor a la aérea y por ende la raíz es incapaz de solventar de los nutrimentos suficientes y carentes en el suelo hacia la parte aérea. Sin embargo, la desproporción entre la BA y la BR puede atribuirse también a los diversos factores adversos a la cual las plantas se van adaptando para su sobrevivencia. Se debe tener en cuenta que esta relación puede variar conforme la planta va creciendo, así como por labores silvícolas, las plantas encontradas aun calificándose de baja calidad en los tres NSI en este estudio presentan raíces pivotantes sin raíces laterales, lo que disminuye las probabilidades de mortandad.

Respecto al ICD las plantas provenientes de los tres NSI presentaron calidad alta en comparación con Falcón-Oconor *et al.* (2021), quienes refieren que un incremento en este índice se relaciona con una planta de calidad alta. Paucar-Bernaola *et al.* (2015) obtuvieron un valor de 5.03 en el ICD para *P. douglasiana* a los seis meses de edad, indicando que este fue el mejor índice de calidad para esta especie. Desde la

posición de Luna (2019) en ensayos realizados en coníferas, sostiene que este índice diferencia positivamente el potencial de supervivencia de plántulas de diferentes tamaños y edades. Teniendo en cuenta a Sáenz *et al.* (2014) dan a conocer en especies como *P. greggii* y *P. pseudostrobus* calidad media y para *P. michoacana*, calidad alta. Este índice facilita comparar la calidad de las plantas de diferentes tamaños encontradas en el área quemada debido a que relaciona varias variables e indica la proporcionalidad de las plantas en cuanto a su peso y tamaño, encontrándose en este estudio valores superiores a las de referencia, tomando en cuenta el peso seco aéreo que otros parámetros fueron mejor calificadas al ser más altas, su peso seco también, por lo tanto, el ICD resultó mayor. De acuerdo con Ureta *et al.* (2018), lo deseable es que las plantas alcancen los máximos valores con este índice, lo cual involucra que, por un lado, la planta sea robusta con buen crecimiento y que al mismo tiempo las fracciones aéreas y radicales estén equilibradas

En un estudio realizado por Rueda-Sánchez *et al.* (2014) encontraron valores para el IE de 1.6 para *P. devoniana* a los siete meses de edad y hasta 10.4 para *P. greggii* de nueve meses por Sáenz-Reyes *et al.* (2014). Sin embargo, Robles-Villanueva *et al.* (2017) obtuvieron valores de 4.7 en este índice en la especie *P. montezumae* establecida en campo a los dos años de edad. Escobar-Alonso y Rodríguez-Trejo (2019) analizan que la relación A/DCR cuanto menor sea el valor, indicará una planta baja y gruesa, lo que la convierte apta a niveles desfavorables a varios factores ambientales como a la deficiencia hídrica. Por lo tanto, la planta mejor apta para resistir las condiciones adversas tomando en cuenta las variables que relaciona este índice en el estudio realizado, son las que están establecidas en el área del NSI medio calificadas como de media calidad, por lo tanto las plantas del NSI bajo y alto tienden a tener bajas expectativas de sobrevivencia, menor crecimiento que es obstaculizada por la densidad residual del arbolado adulto en el nivel bajo y mayor desecación por el aire en el NSI alto por la pérdida de vegetación total, dejando en vulnerabilidad a factores ambientales a la regeneración. El DCR como indicador por sí solo las califica como de media y alta calidad en relación a su altura en el área que se encuentran y esto es referido a una

respuesta de sobrevivencia y adaptabilidad ante los factores perjudiciales en las que se encuentran después del incendio y se podría mejorar con una regularización de la densidad. En cuanto al IL, Ureta-Leones *et al.* (2018) resaltan que entre mayor sea el porcentaje de humedad, las plantas tienden a tener mayores posibilidades de aclimatarse a factores ambientales limitantes. Al respecto, no se encontraron resultados de investigación sobre el porcentaje de lignificación para regeneración después de un incendio para realizar una comparación. Sin embargo, Ávila-Flores *et al.* (2014) registraron para *P. engelmannii* valores de 24.30, 25.03 y 26.63 %, al evaluar la reducción en la disponibilidad de humedad como preacondicionamiento; en *P. leiophylla* fue de 30.9 %, al considerar sustratos y tasas de adición de nutrientes (Buendía-Velázquez *et al.* 2017). Determinar la humedad de una planta es poco preciso por la variabilidad de herramientas, metodologías, tiempo y costos que se le apuesta, pero cabe mencionar que en las coníferas los valores óptimos de lignina están entre 25 y 30 %. Los resultados obtenidos en el estudio las plantas calificadas de buena calidad en el NSI medio superan este rango, estimulando el buen desarrollo de yemas apicales, crecimiento y follaje suculento con mejor soporte ante el estrés hídrico y más resistentes a factores ambientales. Los contenidos de lignina pueden deberse también al gran contenido de necromasa sobre el suelo, lo que coadyuva a retener una mayor cantidad de humedad. También puede deberse a la exposición N y NE en el que se encuentran dichos sitios, ya que reciben menor cantidad de radiación solar directa, por lo tanto, son áreas más húmedas. Desde el punto de vista de Carhuamaca (2016), las plantas que poseen mayor lignificación son los más resistentes a la competencia, patógenos, herbáceas y cambios ambientales. Las diferencias estadísticas en AF de las plantas puede atribuirse a que existe mayor apertura de espacios desprovistos de vegetación lo que permite mayor entrada de luz a lo cual las plantas del NSI alto, realizan mayor fotosíntesis desarrollando más área AF. Por otro lado, el rápido crecimiento en AF puede afectar negativamente a que la planta se adapte a la disminución de agua en épocas de sequía. Otro factor de las plantas encontradas con mayor AF es su genética, ya que estas plantas proceden de progenitores con caracteres no deseables; por lo tanto, las plantas evaluadas presentaron ramas y bifurcaciones lo que

aumenta su expansión foliar lo que retribuye en una desproporcionalidad en la relación BA/BS calificándolas de mala calidad. También es importante considerar que la especie *P. douglasiana* es una especie de carácter intolerante a la sombra y que necesita de suficiente luz en las etapas juveniles para poder desarrollarse adecuadamente. Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012), señalan que el vigor de una planta se puede evaluar a través de su follaje, que representa de 4 a 6 % de la biomasa total del árbol, siendo el AF la parte vegetativa más importante para los procesos fisiológicos. Rodríguez *et al.* (2020), reportaron valores de 384.7, 368.6, 371.2 y 387.3 cm<sup>2</sup> para la especie de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* selectos como superiores en cuatro poblaciones del sur de México. Desde el punto de vista de Rodríguez-Ortiz (2011) el AF es un factor que se debe tomar en cuenta en la productividad futuro del bosque, ya que a nivel ecosistema el AF regula la intercesión de luz, el almacenamiento de carbono y la transpiración.

Los resultados del análisis clúster corroboran que los indicadores de calidad morfológica y factores cualitativos del sitio determinan la existencia de grupos, resultando una información de gran utilidad para la restauración de bosques degradados. Los resultados obtenidos en esta investigación para los índices de ICD, IL y la relación A/LR, expresan una alta variabilidad en relación con el índice de IE y la relación BA/BS, cuyos valores expresaron una variabilidad aceptable. Sin embargo, la calidad de planta en las coníferas en áreas quemadas puede ser considerado relativo, ya que los requerimientos de la planta pueden variar ya sea por los factores climáticos, topográficos, edáficos y especie. Estas características influyen en la demanda de una o más características morfológicas de la regeneración para su desarrollo y crecimiento. Finalmente, los índices de calidad tienen una gran importancia y al ser evaluadas pueden describir fácilmente la calidad de una planta y pueden servir como indicadores para mejorar y contribuir en mejorar la calidad en próximos años.

### **3.5 CONCLUSIONES**

Para el IE las plantas presentaron baja calidad en los niveles de intensidad bajo y alto y una calidad media para plantas del nivel de severidad medio (7.45 cm). En el ICD las plantas se calificaron de calidad alta, 7.36,

5.63 y 6.69. Los valores del IL del 44.3, 45.06 y 39.54 % para el nivel bajo, medio y alto, las califica como de alta calidad y resistencia a factores ambientales y una capacidad alta en la mayoría de plantas para absorción de agua, agrupándolas dentro del rango de lignificación para coníferas. La relación BA/BS no presentó valores recomendados según los intervalos de calidad; no obstante, se observó una mejor proporción entre la AI y LR. Los resultados obtenidos en esta investigación para los Índices de BA/BS y IE muestran una variabilidad calificando a plantas como de baja calidad, en contraposición con el ICD, DCR, AL/LR, AF e IL; cuyos valores calificaron a las plantas de media y alta calidad en los tres niveles de severidad de incendio.

### 3.6 AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el financiamiento otorgado al primer autor para estudiar en el Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Se agradece al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto de investigación “Regeneración natural post-incendio de bosques de pino-encino, caso Nejapa de Madero, Oaxaca. Clave: 15324.22-P; en el marco de la Convocatoria para Proyectos de Desarrollo Tecnológico e Innovación para Estudiantes 2022.

### 3.7 LITERATURA CITADA

- Aguilera-Rodríguez M, Aldrete A, Martínez-Trinidad T, Ordáz-Chaparro VM (2016) Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia*. 50(1): 107–118.
- Ávila-Flores IJ, Prieto-Ruiz JA, Hernández-Díaz JC, Whehenkel CA, Javier Corral-Rivas J (2014). Preconditioning *Pinus engelmannii* Carr. Seedlings by irrigation deficit in nursery. *Ciencias Forestales y Del Ambiente*. 20(3): 237–245. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.004>.
- Buamscha MG, Contardi LT, Kasten DR, Enricci JA, Escobar R, Gonda HE, Jacobos DF, Landis TD, Luna T, Mexal JG, Wilkinson KM. 2012. *Producción de plantas en viveros forestales. 1a ed. Argentina.CFI*.
- Buendía-Velázquez MV, López-López MÁ, Cetina-Alcalá VM, Diakite L (2017) Substrates and nutrient addition rates affect morphology and physiology of *Pinus leiophylla* seedlings in the nursery stage. *Biogeosciences and Forestry*. 10(1): 115–120. <https://doi.org/10.3832/ifer1982-009>.

- Carhuamaca K (2016) Diagnóstico de calidad de plantas clonales de la especie forestal *Eucalyptus urograndis* producidas en un prototipo de producción clonal (PPC)–Palca–Tarma–Junín. In: Quispe, A. (coord.). Junín, Perú, Arborizaciones E.I.R.L. 93 p. Informe final. Fondo Proyecto “Desarrollo de un prototipo productivo clonal – PPC para incrementar la productividad y calidad de las plantaciones de eucalipto y posterior comercialización a viveros forestales del Perú” (PIPEI-8-P-332-418-14).
- Castellanos-Acuña D, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Sánchez-Vargas NM, Lobbit P, Montero-Castro JC (2013) Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo en vivero. Ciencias Forestales y Del Ambiente. 19(3): 399–411. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>.
- Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-Del Valle JR, Velasco-Velasco VA, Gómez-Cárdenas M (2017) Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. Madera y Bosques. 23(3):147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>.
- Close DC, Paterson S, Corkrey R, McArthur C (2010) Influences of seedling size, container type and mammal browsing on the establishment of *Eucalyptus globulus* in plantation forestry. New Forests. 39(1): 105–115. <https://doi.org/10.1007/s11056-009-9158-3>.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2021) Cierre estadístico 2021. Coordinación General de Conservación y Restauración Gerencia de Manejo del Fuego. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/691111/Cierre\\_de\\_la\\_Temporada\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/691111/Cierre_de_la_Temporada_2021.pdf)
- Córdoba-Rodríguez D, Vargas-Hernández J, López-Upton J, Muñoz-Orozco A (2010) Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. Agrociencia, 45(4): 493–506.
- Cortés-Cabrera HE, Jurado E, Pompa-García M, Aguirre-Calderón OA, Pando-Moreno M, González-Tagle MA (2018) Efecto del fuego y la elevación en la regeneración de *Pinus hartwegii* Lindl. en el noreste de México. Chapingo Journal Forest and Environmental Science Series. 24(2): 197-205. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.09.057>.
- Escobar-Alonso S, Rodríguez-Trejo DA (2019) Estado del arte en la investigación sobre calidad de planta del género *Pinus* en México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 10(55): <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.558>.
- Falcón-Oconor E, Cobas-López M, Bonilla-Vichot M, Rodríguez-Leyva O, Romero-Castillo CV, Rodríguez-Leyva E (2021) Calidad de plántulas de *Swietenia mahagoni* L. Jacq. producida en sustratos inoculados con hongo micorrízico arbuscular. Ciencias Ambientales. 55(2): 311–225. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.15>.

- Fernández-Méndez F, Velasco-Salcedo V, Guerrero-Contecha J, Galvis M, Viana-Neri A (2016) Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca Tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*. 19(2):19-36.
- Flores-Rodríguez AG, Flores-Garnica JG, González-Eguiarte DR, Gallegos-Rodríguez A, Zarazúa-Villaseñor P, Mena-Munguía S, Lomelí-Zavala ME, Ruíz-Guzmán E (2021) Pine and oak natural regeneration under different levels of forest fire disturbance. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.776>.
- Fonseca W (2017) Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*. 51(2): 91. <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>.
- Gárate, M, y Blanco JA. 2013. Importance of root biomass characterization when simulating forest ecosystems. *Ecosistemas*. 22(3): 66–73. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.10>.
- García-Barrios L, González-Espinosa M (2017) Investigación ecológica participativa como apoyo de procesos de manejo y restauración forestal, agroforestal y silvopastoril en territorios campesinos. Experiencias recientes y retos en la sierra Madre de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88: 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.022>.
- Grossnickle SC (2012) Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*. 43(5–6): 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>.
- Hernández-Ramos J, De Los Santos-Posadas HM, René Valdez-Lazalde J, Carlos Tamarit-Urias J, Ángeles-Pérez G, Hernández-Ramos A, Peduzzi A, Carrero O, Responsable, A (2017) Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921–938.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>
- Luna, CV (2019) Evaluación de sustratos y concentraciones de fertilizantes sobre el crecimiento de pino tadea (*Pinus taeda* L.) en vivero. *Agronómica Del Noroeste Argentino*. 39(1): 19–29.
- Muñoz, J (2017) Natural regeneration: A review of the ecological aspects in the tropical mountain forest of southern Ecuador. *Revista Latitud Cero*. 7(2): 130–143.
- Paucar-Bernaola RM, Zamora-Natera JF, Vargas-Radillo J, Cetina-Alcalá VM, Rodríguez-Macías R, Salcedo-Pérez E (2015) Plant quality of two pine species at nursery stage in a double-transplanting system. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 7(33): 74–93.



- Prieto RJA, García RJL, Mejía BJM, Huchin AS, Aguilar VJL (2009) Producción de plántula del género *Pinus* en vivero del clima templado frío. Publicación Especial N° 28. Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP-SAGARPA. México. 48 pp.
- Quipse-Santos, A (2017) Cadena productiva y estrategias para la promoción de plantaciones forestales con fines comerciales y sostenibles.
- Ramos-Huapaya AE, Lombardi-Indacochea, IR (2020) Calidad de plantas en un vivero de tecnología intermedia en Huánuco: Estudio de caso con *Eucalipto urograndis*. Revista Forestal Del Perú: 35(2), 132–145. <https://doi.org/10.21704/rfp.v35i2.1581>.
- Reyes-Reyes J, Pimienta-de la Torre D de J, Rodríguez-Morales JA, Fuentes-Pérez MA, Palomeque-Figueroa E (2018) Calidad de planta de *Gmelina arborea* Roxb. producida con diferentes mezclas de sustratos en vivero. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 9(47): 111-130. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.163>.
- Robles-Villanueva F, Rodríguez-Trejo DA, Villanueva-Morales A (2017) Calidad de planta y supervivencia en reforestación de *Pinus montezumae* Lamb. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 8(42): 55–76.
- Rodríguez-Ortiz G, David Aragón-Peralta, R, Enríquez-Del Valle JR, Hernández-Hernández A., Santiago-García W, Campos-Angeles GV (2020) Plant quality of selected progenies of *Pinus pseudostrabus* Lindl. var. *oaxacana* from southern México. Revista Madera y Bosques. 45(2): 96–101.
- Rodríguez-Ortiz G, De los Santos-Posadas HM, González-Hernández AA, Gómez-Guerrero A, Fierros-González AM (2012) Above-ground and needle biomass models on a fast-growing pine plantation in Oaxaca. Madera y Bosques. 18(1):25–41.
- Rodríguez-Ortiz G, González-Hernández VA, Aldrete A, De Los Santos-Posadas H, Gómez-Guerrero A, Fierros-González AM (2011) Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. Revista Fitotecnia Mexicana. 34(3): 205-2012
- Rueda-Sánchez A, de Dios J, Solorio B, Prieto-Ruiz JÁ, Trinidad-Sáenz Reyes J, Orozco-Gutiérrez G, Castañeda AM (2012) Calidad de planta producida en los viveros forestales de Jalisco quality of plants proceced in forest nurseries in Jalisco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 3(14): 69–82.
- Sáenz Reyes M, Trinidad J, Flores M, Jesús H, Miguel Ángel C, Sánchez R, y Ramos H (2014) Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero “Morelia”, estado de Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 5(26): 98–111. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439016008>.
- Sáenz-Romero JT, Muñoz FHJ, Villaseñor RF, Prieto RJA, Rueda SA (2010) Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. México. 50 pp.

- Stavi I (2019) Wildfires in grasslands and shrublands: A Review of impacts on vegetation, soil, hydrology and geomorphology. *Water*. 11 (5):1042. <https://doi.org/10.3390/w11051042>.
- Ureta-Leones DA, García-Quintana Y, Arteaga-Crespo Y, Morales-Moreno A, Lazo Pérez Y, Jalca I (2018) Método de clasificación a partir del diagnóstico de calidad morfológica en vivero para la selección de especies forestales promisorias en programas de restauración. *Revista Amazónica y Ciencia y Tecnología*. 7(3): 142–150. <http://revistas.proeditio.com/revistamazonica>.
- Vicente-Arbona JC, Carrasco-Hernández V, Rodríguez-Trejo DA, Villanueva-Morales A (2019) Seedling quality of *Pinus greggii* produced in sawdust-based growing media. *Madera y Bosques*. 25(2): <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521784>.
- Villalón-Mendoza H, Ramos-Reyes JC, Vega-López JA, Marino B, Muños-Palomino MA, Garza-Ocañas F (2016) Nursery oak seedlings quality variables for *Quercus canby* Trel. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 12(1): 46–52.
- Villegas-Jiménez DE, Rodríguez-Ortiz G, Velasco-Velasco VA, Ruiz-Luna J, Carrillo-Rodríguez JC, Ramírez-Sánchez SE (2013) Aboveground biomass allocation of *Pinus greggii* provenances planted in southern México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36(4):421–427.
- Villegas-Jiménez, DE, Rodríguez-Ortiz G, Chávez-Servia JJ, Enríquez-del-Valle JR, Cruz-Carrillo JJ (2016) Variación del crecimiento en vivero entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Gayana Bot*. 73: 113-123.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE LA REGENERACIÓN Y PISO FORESTAL EN RODAL INCENDIADO DEL SUR DE MÉXICO

#### [ANALYSIS OF THE REGENERATION AND FOREST FLOOR IN A FIRED STAND AT SOUTHERN MEXICO]

Rosario Aquino-López <sup>a</sup>  
Ernesto Castañeda-Hidalgo <sup>b\*</sup>  
Gerardo Rodríguez-Ortiz <sup>c</sup>  
Gisela M. Santiago-Martínez <sup>d</sup>  
Ángel-Bustamante González <sup>e</sup>  
Salvador Lozano-Trejo <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. <https://orcid.org/0000-0001-5911-9880>

\*Autor para correspondencia <sup>b</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. Tel: +52 9511977218. ID ORCID <https://orcid.org/0000-0001->

[9296-1439.casta\\_h50@hotmail.com](mailto:9296-1439.casta_h50@hotmail.com)<sup>e</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ID ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0963-8046>

<sup>d</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ID ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0064-7010>

<sup>c</sup> Colegio de Posgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores S/N, Puebla, Puebla. <https://orcid.org/0000-00020727-9505>

<sup>f</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ID ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6809-948X>

## RESUMEN

Los bosques templados de pino-encino brindan múltiples bienes y servicios ecosistémicos; sin embargo, están expuestos a una gran diversidad de perturbaciones naturales, como los incendios forestales. El objetivo fue determinar el efecto post-incendio sobre la estructura residual, regeneración natural y piso forestal. En el año 2022 se establecieron 12 sitios de forma dirigida en tres áreas con diferente condición de severidad de incendio (alto, medio y bajo). Se realizó el inventario dasométrico arbóreo y del piso forestal para determinar su biomasa, se registró las coordenadas (X, Y) de la regeneración natural para determinar su distribución espacial. Los niveles de severidad se diferenciaron mediante el modelo lineal generalizado y comparación de medias (Duncan, 0,05). La acumulación de biomasa superficial (humus y hojarasca) y gravedad específica del suelo no presentaron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre los niveles de severidad (978,26 t ha<sup>-1</sup>). Sitios con niveles altos en severidad se caracterizan por presentar mayor acumulación de biomasa en el material muerto superficial (287,91 t ha<sup>-1</sup>), lo cual dificulta el establecimiento de la regeneración natural. La estructura arbórea residual del rodal incendiado mejor conservada se encontró en sitios con nivel de severidad medio, ya que acumulan montos de biomasa de 134,3 t ha<sup>-1</sup>. En el mismo sentido, estos sitios con severidad media contienen la mayor densidad de regeneración (1.237 plantas ha<sup>-1</sup>), misma que se reduce hasta en un 79% en sitios con severidad alta. La distribución de la regeneración corresponde a un patrón agregado en los tres niveles. El bosque presenta cambios contiguos positivos y negativos postincendio.

*Palabras clave:* Agua Blanca, distribución espacial, pino-encino, severidad.

## ABSTRACT

Temperate pine-oak forests provide multiple ecosystem goods and services; however, they are exposed to a great diversity of natural disturbances, such as forest fires. The objective was to determine the post-fire effect on the residual structure, regeneration and forest floor. In the year 2022, 12 sites were established using selected sampling in three areas with different fire severity conditions (high, medium and low). The inventory of tree and forest floor was carried out to determine the aboveground biomass, the coordinates (X, Y) of natural regeneration were recorded to determine its spatial distribution. The severity levels were differentiated using the generalized linear model and comparison of means (Duncan, 0,05). Aboveground biomass accumulation (humus and litter) and soil specific gravity) did not show significant differences ( $P > 0,05$ ) between severity levels (978,26 t ha<sup>-1</sup>). Sites with high levels of severity have a greater accumulation of necromass (287,91 t ha<sup>-1</sup>), which makes it difficult to establish natural regeneration. The best-preserved residual tree structure of the burned stand was found in sites with medium severity level since they accumulate biomass amounts of 134,3 t ha<sup>-1</sup>. In the same sense, these sites with medium severity contain the highest regeneration density (1.237 plants ha<sup>-1</sup>), which is reduced by up to 79% in sites with high severity. The distribution of regeneration corresponds to an aggregate pattern across the three levels. The forest presents contiguous positive and negative post-fire changes.

*Key words:* Agua Blanca, aboveground biomass, spatial distribution, pine-oak, fire severity.

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son una perturbación a nivel mundial que afecta la composición y estructura de un bosque (Promis *et al.* 2019). Este fenómeno es un factor al que están expuestos los ecosistemas año tras año (Flores *et al.* 2021). En las últimas décadas se ha documentado un incremento en la contingencia de los incendios a nivel nacional (Promis *et al.* 2019); y estos son considerados uno de los principales elementos de degradación de los ecosistemas nativos, aminorando la provisión de los servicios ecosistémicos (Flores-Garnica 2021, Rosales-Rodríguez *et al.* 2018). Específicamente para el estado de Oaxaca, el impacto ha sido cada vez mayor, con un

promedio de 163 incendios forestales al año, que afectan 37.236 ha de vegetación arbórea y sus recursos asociados (CONAFOR 2022).

Sin embargo, todos los incendios que se suscitan son diferentes y por lo tanto los ecosistemas tienen diferentes respuestas ante este impacto (Flores-Rodríguez *et al.* 2021). Respectivamente son necesarios para algunas coníferas y latifoliadas influyendo en su regeneración y reproducción. La severidad de un incendio es definida como el nivel de alteración de un sitio que se relaciona con la intensidad del fuego y su permanencia en dicha área (Juárez-Martínez y Rodríguez-Trejo 2003). Un incendio de alta severidad sobre un bosque, se relaciona con porcentajes inferiores de regeneración, los efectos sobre el piso forestal influyen en el renuevo creando una heterogeneidad en la densidad y en los patrones de distribución por la competitividad por espacio y nutrientes del suelo, que a futuro crea consecuencias importantes para el desarrollo y ordenación de la nueva masa forestal (Ávila-Flores *et al.* 2014, Rubio-Camacho *et al.* 2017, Villegas-Jiménez *et al.* 2013). Asimismo, la cantidad de material leñoso grueso caído sobre la superficie, exposición, pendientes y condiciones climáticas que modifican los depósitos de biomasa en el piso forestal después de un incendio, pueden ser indicadores para conocer el grado de vulnerabilidad y riesgo de nuevos incendios con mayor severidad (Hernández-García *et al.* 2016, Chávez-Pascual *et al.* 2017).

Los incendios de baja y media severidad, resultan en ocasiones benéficos para el ecosistema, algunas especies se favorecen por los espacios abiertos por donde penetra la luz solar y esto favorece el crecimiento de ejemplares que son intolerantes a la sombra como la mayoría del género *Pinus* (Juárez-Martínez y Rodríguez-Trejo 2004). Otro beneficio de las áreas quemadas de estos grados es que reservan mayores cantidades de nutrientes, ya que las cenizas contienen diversos cationes básicos; así mismo, el color oscuro de los sitios quemados interfiere sobre la temperatura del suelo volviéndola más cálida y benéfica para el renuevo (Stavi 2019). En especies como *Pinus douglasiana* Martínez el fuego suscita la apertura de sus estróbilos serótinicos, para dispersar sus semillas y en la mayoría de especies del género *Quercus* se promueve su capacidad de rebrotamiento; sin embargo, preexisten evidencias de que los incendios forestales promueven una exuberante regeneración natural, particularmente en los bosques de coníferas, donde se ha documentado que en los sitios quemados se presenta con mayor densidad que en los sitios no quemados (Flores-Garnica *et al.* 2021).

Actualmente son limitados los estudios relacionados sobre los ecosistemas resultantes post-incendio y los procesos ecológicos para su recuperación, presentándose escasa información sobre

los individuos que sobreviven y que con el tiempo influyen en la producción de semilla para la regeneración y restauración del área (Razo-Zárate *et al.* 2013, Muñoz 2017). Lo anterior, incrementa la importancia de evaluar la biomasa en el piso forestal, ya que al generar dicha información contribuye al conocimiento de procesos sobresalientes como la productividad del bosque, y la regeneración natural que implica un análisis de su patrón de distribución espacial a fin de conocer la condición real del medio ecológico, su capacidad de resiliencia y sucesión después de un incendio (Rodríguez-Ortiz *et al.* 2019).

La comunidad de Agua Blanca del municipio de Nejapa de Madero tiene aprovechamiento maderable en 928,7 ha de pino-encino y en el año 2019 un rodal de 19,89 ha se incendió accidentalmente. Esto debido a la falta de manejo y ejecución de actividades complementarias enfocadas a reducir la gran cantidad de residuos sobre la superficie después del aprovechamiento, lo que junto con otros factores indujo al incendio con diferentes intensidades y severidades dentro del rodal, siendo el desperdicio el principal indicador de las condiciones de vulnerabilidad y de riesgo de sufrir nuevos incendios. Conocer las peculiaridades del efecto del incendio sobre el bosque de Agua Blanca, permitirá dirigir de forma apropiada una gestión sustentable del recurso forestal, buscando un punto medio entre producción, aprovechamiento y conservación del recurso natural, que ha sido el medio de vida de la comunidad. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto post-incendio sobre la estructura residual arbórea, regeneración natural y condiciones del piso forestal de rodal bajo manejo maderable de la comunidad de Agua Blanca, Nejapa de Madero, Oaxaca.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en un rodal incendiado de pino-encino de la comunidad de Agua Blanca, Nejapa de Madero, San Carlos Yautepec, Oaxaca, México. Esta localidad posee una superficie total de 9.325 ha, se caracteriza por albergar un bosque templado con diferentes estructuras vegetales de pino-encino, encino-pino, selva baja caducifolia y pastizal inducido. El área se ubica a una altitud media de 2.160 m, en las coordenadas geográficas 16° 39' 25" N y -95° 44' 28" O (Figura 1). El clima es C(w2), catalogado como templado subhúmedo, con una temperatura

promedio de 12 a 18 °C, lluvias en verano en un rango de 200-1,800 mm al año (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2020).

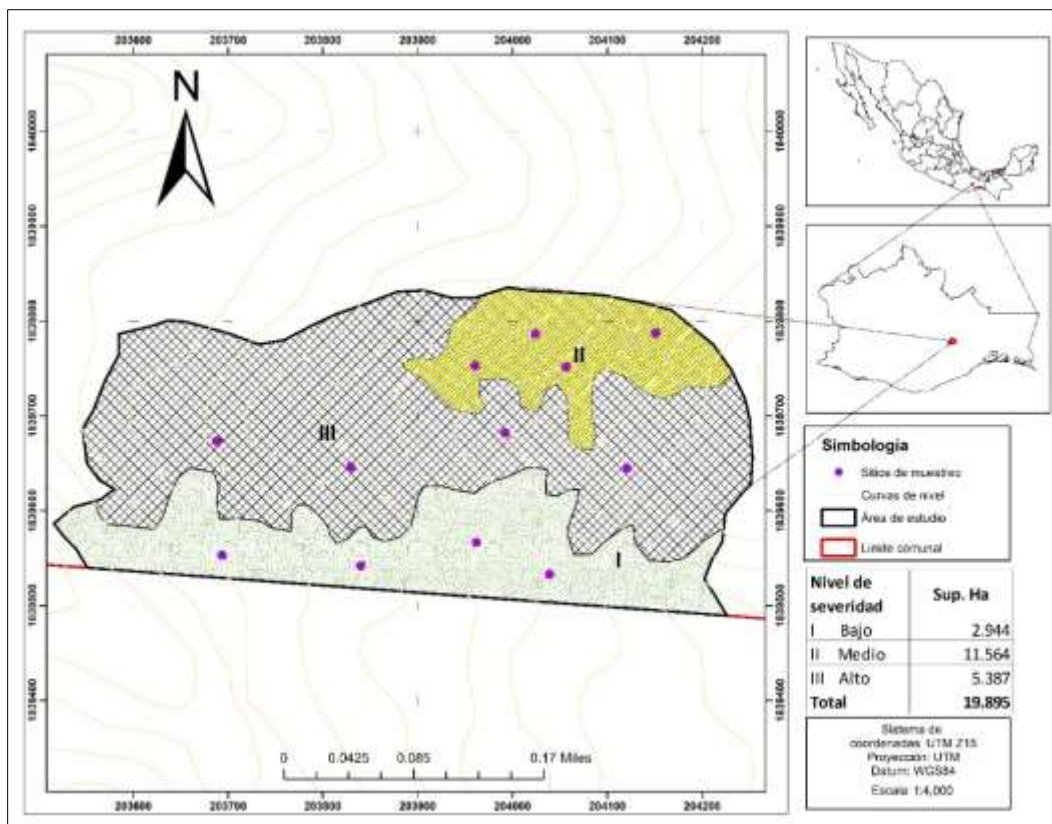
#### 4.2.2 Sitios de muestreo

En el 2022 se realizaron recorridos de campo e identificación de los diferentes niveles de severidad de incendio (NSI) ocurrido dos años atrás en una superficie de 19,89 ha. Para la generación de los datos se establecieron 12 sitios circulares de 400 m<sup>2</sup> tomando en cuenta la compensación por pendiente acorde a la metodología reportada por Chávez-Pascal *et al.* (2017). Se distribuyeron cuatro sitios de manera dirigida por cada área con distinto NSI (I bajo, II medio y III alto). La condición de severidad de los mismos se determinó con base en la variabilidad de las condiciones topográficas (pendiente, exposición, altitud) y densidad arbórea, a través de recorridos de campo y con ayuda del software ArcGis 10.3 y fotografías satelitales se sobrepuso el área de estudio para corroborar el paso del fuego.

#### 4.2.3 Inventario dasométrico arbóreo y muestreo del piso forestal

Por cada sitio y NSI se tomaron datos dasométricos del arbolado adulto, se midió el diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica (Hartmann ®, 283D) de la especie única en el área *P. douglasiana* Martínez, diámetro de copa (DC, m) con una cinta métrica (Truper ® TP50ME) y altura total (AT, cm) con un clinómetro (Haglöf ®, EC II D-HS115). Posteriormente se extrajo de tres a cuatro muestras (virutas) de la especie con un taladro Pressler (Haglöf®, Sweden). Consecutivamente se registraron las coordenadas planares de cada individuo (X, Y) de la regeneración natural pino-encino a la edad de dos años, el punto del centro del sitio se tomó como referencia para registrar las coordenadas, se utilizó una cinta métrica (Truper ® TP50ME) y un GPS (*global positioning system*) (Garmin GPSMAP 64sx).





**Figura 4.1.** Localización del área de estudio y sitios de muestreo en los diferentes niveles de severidad de incendio en Agua Blanca, Nejava de Madero.

**Figure 4.1.** Location of the study area and sampling sites at different levels of fire severity in Agua Blanca, Nejava de Madero.

Por cada sitio, mediante el uso de una brújula (60 mm Dc45-5d Ecom) se instalaron subsitios de 1 y 9 m<sup>2</sup> en la posición noroeste (NE) y suroeste (NE), estos fueron establecidos con rafia y enumerados acorde con el sentido de las manecillas del reloj. Para los subsitios de 1 m<sup>2</sup>, el muestreo consistió en el levantamiento de todo el material superficial por compartimento (hojarasca y humus), a la cual se obtuvo su peso fresco (PF g) en campo con una báscula de precisión (Dhaus, CS 5000, 5000±2 g). Para la obtención de las muestras de necromasa se utilizaron los subsitios de 9 m<sup>2</sup>, se obtuvo su PF con una báscula romana de 100 kg (Pretul<sup>®</sup>, 21255); la necromasa en rollo disponible se cubió con la fórmula de Smalian (Romahn de la Vega y Ramírez 2010). Finalmente, para la obtención de las muestras de suelo, se introdujo un tubo de PVC<sup>®</sup> de 30 cm de longitud y 4 cm de diámetro sobre el suelo para obtener el volumen del cilindro (VV, cm<sup>3</sup>). De todas las

muestras de los compartimentos, cuando estos eran bastos se obtuvo una submuestra, se obtuvo su PF y se guardaron en bolsas de papel estraza con su respectiva identificación.

#### 4.2.4 Análisis de laboratorio

Las muestras se evaluaron en el laboratorio de Agroecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Las virutas se pesaron en una báscula analítica (Shimadzu®, aty224,  $\pm 1$ mg) para determinar su peso verde (PV, g); el volumen verde (VV,  $\text{cm}^3$ ) se determinó con ayuda de un vernier digital y aplicando la fórmula de Newton (Romahn de la Vega y Ramírez 2010). Posteriormente se introdujeron a una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 105 °C, hasta obtener su peso seco (PS, g). Enseguida se obtuvo la gravedad específica,  $GE = PS / VV$  ( $\text{Kg cm}^{-3}$ ).

Finalmente se obtuvo el volumen total árbol con corteza (VTAcc,  $\text{m}^3$ ) del arbolado residual con el sistema biométrico forestal (Vargas-Larreta *et al.* 2017). La determinación de la biomasa se realizó utilizando su GE ( $\text{kg m}^{-3}$ ) por el volumen.

Las muestras de necromasa, humus y hojarasca se ingresaron a una estufa de secado (Memmert modelo UFP800DW) a una temperatura de 105 °C y 75 °C hasta alcanzar un peso constante, a estas muestras se les obtuvo su peso seco (PS, g). Para obtener los almacenamientos de biomasa en humus, hojarasca y necromasa primero se calculó el factor de conversión (FC) peso seco sobre el peso fresco (PS/PF),  $FC = PS / PV$ . Enseguida se calculó el peso de la biomasa (B) de cada compartimento:  $B = FC \times PFT$  (del total de la muestra). Para el análisis de suelo, las muestras representativas de suelo se ingresaron en la estufa de secado a 50 °C, para calcular gravedad específica (GE,  $\text{kg m}^3$ )  $GE = (PS / VV) \times 1000$ .

#### 4.2.5 Análisis de datos

Se generó la base de datos de biomasa ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de los compartimentos (humus, hojarasca y necromasa) y del arbolado residual.

El análisis de datos se realizó a través del programa *Statistical Analysis System* 9.4. Se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Shapiro-Wilk y Bartlett,  $\alpha=0,05$ ); se diferenciaron los niveles de severidad de incendio mediante modelo lineal generalizado (PROC GLM) y prueba de medias (Duncan, 0,05).

El patrón de distribución espacial de la regeneración natural se determinó mediante el índice K(t) de Ripley (Ripley 1977). Después el valor de K(t) se transformó a L(t) a través de la raíz cuadrada de la función propuesta por Besag y Diggle (1977), la cual proporciona la interpretación

gráfica del índice.  $K(t)$  y  $L(t)$  se estimaron con un nivel de significancia  $P \leq 0,01$  mediante simulaciones de Monte Carlo (Besag y Diggle 1977) con el software TOOL-BOX<sup>®</sup> (Fisher, 2000). Para determinar el patrón de distribución se tomó en cuenta el valor de  $L(t) = 0$  indica que el patrón espacial con radio  $t$  es aleatoria. Valores de  $L(t) > 0$  indican una distribución agrupada, y valores de  $L(t) < 0$  indican una distribución regular.

### 4.3 RESULTADOS

#### 4.3.1 Biomasa superficial y arbórea

Los niveles de severidad de incendio presentaron diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ) en la biomasa almacenada en el compartimento necromasa y humus. Para el caso de la variable humus se utilizó una función no paramétrica a través de rangos para disminuir el CV y obtener la diferenciación.

**Cuadro 4.1.** Resumen del análisis de varianza del efecto del nivel de severidad de incendio sobre la biomasa del piso forestal.

**Boards 4.1** Summary of the analysis of variance of the effect of the fire severity level on the forest floor biomass.

Variable	Nivel de severidad de incendio			
	GL error	$\sqrt{CME}$	Cuadrado medio (CME)	CV (%)
Área de copa ( $m^2 ha^{-1}$ ) <sup>t</sup>	21	0,06	0,004**	4,9
Diámetro normal (cm)	21	6,32	40,02**	24,0
Altura total (m)	21	2,06	4,25**	13,5
Humus ( $t ha^{-1}$ ) <sup>¶</sup>	21	637,38	47,86*	55,34
Hojarasca ( $t ha^{-1}$ )	21	4,12	17,03 <sup>ns</sup>	36,6
Necromasa ( $t ha^{-1}$ ) <sup>t</sup>	21	0,39	0,15*	16,5
Biomasa total arbórea ( $t ha^{-1}$ ) <sup>t</sup>	21	41,63	1733,29*	45,0
Biomasa total superficial ( $t ha^{-1}$ )	21	0,28	0,08 <sup>ns</sup>	9,8
Densidad (regeneración natural $ha^{-1}$ )	21	0,15	0,02**	11,0
Gravedad específica del suelo ( $kg m^3$ )	21	0,07	0,004 <sup>ns</sup>	2,4

GL= grados de libertad. \*\* = altamente significativo ( $P \leq 0,01$ ), \* = significativo ( $P \leq 0,05$ ), ns = no significativo ( $P > 0,05$ ),  $t$  = variable transformada  $\ln 10\sqrt{x+1}$ . <sup>†</sup>Valores en rangos de la prueba de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 0,05$ ).

En donde no se detectaron diferencias estadísticas ( $P > 0,05$ ) a pesar que la media por NSI es diferente fue en hojarasca debido a que mostró inflación de varianza ( $CV = 36\%$ ) como consecuencia de la gran heterogeneidad de los residuos post-incendio (Tabla 1).

Por otro lado, la biomasa total arbórea fue estadísticamente significativa ( $P \leq 0,05$ ) entre los NSI, esto debido a las diferencias en diámetro, altura y densidad residual. Es importante notar que estos NSI no se diferenciaron ( $P > 0,05$ ) en biomasa total superficial y GE del suelo (Tabla 1).

El NSI bajo mostró el valor más alto en biomasa total arbórea ( $134,3 \text{ t ha}^{-1}$ ), el cual fue estadísticamente distinto al NSI alto ( $45,4 \text{ t ha}^{-1}$ ) (Tabla 2). En este caso se obtuvo que el arbolado residual ubicado en sitios con NSI bajo y con menor altitud y en exposición este, acumuló más biomasa, en comparación al arbolado residual ubicado en las áreas de NSI medio y alto en exposición norte y suroeste a mayor altitud.

**Cuadro 4.2** Efecto de la severidad de incendio sobre la biomasa del piso forestal, arbolado residual y regeneración natural.

**Boards 4.2** Effect of fire severity on the biomass of the forest floor, residual trees and natural regeneration.

Variable	Nivel de severidad de incendio					
	I)	Bajo	II)	Medio	III)	Alto
Área de copa ( $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) <sup>t</sup>		467± 41,5b		908,3± 113, 8a		815,8± 92,3a
Diámetro normal (cm)		33,9± 3,8a		25,17± 0,5b		19,80± 0,2b
Altura total (m)		17,3± 0, 8a		15,7± 0,8a		12,76± 0,3b
Humus ( $\text{t ha}^{-1}$ )	516 (12,25)±	146(12.25)b	422,8(9,6)±	179(9.62)b	1.127,8(15,6)±	314(15.62)a
Hojarasca ( $\text{t ha}^{-1}$ )		11,3± 0,7a		12,5± 2,1a		9,23± 1,1a
Necromasa ( $\text{t ha}^{-1}$ ) <sup>t</sup>		61,5± 5,9b		200.9± 48,7ab		287,91± 103,7a
Densidad (regeneración $\text{ha}^{-1}$ )		256± 37,4b		1.237± 384,4a		987,5± 188,2a
Biomasa total ( $\text{t ha}^{-1}$ ) <sup>t</sup>	590.8(9,5)±	144(71)a	793(11,3)±	167,8(167)ab	1.425(16.62)±	357(357)b
Biomasa total arbórea ( $\text{t ha}^{-1}$ )		134,3± 31,1a		97,2± 12,7ab		45,4± 13b
GE del suelo ( $\text{g cm}^3$ )		787,8± 40,4a		747,52± 46,8a		816,12± 45,9a

Letras distintas en la misma fila representan diferencias significativas (Duncan 0,05). La media incluye  $\pm$  error estándar. Se indican los valores en rangos de la prueba de Kruskal-Wallis y (valores reales).

Sitios con NSI alto se caracterizan por tener los mayores contenidos de necromasa (287,91 t ha<sup>-1</sup>) y humus (1.127,8 t ha<sup>-1</sup>), y de biomasa total superficial (Tabla 2).

#### 4.3.2 Estructura residual de los árboles adultos

El DN, AT y AC se diferenciaron ( $P < 0,01$ ) entre los NSI presentándose árboles con mayor DN y AT en el NSI bajo, el cual se caracteriza por presentar una estructura diamétrica de tres pisos irregulares, con una inclinación descendiente hacia las clases mayores, específicamente desde la octava clase diamétrica (45-50 m) (Figura 3A); el NSI medio (Figura 3B) conserva una estructura arbórea regular que se compone de diferentes categorías de edad, donde la categoría diamétrica con mayor densidad fue de 20-25 cm, misma que redujo en árboles jóvenes y adultos.

Los sitios con NSI alto (Figura 3C) tienden a mostrar una estructura diamétrica irregular o “J” invertida, esto indica que existe una disminución en la densidad de los árboles, en relación al aumento del diámetro, presentando las clases diamétricas 10-15 y 15-20 cm el mayor número de árboles promedio (116 individuos ha<sup>-1</sup>). Los árboles residuales representativos en todos los NSI se concentran en categorías diamétricas entre 10-30 cm, con densidades de 375- 458 ha<sup>-1</sup> con rango de variación de 36 a 50 años de edad.

#### 4.3.3 Condiciones de la regeneración natural pino-encino

Sitios con NSI medio y alto contienen las mayores densidades de regeneración natural (1.112 plántulas) en promedio, en contraparte el NSI bajo solo presenta 256 plántulas ha<sup>-1</sup> de *P. douglasiana* (Tabla 2); el rango de altura está entre 15,6 y 31,7 cm. El incendio suscitó la emergencia de encinos y su capacidad de rebrotes, en los resultados se obtiene para el NSI bajo, medio y alto densidades respectivas de: 937, 400 y 200 entre rebrotes y plántulas ha<sup>-1</sup> de *Quercus* spp.

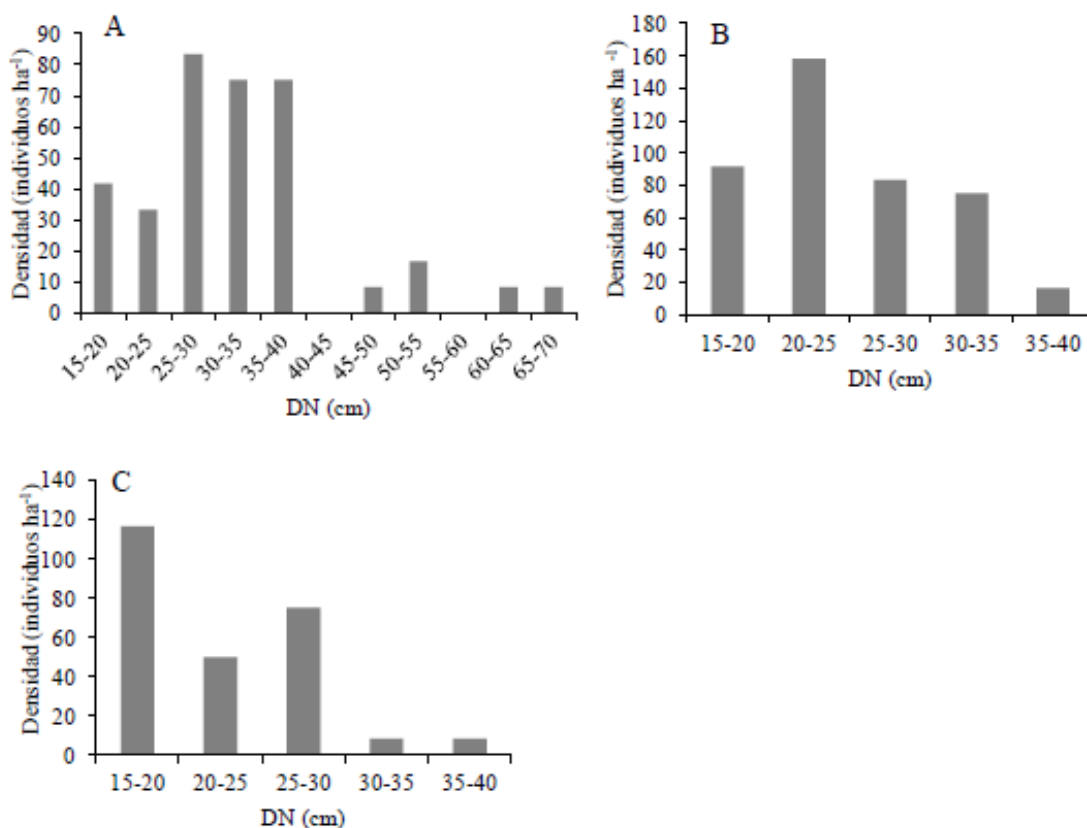
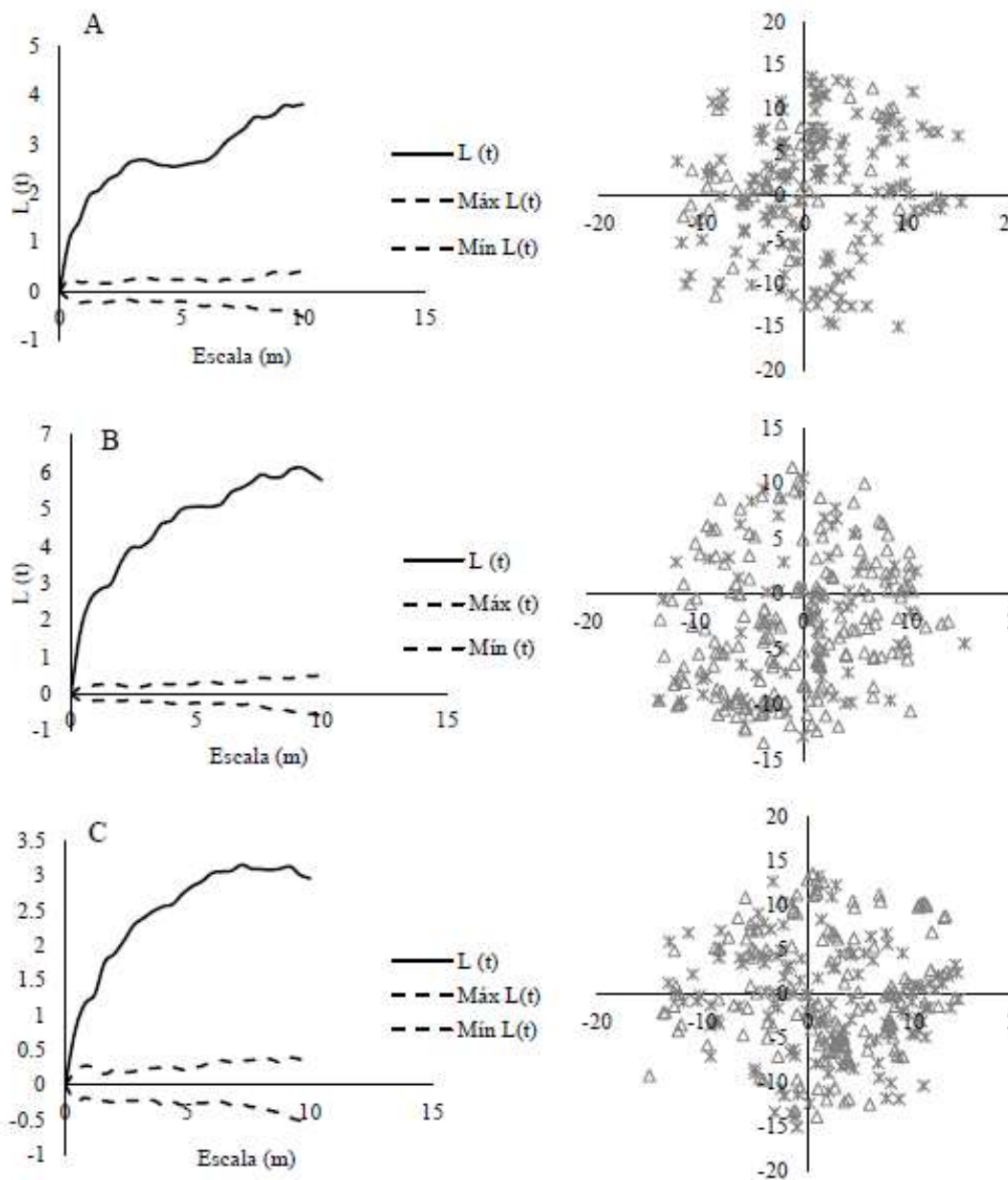


Figura 4.2 Densidad de árboles por categoría diamétrica de *Pinus douglasiana* después del incendio. Nivel de severidad del incendio A) = bajo, B) = medio, C) = alto.

**Figure 4.2.** Tree density by diameter category of *Pinus douglasiana* after the fire. Fire severity level A) = low, B) = médium, C) = high.

Los resultados de la función de Ripley muestran que en todos los NSI existe una asociación pino y encino, con patrón de distribución agregado con distancias entre 0 y 10 m, donde el índice de distribución espacial  $L(t)$  se manifestó constante fuera de los límites de confianza (Figura 4.3). En el NSI bajo (Figura 4A) alcanza una tendencia de agrupamiento con mayor densidad del género *Quercus* spp.



**Figura 4.3** Índice de distribución espacial  $L(t)$  de la regeneración natural. Nivel de severidad de incendio A) = bajo B) = medio C) = alto. Las líneas sólidas representan los valores de  $L(t)$ , y las líneas discontinuas el intervalo de confianza al 99%. Del lado derecho se muestra la distribución espacial de la regeneración \**Quercu* spp.  $\Delta$  *Pinus douglasiana*.

**Figure 4.3** Spatial distribution index  $L(t)$  of natural regeneration. Fire severity level A) = low B) = medium C) = high. The solid lines represent  $L(t)$  values and the dashed lines the 99%-confidence interval. On the right side is shown the spatial distribution of regeneration \**Quercus* spp.  $\Delta$  *Pinus douglasiana*.

El NSI medio (Figura. 4B) los valores estimados de  $L(t)$  son positivos y se encuentran de igual manera por encima del límite superior de confianza; respectivamente esta área ostentó mayor densidad y distribución de pino ( $1.237$  árboles  $ha^{-1}$ ). Finalmente, el NSI alto (Figura 4C) mostró el mismo comportamiento, pero con la menor densidad del género *Quercus* sp.

## 4.4 DISCUSIÓN

### 4.4.1 Biomasa superficial

Teniendo en cuenta a Aguilar-Arias *et al.* (2012) en los bosques de pino-encino la biomasa de hojarasca es en promedio de  $1,70$  a  $20,10$   $t\ ha^{-1}$ . En la presente investigación la biomasa de este compartimento mostró un promedio de  $11,04$   $t\ ha^{-1}$  independiente del NSI. Ruiz-Corzo *et al.* (2022) obtuvieron un promedio similar en la carga de hojarasca de  $12,67$   $t\ ha^{-1}$  en un bosque de *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl. después de un incendio en el mismo año. Por otro lado, en un bosque de pino se genera  $2,11$   $t\ ha^{-1}$  de biomasa acumulada en hojarasca y  $1,22$   $t\ ha^{-1}$  en un bosque de *Quercus* (Hernández-García *et al.* 2016). En la opinión de López-López *et al.* (2013) la diferencia del almacenamiento de hojarasca está asociado con la densidad de árboles en el sitio. De acuerdo con el anterior autor, en este estudio la densidad de árboles no influyó significativamente en estos almacenamientos, pero se encontró un leve incremento de  $1.2$   $t\ ha^{-1}$  de biomasa en el NSI medio al pasar de un nivel bajo y de pasar de un nivel medio a un nivel alto disminuyó a  $3.27$   $t\ ha^{-1}$ . Puede agregarse que el AC contribuyó a la independencia en el almacenamiento de este componente entre los NSI al haber un promedio de  $862$   $m^2$  entre el nivel medio y alto, el NSI bajo obtuvo menor AC ( $467$   $m^2$ ) pero presentó mayor densidad de árboles a lo que compensó el almacenamiento de hojarasca sobre el piso forestal a través de hojas, flores y frutos. Con todo lo anterior también se puede decir que la cantidad considerable de biomasa acumulada se debió a que la recolección de muestras se realizó en invierno, estación donde el desfronde se presenta en mayor cantidad.

Ahora bien, los sitios con NSI alto acumularon  $1.127,8$   $t\ ha^{-1}$  de humus, que corresponde entre  $54.15\%$  y  $62.49\%$  más en relación a los otros niveles. Chávez-Pascual *et al.* (2017) reportaron valores por debajo de los encontrados en este estudio ( $17,73$   $t\ ha^{-1}$ ) en áreas bajo tratamientos silvícolas en rodales de *P. oaxacana* Mirov en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Gómez-Díaz *et al.* (2012) encontraron diferencias estadísticas significativas de  $7,0$  a  $21,7$   $t\ ha^{-1}$  de la capa de humus en tres condiciones topográficas de un bosque tropical. Los resultados encontrados en este estudio



pueden ser atribuidos a que las muestras se colectaron durante días de lluvia y de acuerdo con Lucena *et al.* (2019), en este periodo colectaron 4.180 kg ha<sup>-1</sup> de mantillo durante la temporada de secas y 3.890 kg ha<sup>-1</sup> en el periodo de lluvia. De manera general la materia orgánica carbonizada después de un incendio puede favorecer en un 30-40% al carbono secuestrado en el suelo a largo plazo (Rosero y Osorio 2013).

Para los contenidos de necromasa en los diferentes NSI se encontró un rango de variación entre 61,57 y 287,91 t ha<sup>-1</sup>, con mayor almacenamiento en el NSI alto. Resultados superiores a los estimados por Galicia *et al.* (2015), una variación de 63 a 177 t ha<sup>-1</sup> de biomasa para este compartimento en un bosque templado de la Sierra Norte, con aprovechamiento histórico. El significativo monto de biomasa para el NSI alto puede deberse por el alto porcentaje de material leñoso caído durante el incendio. La GE del suelo en las tres áreas de severidad no mostraron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ). El cual mostró un promedio de 783,81 kg m<sup>-3</sup>.

#### 4.4.2 Estructura residual de los árboles adultos

El DN y AT se diferenciaron ( $P < 0,01$ ) entre los niveles de severidad presentándose árboles con mayor dimensión (33,9 cm y 19,3 m) en el NSI bajo con la mayor densidad de 408 árboles ha<sup>-1</sup> y biomasa arbórea de 134.3 kg/árbol. Sin embargo, Razo-Zárate *et al.* (2013) reportaron clases diamétricas de 35, 45 y 60 cm con un número de individuos/ha de 4, 3 y 2 árboles en especies de *Abies religiosa* después de un incendio.

De acuerdo con Sáenz-Ceja y Pérez-Salicrup (2018), la composición y estructura arbórea depende de la magnitud de un incendio. Desde la posición de Martínez-Garza *et al.* (2022), los incendios poco severos no perjudican el suelo ni el arbolado adulto. De acuerdo a lo anterior, en este estudio se ratifica que la condición del área de NSI bajo mantuvo su estructura irregular preincendio, con individuos de diferentes clases, no mostró una afectación destructiva del arbolado adulto por ser un incendio de tipo superficial, sin embargo esta área presentó menor densidad de regeneración de pino y esto puede ser a que los conos aéreos no fueron alcanzados por una temperatura deseable que les permitiera abrir y dispersar sus semillas, al mismo tiempo la rápida regeneración de herbáceas y acumulación de hojarasca por ser el área con mayor arbolado residual, no permite que las pocas semillas dispersadas paulatinamente por los árboles lleguen al suelo mineral.

Respectivamente el área del NSI medio presentó una estructura en forma de campana, con diámetros entre 10 y 40 cm. lo que indica que el fuego solo consumió una parte del arbolado, con la mayoría de individuos residuales que sobrevivieron al incendio. Esto puede justificarse debido a que la especie *P. douglasiana* Martínez tiene una adaptabilidad al fuego, característico de pinos serótinos, lo que solo promovió la apertura de conos beneficiando a la regeneración. Quintero-Gradilla (2018) menciona que los bosques de *P. douglasiana* Martínez están adaptados a los incendios superficiales y de baja severidad que les permite resistir y recuperarse del daño ocasionado.

Según Quintero-Gradilla *et al.* (2019) y Martínez-Garza (2022) indican que los incendios de severidad alta causan una destrucción del 70 al 100% de árboles adultos. Lo que coincide con lo reportado en este estudio en el NSI alto que presentó mortalidad de la mayoría del arbolado adulto, sumado a esto la aminoración paulatina debido a la llegada de descortezadores que debilitan los árboles afectados; estas acciones aumentan el combustible sobre el piso forestal y convierten el rodal en una estructura irregular presentando más individuos en las clases diamétricas de menor tamaño, teniendo así solo algunos individuos en las clases de mayor tamaño, pero en menor densidad (281 árboles ha<sup>-1</sup>).

#### 4.4.3 Distribución espacial y condiciones de la regeneración natural

La densidad promedio de la regeneración presente para el NSI medio y alto fue de 1.112 individuos ha<sup>-1</sup>. En este estudio se expone que la severidad de incendio influye sobre la densidad de la regeneración, se encontró que el incendio al haber pasado de un nivel bajo a un nivel de incendio alto la regeneración se promueve en un promedio de 434.37%. Esto puede ser atribuido por una parte la severidad, las diferentes densidades de árboles residuales adultos y como progenitores que favoreció la producción de semillas y su geminación en el NSI medio y alto. Esta evaluación mostró que las áreas con NSI medio tienen un alto potencial de regeneración natural (Figura 4 B). En oposición, en áreas que experimentan incendios no tan habituales, de moderada a alta severidad el establecimiento de la regeneración ocurre de manera simultánea. El establecimiento de plántulas en el NSI bajo es continuo y en menor densidad (Figura 4 A). Esto se debe a la escasa semilla que logra llegar al suelo mineral por la rápida reincorporación de la hojarasca al suelo, lo que limita la llegada de las semillas al suelo mineral, logrando solo una

mínima parte para germinar. La densidad y cobertura arbórea también se contempla como un inductor importante de la latencia en las semillas (Deb y Sundriyal 2013).

La distribución espacial de la regeneración natural para los tres NSI es agrupada en una asociación entre pino y encino. Desde el punto de vista de Elías *et al.* (2011), la distribución espacial por especie se atribuye en gran parte por los regímenes de perturbaciones y las respuestas de regeneración de cada especie. Maciel-Nájera *et al.* (2020) estudiaron patrones de distribución en áreas con regeneración de pino-encino en la Sierra Madre Occidental, donde sus resultados arrojaron patrones espaciales diferentes del establecimiento de la regeneración en rodales irregulares de pino-encino. En la opinión de Kubota 2006 y Plateros-Gastélum *et al.* (2018), los índices de distribución espacial agregados son generalmente los más comunes, resultado de la apertura de claros en el dosel lo que acelera el rebrote de especies. Norden (2014) alude que los factores edáficos tienen mayor influencia importante que la luz sobre la distribución espacial como; la disponibilidad de fósforo, nitrógeno y pH que influyen en los procesos fisiológicos de la planta para su desarrollo y sobrevivencia. Hernández *et al.* (2018), señalan que factores como la temperatura, humedad relativa, propiedades del suelo, exposición y pendiente pueden explicar el tipo de agregación entre especies.

Al mismo tiempo, en el presente estudio, se da a conocer que el incendio suscitó la emergencia de encinos en los tres NSI. En los resultados para los tres NSI se reporta una densidad de 200 a 937 rebrotes y plántulas  $\text{ha}^{-1}$  coexistiendo el 57.3 al 78.7% más en el NSI bajo respecto a los otros niveles de severidad. Leverkus *et al.* (2014) reportan valores de 447 rebrotes  $\text{ha}^{-1}$  de *Quercus* spp. en una parcela de 18 ha post-incendio. Se ha documentado que los incendios en los bosques mixtos promueven la presencia y dominancia de especies de *Quercus* spp. esto justifica la capacidad de rebrotamiento de la mayor parte del género *Quercus*, misma que es estimulada frente a los impactos del incremento de la temperatura del suelo. Se observó también que en su mayoría la presencia de regeneración fue por rebrotes y poca reincorporación de plántulas por semilla y esto puede ser debido a que la incineración de la capa de hojarasca induce a la vulnerabilidad de las pocas bellotas dispersadas a ser más fácilmente visibles por la fauna que se alimenta de ellos (pájaros y ardillas).

Otro factor relacionado a la limitada regeneración de encinos por bellotas es porque estas pierden su viabilidad al perder su humedad, lo cual significa que el fuego provoca condiciones más cálidas y secas del área y por lo tanto aumenta la mortalidad de bellotas debido a la desecación provocada por el aumento de la temperatura. Sin embargo, Zavala-Chávez (2000), opina que la

regeneración por rebrotes no logra una continuidad posterior ya que después del incendio se presenta condiciones más secas y con el tiempo se restablecen las condiciones más húmedas; al madurar el bosque de pino y cerrarse el dosel por otras especies el encino presenta problemas en la incorporación, disminuyendo la densidad que se tiene inicialmente.

#### 4.5 CONCLUSIONES

El incendio ocurrido dos años atrás (año 2020) en el rodal de *Pinus douglasiana* de la comunidad de Agua Blanca, Oaxaca, México modificó los montos de biomasa en los compartimentos de necromasa, humus y en la biomasa total arbórea; de igual manera, la estructura diamétrica residual se presenta irregular en sitios con nivel de severidad de incendio (NSI) alto.

La densidad de la regeneración se vio influenciada por el grado de severidad del incendio, en sitios con NSI medio se promueve una exuberante regeneración, lo que evidencia la adaptación al fuego de severidad medio por parte de la especie estudiada. En sitios con NSI baja existe una abundante densidad de rebrotes de encinos, por lo cual es recomendable monitorear tanto su frecuencia como la supervivencia y adecuada densidad con el transcurso de los años.

La información generada en este estudio contribuirá a seguir desarrollando investigaciones futuras enfocadas a seguir entendiendo el efecto post-incendio sobre el ecosistema. Evaluar la regeneración permitirá tomar decisiones sobre las intervenciones de restauración, buscando recuperar los procesos ecológicos del ecosistema, regenerar el paisaje degradado.

#### 4.6 AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento otorgado al primer autor para estudiar en el programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Se agradece al Tecnológico Nacional de México, TecNM por el financiamiento otorgado para llevar a cabo el desarrollo del proyecto de investigación titulado “Regeneración natural post-incendio de bosques de pino-encino, caso Nejapa de Madero, Oaxaca. Clave del proyecto 15324.22-P. En el marco de la Convocatoria para Proyectos de Desarrollo Tecnológico e Innovación para Estudiantes 2022.

#### 4.7 CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Rosario Aquino-López: análisis de datos y elaboración del manuscrito; Ernesto Castañeda-Hidalgo: coordinación de las revisiones; Gerardo Rodríguez-Ortiz: análisis estadístico y revisión del manuscrito; Gisela M. Santiago Martínez: revisión del manuscrito; Ángel-Bustamante González; revisión del manuscrito; Salvador Lozano-Trejo: revisión del manuscrito.

#### 4.8 REFERENCIAS

- Aguilar-Arias H, E Ortiz-Malavassi, B Vélchez-Alvarado, RL Chazdon. 2012. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 22(9): 22–31. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.360>.
- Ávila-Flores IJ, JA Prieto-Ruíz, JC Hernández-Díaz, CA Whehenkel, J Corral-Rivas. 2014. Preconditioning *Pinus engelmannii* Carr. Seedlings by irrigation deficit in nursery. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 20(3): 237–245. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.004>.
- Besag J, JP Diggle, 1977. Simple Monte Carlo Tests for spatial pattern. *Journal of the Royal Statistical Society*. 26(3): 327–33. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346974>.
- Castillo C, P Pedernera, E Peña. 2003. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Medio Ambiente y Desarrollo de CIPMA* 19 (3y4): 44-53. Consultado el 25 de febrero. 2023. Disponible en: <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Bosques-Ecosistemas/25.pdf>.
- Chávez-Pascual EY, G Rodríguez-Ortiz, JR Enríquez-Del Valle, VA Velasco-Velasco, M Gómez-Cárdenas. 2017. Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Revista Madera Bosques* 23(3): 147–161. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2022. Reporte semanal nacional de incendios forestales. 22 p. Consultado el 20 de enero. 2023. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/789692/Cierre\\_de\\_la\\_Temporada\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/789692/Cierre_de_la_Temporada_2022.pdf).

- Deb P, RC Sundriyal. 2013. Seed germination in lowland tropical rainforest trees: interspecies, canopy and fruit type variations. *Research Journal of Forestry* 7(1): 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3923/rjf.2013.1.15>.
- Elías RB, E Días, F Pereira. 2007. Disturbance, regeneration and the spatial pattern of tree species in Azorean Mountain forests. *Community Ecology* 12: 23–30. DOI: <http://www.jstor.org/stable/24113710>.
- Fisher M. 2000. Software available for sophisticated spatial statistics. University of the South Pacific. Suva, Fiji.
- Flores-Garnica JG. 2021. Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. (Especial-1): 91–117. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>.
- Flores-Rodríguez AG, JG Flores Garnica, DR González-Eguiarte, A Gallegos-Rodríguez, P Zarazúa-Villaseñor, S Mena-Munguía, ME Lomelí-Zavala, E Ruíz-Guzmán. 2021. Regeneración natural de pino y encino bajo diferentes niveles de perturbación por incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65): 3-25. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.776>.
- Galicia L, V Saynes, J Campo. 2015. Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences* 93(3): 433–457. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.66>.
- Gómez-Díaz JD, AI Monterroso-Rivas, JA Tinoco-Rueda, JD Etchevers-Barra. 2012. Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana* 30(2): 177–187.
- Hernández FJ, MCB Navarro, MR Peña, LA Nájera. 2018. Patrón de distribución espacial de las especies arbóreas de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 169–186. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.161>.
- Hernández-García J, G Rodríguez-Ortiz, JR Enríquez del Valle, GV Campos-Ángeles, A Hernández- Hernández. 2016. Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(36): 51–63. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.59>.
- Juárez-Martínez A, DA Rodríguez-Trejo. 2004. Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *ochoterena*. *Revista Chapingo Serie Ciencias*

- Forestales y del Ambiente* 9(2): 125–130. Consultado el 14 de enero. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/629/62913142003.pdf>.
- Kubota Y. 2006. Spatial pattern and regeneration dynamics in a temperate Abies-Tsuga forest in southwestern Japan. *Journal of Forest Research* 11(3): 191–201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10310-006-0205-z>.
- Leverkus AB, J Castro, BJM Rey. 2014. Regeneración post-incendio de la encina en pinares de repoblación mediterráneos. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente* 23(2): 48-54. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.07>.
- López-López JD, J Méndez-González, J.A Nájera-Luna, J Cerano-Paredes, JD Flores-Flores, JA Nájera-Castro. 2013. Producción de hojarasca en *Pinus halapensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. Y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia*, 47(5): 497-510. Consultado el 20 de Marzo. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952013000500007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000500007).
- Lucena MS, AR Alves, IA Bakke. 2019. Aporte de mantillo y nutrientes en ecosistema semiárido de Brasil (Caatinga) bajo sistemas silvícolas. *Madera y Bosques* 25(1): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511597>.
- Maciel-Nájera JF, J Hernández-Velasco, MS González-Elizondo, JC Hernández-Díaz, CA López-Sánchez, P Antúnez, CE Bailón-Soto, C Wehenkel. 2020. Unexpected spatial patterns of natural regeneration in typical uneven-aged mixed pine-oak forests in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Global Ecology and Conservation* 23 (1): 2-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01074>.
- Martínez-Garza C, K León-Carvajal, I Juan-Baeza, M Hernández-Hernández. 2022. La regeneración del bosque después de un incendio. *Revista Inventio* 18(44):1-11. DOI: <https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.44/9>.
- Muñoz J. 2017. Natural regeneration: A review of the ecological aspects in the tropical mountain forest of southern Ecuador. *Bosques Latitud Cero* 7(2): 130–143. Consultado el 25 de febrero 2023. Disponible en: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques>.
- Norden N. 2014. Del porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. *Colombia Forestal* 17(2): 247-261. DOI: Consultado el

25 de febrero 2023. Disponible en:  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a08>.

Plateros-Gastélum PA, VJ Reyes-Hernández, A Velázquez-Martínez, P Hernández-De La Rosa, GV Campos-Ángeles. 2018. Disponibilidad de luz bajo dosel en rodales de *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 24(3):1-21. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431711>.

Promis Á, S Olivares, S Acuña, G Cruz. 2019. Respuesta temprana de la regeneración de plantas leñosas después del incendio forestal denominado “Las Máquinas” en la Región del Maule, Chile. *Gayana Botánica*, 76(2): 257–262. Consultado el 4 de febrero. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-66432019000200257&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-66432019000200257&script=sci_arttext).

Quintero-Gradilla SD, EJ Jardel-Peláez, R Cuevas-Guzmán, F García-Oliva, A Martínez- Yrizar. 2019. Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* México. *Madera y Bosques*, 25((3): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>.

Razo-Zárate R, AJ Gordillo-Martínez, R Rodríguez-Laguna, CC Maycotte-Morales, OA Acevedo-Sandoval. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional ‘El Chico’, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 19(2): 73-86. Consultado el 4 de febrero. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140504712013000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140504712013000200005)

-

Ripley BD. 1977. Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 39(2): 172-212.

Rodríguez-Ortiz G, JÁ García-Aguilar, JC Leyva-López, C Ruiz-Díaz, JR Enríquez-Del Valle, W Santiago-García. 2019. Structural biomass and by compartments of *Pinus Patula* regeneration in clearcutting sites. *Madera y Bosques* 25(1): 73-86. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>.

Romahn de la vega CF, MH Ramírez. 2010. Dendrometría. Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF, 312 p. Consultado el 24 de febrero. 2023. Disponible en: <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>.

Rosales-Rodríguez JA, EA Esquivel-Segura, MA Acevedo-Tapia, M González-Ortega, E Cartes-Rodríguez. 2018. Situación pre y post-incendio, de un ecosistema del tipo forestal Roble-



- Hualo, Región del Maule, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 16(38): 55–68. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3997>.
- Rosero Cuesta J, G Osorio. 2013. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. *Cuaderno Activa*, 5: 59–67. Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130/115>.
- Rubio-Camacho EA, MA González-Tagle, W Himmelsbach, DY Ávila-Flores, E Alanís-Rodríguez, J Jiménez-Pérez. 2017. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88(1): 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>.
- Ruiz-Corzo R, DR Aryal, A Venegas-Sandoval, DO Jerez-Ramírez, KS Fernández-Zúñiga, S. del C López-Cruz, JC López-Hernández, B Peña-Álvarez, CA Velázquez-Sanabria. 2022. Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3253>.
- Sáenz-Ceja JE, DR Pérez-Salicrup. 2019. The role of in the regeneration of conifer forests. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 25(1): 123-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.054>.
- Servicios Técnicos Forestales [STF]. 2020. Programa de manejo nivel avanzado. *Agua Blanca, Nejapa de Madero, Oaxaca*.
- Stavi, I. 2019. Wildfires in grasslands and shrublands: A review of impacts on vegetation, soil, hydrology, and geomorphology. *Water (Switzerland)* 11(5): 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11051042>.
- Vargas-Larreta B, JJ Corral-Rivas, OA Aguirre-Calderón, JO López-Martínez, HM de los Santos-Posadas, FJ Zamudio-Sánchez, EJ Treviño-Garza, M Martínez-Salvador, CG Aguirre-Calderon. 2017. SiBiFor; Sistema biométrico forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 23(3): 437-455. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>.
- Villegas-Jiménez DE, G Rodríguez-Ortiz, VA Velasco-Velasco, J Ruiz-Luna, JC Carrillo-Rodríguez, SE Ramírez-Sánchez. 2013. Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el Sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(4): 421–427. Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en:

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802013000400008](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000400008).

Zavala-Chávez F. 2000. El fuego y la presencia de encinos. *Ciencia Ergo Sum* 7(3): 268–276. DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10401909>.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES GENERALES**

De acuerdo a la relación, altura/longitud de raíz, índice de lignificación e índice de Dickson en los tres NSI se presentó una buena calidad de planta. Para la biomasa aérea, biomasa subterránea e índice de esbeltez, las plantas mostraron baja calidad. Sin embargo los resultados no son lo suficientemente para asegurar que índice favorece más la calidad de planta de una manera integral después de un incendio, pero resultados permiten conocer la situación actual de la planta, y con base en ello, tomar decisiones de restauración posterior al incendio para contribuir a la sobrevivencia de la regeneración, su desarrollo y crecimiento con mayores índices de calidad, evitando en lo posible la reforestación, que generalmente tienen una baja tasa de sobrevivencia y altos costos.

El incendio ocurrido dos años atrás (año 2020) en el rodal de *Pinus douglasiana*, modificó los montos de biomasa en los compartimentos de necromasa, humus y en la biomasa total arbórea en los tres NSI; de igual manera, la estructura diamétrica residual se

irregular en sitios con NSI alto. La densidad de la regeneración se presentó en mayor proporción en el área con NSI medio 1, 237 plantas ha<sup>-1</sup>. lo que evidencia la adaptación al fuego de severidad medio por la especie *P. douglasiana* para aperturar sus conos y dispersar sus semillas. En este mismo sentido en el NSI bajo presentó mayor rebrote de encinos, la densidad se vio favorecida por las condiciones ambientales y cambios favorables post-incendio. Por lo cual es recomendable monitorear la permanencia como la supervivencia con el trascurso de los años. Respecto a la distribución espacial de la regeneración, en los tres niveles fue agrupado en una asociación significativa entre pino y encino sin dependencia a la severidad.

La densidad de la regeneración se vió influenciada por el grado de severidad del incendio, en sitios con NSI medio se promueve una exuberante regeneración, lo que evidencia la adaptación al fuego de severidad medio por parte de la especie estudiada. En sitios con NSI baja existe una abundante densidad de rebrotes de encinos.

## **CAPÍTULO VI**

### **RECOMENDACIONES**

El manejo de la regeneración natural pos-incendio son actividades silviculturales que no deberían ser consideradas como opcionales, esta condición las limita en su establecimiento; este tipo de estudios deberían profundizarse a partir de analizar su nivel de impacto positivo sobre el bosque y su contribución en la sostenibilidad.

Debe considerarse monitorear el comportamiento de la regeneración natural, y ejecutar actividades silviculturales apropiados para el crecimiento y desarrollo de la regeneración y otras asociaciones vegetales forestales, para proporcionar mejores expectativas de sobrevivencia. Se recomienda hacer trabajos que orienten a los comuneros a la adopción de técnicas para restaurar el área y la estructura del rodal. Por lo que la restauración de esta zona debe ser prioritario para recuperar los procesos ecológicos. Es indispensable ejecutar actividades silviculturales para incrementar el desarrollo radicular y la robustez de las plantas. Es importante monitorear la regeneración en sus cambios

morfológicos y detectar los más relacionados con la supervivencia en sus diferentes etapas de desarrollo después del incendio.

## CAPÍTULO VII

### BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Aguilar-Arias, H., Ortiz-Malavassi, E., Vílchez-Alvarado, B., Chazdon, R.L. 2012. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 22(9), 22–31. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.360>.
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T., Ordáz-Chaparro, V.M. 2016. Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia*. 50(1), 107–118.
- Anchaluisa, S., Suárez, E. 2013. Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicos de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; Myrtaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *Avances*. 5(2), 14-23.
- Ávila-Flores, I.J, Prieto-Ruíz, J.A, Hernández-Díaz, J.C, Whehenkel C.A, Javier Corral-Rivas, J. 2014. Preconditioning *Pinus engelmannii* Carr. Seedlings by irrigation

- Besag, J, Diggle, J.P. 1977. Simple Monte Carlo Tests for Spatial Pattern. *Journal of the Royal Statistical Society*. 26(3), 327–33. <https://doi.org/10.2307/2346974>.
- Buamscha, M.G, Contardi, L.T, Kasten, D.R, Enricci, J.A, Escobar, R., Gonda, H.E., Jacobos, D.F, Landis, T.D., Luna, T., Mexal, J.G., Wilkinson, K.M. 2012. Producción de plantas en viveros forestales. 1a ed. Argentina. CFI.
- Buendía-Velázquez, M.V., López-López, M.Á., Cetina-Alcalá, V.M., Diakite, L. 2017. Substrates and nutrient addition rates affect morphology and physiology of *Pinus leiophylla* seedlings in the nursery stage. *Biogeosciences and Forestry*. 10(1), 115–120. <https://doi.org/10.3832/ifer1982-009>.
- Carhuamaca, K. 2016 Diagnóstico de calidad de plantas clonales de la especie forestal *Eucalyptus urograndis* producidas en un prototipo de producción clonal (PPC)–Palca–Tarma–Junín. In: Quispe, A. (coord.). Junín, Perú, Arborizaciones E.I.R.L. 93 p. Informe final. Fondo Proyecto “Desarrollo de un prototipo productivo clonal – PPC para incrementar la productividad y calidad de las plantaciones de eucalipto y posterior comercialización a viveros forestales del Perú” (PIPEI-8-P-332-418-14).
- Castellanos-Acuña, D., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R.A., Sánchez-Vargas, N.M., Lobbit, P., Montero-Castro, J.C. 2013. Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo en vivero. *Ciencias Forestales y Del Ambiente*. 19(3), 399–411. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>.
- Castillo, C., Pedernera, P. E., Peña. 2003. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Medio Ambiente y Desarrollo de CIPMA* 19 (3y4), 44-53.



Consultado el 25 de febrero. 2023. Disponible en:

<https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Bosques-Ecosistemas/25.pdf>.

Cháves, L.J.C., Velázquez, C.E., Venegas, S.A. 2022. Intervenciones comunitarias en el contexto socioambiental: buenas practicas en la conservación desde el sur de México. *Revista Agricultura Tropical*. 2(1), 59-76.10.5154/r.rchsat.2022.03.05

Chávez-Pascual, E.Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J.R., Velasco-Velasco, V.A., Gómez-Cárdenas, M. 2017. Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Revista Madera Bosques*. 23(3),147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>.

Close, D.C., Paterson, S., Corkrey, R., McArthur, C. 2010. Influences of seedling size, container type and mammal browsing on the establishment of *Eucalyptus globulus* in plantation forestry. *New Forests*. 39(1), 105–115. <https://doi.org/10.1007/s11056-009-9158-3>.

Cobas-López, M., Sotolongo-Sospedra, R., Almora-Ramos. 2020. Comportamiento de los parámetros morfológicos de calidad de la planta de *Lysiloma sabicu* Benth. en vivero sobre sustratos orgánicos. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 8(3), 550-561.

Comisión Nacional Forestal (COESFO) (2023). Superficie estatal forestal. Consultado el 25 de febrero. 2023. Disponible en: <https://www.oaxaca.gob.mx/coesfo/superficie-forestal-estatal/>.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2021). Cierre estadístico 2021. Coordinación General de Conservación y Restauración Gerencia de Manejo del Fuego. Consultado el 25 de febrero. 2023. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/691111/Cierre\\_de\\_la\\_Temporada\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/691111/Cierre_de_la_Temporada_2021.pdf)

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2022. Estado que guarda el sector forestal en México. Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro\\_completo\\_EGSF\\_M\\_DIGITAL1NOV\\_1\\_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro_completo_EGSF_M_DIGITAL1NOV_1_compressed.pdf)

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2022. Reporte semanal nacional de incendios forestales. 22 p. Consultado el 20 de enero. 2023. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/789692/Cierre\\_de\\_la\\_Temporada\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/789692/Cierre_de_la_Temporada_2022.pdf)

Córdoba-Rodríguez, D., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Muñoz-Orozco, A. 2010. Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia*. 45(4), 493–506.

Cortés-Cabrera, H.E, Jurado, E., Pompa-García, M., Aguirre-Calderón, O.A., Pando-Moreno M., González-Tagle, M.A. 2018. Efecto del fuego y la elevación en la regeneración de *Pinus hartwegii* Lindl. en el noreste de México. *Chapingo Journal Forest and Environmental Science Series*. 24(2), 197-205. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.09.057>.

- Deb, P., Sundriyal, R.C. 2013. Seed germination in lowland tropical rainforest trees: interspecies, canopy and fruit type variations. *Research Journal of Forestry*. 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.3923/rjf.2013.1.15>.
- deficit in nursery. *Ciencias Forestales y Del Ambiente*. 20(3), 237–245. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.004>.
- Depietri, Y., Orenstein, D. 2020. Managing fire risk at the wildland-urban interface requires reconciliation of tradeoffs between regulating and cultural ecosystem services. *Ecosystem Services*. 44.
- Eduardo Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O., Treviño-Garza, E.J. 2011. Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del parque ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17 (1), 31-39. 10.5154/r.rchscfa.2010.05.032
- Elías, R.B., Días, E., Pereira, 2007. Disturbance, regeneration and the spatial pattern of tree species in Azorean Mountain forests. *Community Ecology*. 12, 23–30. <http://www.jstor.org/stable/24113710>.
- Escobar-Alonso, S., Rodríguez-Trejo, D.A. 2019. Estado del arte en la investigación sobre calidad de planta del género *Pinus* en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 10(55), <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.558>.
- Falcón-Oconor, E., Cobas-López, M., Bonilla-Vichot, M., Rodríguez-Leyva, O., Romero-Castillo, C.V., Rodríguez-Leyva, E. 2021. Calidad de plántulas de *Swietenia*

*mahagoni* L. Jacq. producida en sustratos inoculados con hongo micorrízico arbuscular. *Ciencias Ambientales*. 55(2), 311–225. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.15>.

Fernández-Méndez, F., Velasco-Salcedo, V., Guerrero-Contecha, J., Galvis, M., Viana-Neri, A. 2016. Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca Tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*. 19(2), 19-36.

Fisher, M. 2000. Software available for sophisticated spatial statistics. University of the South Pacific. Suva, Fiji.

Flores, R.A.G., Flores, G.J.G., González, E.D.R., Gallegos, R.A., Villaseñor, Z.P., Mena, M.M.S., Lomelí, Z.M.E., Ruíz, G.E. 2021. Regeneración natural de pino y encino bajo diferentes niveles de perturbación por incendios forestales. *Revista de Mexicana de Ciencias Forestales*. 12(65), 1-25.

Flores-Garnica, J.G. 2021. Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. (Especial-1), 91–117. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>.

Flores-Rodríguez, A.G., Flores-Garnica, J.G., González-Eguiarte, D.R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., Mena-Munguía, S., Lomelí-Zavala, M.E., Ruíz-Guzmán, E. 2021. Pine and oak natural regeneration under different levels of forest fire disturbance. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.776>.

- Fonseca, W. 2017. Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*. 51(2), 91. <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>.
- Galicia, L., Saynes, V., Campo, J. 2015. Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*. 93(3), 433–457. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>.
- Gárate, M. Blanco, J.A. 2013. Importance of root biomass characterization when simulating forest ecosystems. *Ecosistemas*. 22(3), 66–73. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.10>.
- García, R. A., Pauchard, A., Peña, E. 2007. Invasión de *Teline monspessulana* (L.) K. Koch después de un incendio forestal: Banco de semillas, regeneración y crecimiento. *Gayana Botánica*. 64, 200-209.
- García-Barrios, L., González-Espinosa, M. 2017. Investigación ecológica participativa como apoyo de procesos de manejo y restauración forestal, agroforestal y silvopastoril en territorios campesinos. Experiencias recientes y retos en la sierra Madre de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.022>.
- García-Llamas, P., Suárez-Seoane, S., Fernández-Guisuraga, J., Fernández-García, V., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Taboada, A., Marcos, E., Calvo, L. 2019. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 80.

Gil, M.J.E. 2020. Incendios forestales: causas e impactos. El antoniano. 135, 68-113.

<https://orcid.org/0000-0002-3191-9197>

Gómez-Díaz, J.D., Monterroso-Rivas, A.I., Tinoco-Rueda, J.A., Etchevers-Barra, J.D. 2012. Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. Terra Latinoamericana. 30(2), 177–187.

Grossnickle, S.C. 2012. Why seedlings survive: Influence of plant attributes. New Forests. 43(5–6), 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>.

Haire, S.L., McGarigal, K. 2010. Effects of landscape patterns of fire severity on regenerating ponderosa pine forests (*Pinus ponderosa*) in New Mexico and Arizona, USA. Landscape Ecology. 25, 1055–1069.

Harper, A., Doerr, S., Santin, C., Froyd, C., Sinnadurai, P. 2018. Prescribed fire and its impacts on ecosystem services in the UK. Science of The Total Environment. 624.

Hernández, F.J., Navarro, M.C.B., Peña, M.R., Nájera, L.A. 2018. Patrón de distribución espacial de las especies arbóreas de la región de El Salto, Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 9(47): 169–186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.161>.

Hernández-García, J., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez del Valle, J.R., Campos-Angeles, G.V., Hernández- Hernández, A. 2016. Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 7(36), 51–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.59>.

Hernández-Ramos, J., De Los Santos-Posadas, H.M., Valdez-Lazalde, R.J., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., Carrero, O., Responsable., A. 2017. Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*. 51(8), 921–938.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) México en cifras. Consultado el 20 de enero. 2023. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>

Inventario Estatal Forestal y de Suelo (IEFyS). 2014. Inventario estatal forestal y de suelos Oaxaca 2013. México, D.F. Consultado el 20 de enero. 2023. Disponible en: [https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/inventario\\_estatal\\_f\\_c471db15.pdf](https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/inventario_estatal_f_c471db15.pdf).

Jaksic, F. M., Fariña, J. M. 2015. Incendios, sucesión y restauración ecológica en contexto. In *Anales del Instituto de la Patagonia*. Universidad de Magallanes. 43(1), 23-34.

Juárez-Martínez, A., Rodríguez-Trejo, D.A. 2004. Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *ochoteranae*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 9(2), 125–130. Consultado el 14 de enero. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/629/62913142003.pdf>.

Kubota, Y. 2006. Spatial pattern and regeneration dynamics in a temperate *Abies-Tsuga* forest in southwestern Japan. *Journal of Forest Research*. 11(3): 191–201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10310-006-0205-z>.

- Leverkus, A.B., Castro, J. Rey, B.J.M. 2014. Regeneración post-incendio de la encina en pinares de repoblación mediterráneos. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. 23(2), 48-54. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.07>.
- López, M.M.A., Rodríguez, T.D.A, Santiago, C.F., Sereno, C.A., Granados, S.D. 2015. Tolerancia al fuego en *Quercus magnoliifolia*. *Revista Árvore*. 39(3), 523-533. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000300013>
- López-López, J.D., Méndez-González, J., Nájera-Luna, J.A, Cerano-Paredes, J., Flores-Flores, J.D., Nájera-Castro, J.A. 2013. Producción de hojarasca en *Pinus halapensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. Y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia*. 47(5), 497-510. Consultado el 20 de Marzo de 2023. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140531952013000500007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952013000500007).
- Lucena, M.S., Alves, A.R., Bakke, I.A. 2019. Aporte de mantillo y nutrientes en ecosistema semiárido de Brasil (Caatinga) bajo sistemas silvícolas. *Madera y Bosques*. 25(1), 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511597>.
- Luna, C.V. 2019. Evaluación de sustratos y concentraciones de fertilizantes sobre el crecimiento de pino tadea (*Pinus taeda* L.) en vivero. *Agronómica Del Noroeste Argentino*. 39(1): 19–29.
- Maciel-Nájera, J.F., Hernández-Velasco, J., González-Elizondo, M.S., Hernández-Díaz, J.C., López-Sánchez, C.A., Antúnez, P., Bailón-Soto, C.E., Wehenkel, C. 2020. Unexpected spatial patterns of natural regeneration in typical uneven-aged mixed



pine-oak forests in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Global Ecology and Conservation*. 23 (1), 2-15. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01074>.

Martínez-Garza, C., Juan-Baeza, I., León-Carvajal, K., Hernández-Hernández, M. 2022. Inventio. La regeneración del bosque después de un incendio. 18(44), 1-11. 10.30973/inventio/2022.18.44/9

Martínez-Garza, C., León-Carvajal, K., Juan-Baeza, I., Hernández-Hernández, M. 2022. La regeneración del bosque después de un incendio. *Revista Inventio*. 18(44), 1-11. <https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.44/9>.

Mendez-espinoza, C. y Vallejo-Reyna, M.A. Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista mexicana de ciencias forestales*. 10(56), 1-31. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>

Mora, G. 2020. Incendios forestales: causas e impactos. *El antoniano*. 135, 68-113 p.

Muñoz, J. 2017. Natural regeneration: A review of the ecological aspects in the tropical mountain forest of southern Ecuador. *Bosques Latiud Cero*. 7(2), 130–143. Consultado el 25 de febrero 2023. Disponible en: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques>.

Noguera-Talavera, A., Reyes-Sánchez, N. Membreño, J.J., Duarte-Aguilar, C. Mendieta-Araica, B. 2014. Calidad de plántulas de tres especies forrajeras (*Moringa oleífera* Lam., *Leucaena leucocephala* y *Cajanus cajan*) en condiciones de vivero. 14(22), 21-27.

Norden N. 2014. Del porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. *Colombia Forestal*. 17(2), 247-

261. Consultado el 25 de febrero 2023. Disponible en:

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a08>.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2020.

Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados.

Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>

Orozco, G.G.O., Muñoz, F.J., Rueda, S.A., Sigala, R.A., Prieto, R.J.A. García, M.J.J.

2010. Diagnóstico de la calidad de planta en los viveros forestales del estado de

colima. Revista mexicana de ciencias forestales. 1(2), 1-12.

Paucar-Bernaola, R.M., Zamora-Natera, J.F., Vargas-Radillo, J., Cetina-Alcalá, V.M.,

Rodríguez-Macías, R., Salcedo-Pérez, E. 2015. Plant quality of two pine species

at nursery stage in a double-transplanting system. Revista Mexicana de Ciencias

Forestales. 7(33), 74–93.

Plateros-Gastélum, P.A., Reyes-Hernández, V.J., Velázquez-Martínez, A., Hernández-

De La Rosa, P., Campos-Angel, G.V. 2018. Disponibilidad de luz bajo dosel en

rodales de *Abies religiosa*. Madera y Bosques. 24(3),1-21.

<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431711>.

Prieto, R.J.A., García, R.J.L., Mejía, B.J.M., Huchin, A.S., Aguilar, V.J.L. 2009.

Producción de plántula del género *Pinus* en vivero del clima templado frío.

Publicación Especial N° 28. Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP-

SAGARPA. México. 48 pp.

Prieto-Ruíz, J.A., A. Duarte-Santos, J.R., Goche-Télles, M.M., González-Orozco, M.A., Pulgarín-Gámiz. 2018. Supervivencia y crecimiento de dos especies forestales, con base en la morfología inicial al plantarse. *Revista mexicana de ciencias forestales*. 9(47),151-168.

Programa de Protección Civil para incendios forestales (PPC). 2014. Consultado el 4 de febrero. 2023. Disponible en: [http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario\\_El\\_ementoseccion/265/PPC\\_20INCENDIOS\\_202014.PDF](http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario_El_ementoseccion/265/PPC_20INCENDIOS_202014.PDF)

Promis, Á., Olivares, S., Acuña, S., Cruz, G. 2019. Respuesta temprana de la regeneración de plantas leñosas después del incendio forestal denominado “Las Máquinas” en la Región del Maule, Chile. *Gayana Botánica*, 76(2), 257–262. Consultado el 4 de febrero. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071766432019000200257&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071766432019000200257&script=sci_arttext).

Quintero-Gradilla, S.D., Jardel-Peláez, E.J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., Martínez- Yrizar, A. 2019. Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* México. *Madera y Bosques*. 25((3), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>.

Quipse-Santos, A. 2017. Cadena productiva y estrategias para la promoción de plantaciones forestales con fines comerciales y sostenibles.

- Ramos-Huapaya, A.E., Lombardi-Indacochea, I.R. 2020. Calidad de plantas en un vivero de tecnología intermedia en Huánuco: Estudio de caso con *Eucalipto urograndis*. Revista Forestal Del Perú. 35(2), 132–145. <https://doi.org/10.21704/rfp.v35i2.1581>.
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A.J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C.C., Acevedo-Sandoval, O.A. 2013. Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional ‘El Chico’, Hidalgo, México. Madera y Bosques. 19(2), 73-86. Consultado el 4 de febrero. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140504712013000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140504712013000200005).
- Reyes-Reyes, J., Pimienta-de la Torre D de J., Rodríguez-Morales, J.A., Fuentes-Pérez M.A., Palomeque-Figueroa, E. 2018. Calidad de planta de *Gmelina arborea* Roxb. producida con diferentes mezclas de sustratos en vivero. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 9(47), 111-130. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.163>.
- Ripley, B.D. 1977. Modelling spatial patterns. Journal of the Royal Statistical Society Series B. 39(2), 172-212.
- Robinne, F.N., Hallema, D.W., Bladon, K.D., Buttle, J.M. 2019. Wildfire impacts on hydrologic ecosystem services in North American high-latitude forests: A scoping review. Journal of Hydrology. 581.

- Robles-Villanueva, F., Rodríguez-Trejo, D.A., Villanueva-Morales, A. 2017. Calidad de planta y supervivencia en reforestación de *Pinus montezumae* Lamb. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 8(42), 55–76.
- Rodríguez-Ortiz, G., Aragón-Peralta, D., Enríquez-Del Valle, J.R., Hernández-Hernández A., Santiago-García, W., Campos-Angeles, G.V. 2020. Plant quality of selected progenies of *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* from southern México. Revista Madera y Bosques. 45(2), 96–101.
- Rodríguez-Ortiz, G., De los Santos-Posadas, H.M., González-Hernández, A.A., Gómez-Guerrero, A., Fierros-González, A.M. 2012. Above-ground and needle biomass models on a fast-growing pine plantation in Oaxaca. Madera y Bosques. 18(1), 25–41.
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J.Á., Leyva-López, J.C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-Del Valle, J.R., Santiago-García, W. 2019. Structural biomass and by compartments of *Pinus Pátula* regeneration in clearcutting sites. Madera y Bosques. 25(1), 73-86. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>.
- Rodríguez-Ortiz, G., González-Hernández, V.A., Aldrete, A., De Los Santos-Posadas, H., Gómez-Guerrero, A., Fierros-González, A.M. 2011. Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus pátula* en respuesta al aclareo. Revista Fitotecnia Mexicana. 34(3), 205-2012
- Romahn de la vega, C.F., Ramírez, M.H. 2010. Dendrometría. Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF, 312 p. Consultado el 24 de febrero. 2023. Disponible en: <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>.

- Rosales-Rodríguez, J.A., Esquivel-Segura, E.A., Acevedo-Tapia, M.A., González-Ortega, M., Cartes-Rodríguez, E. 2018. Situación pre y post-incendio, de un ecosistema del tipo forestal Roble-Hualo, Región del Maule, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 16(38), 55–68. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3997>.
- Rosero Cuesta, J., Osorio, G. 2013. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. *Cuaderno Activa*, 5, 59–67. Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130/115>.
- Rubio-Camacho, E.A., González-Tagle, M.A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D.Y., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J. 2017. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88(1), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>.
- Rueda-Sánchez, A de Dios J., Solorio. B-, Prieto-Ruiz, J.Á., Trinidad-Sáenz Reyes, J., Orozco-Gutiérrez, G., Castañeda, A.M. 2014. Calidad de planta producida en los viveros forestales de Jalisco quality of plants prodeded in forest nurseries in Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3(14), 69–82.
- Ruiz-Corzo, R., Aryal, D.R., Venegas-Sandoval, A. Jerez-Ramírez, D.O., Fernández-Zúñiga, K.S., López-Cruz, S del C., López-Hernández, J.C., Peña-Álvarez, B., Velázquez-Sanabria, C.A. 2022. Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 9(2), 1-12. <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3253>.

- Sáenz Reyes, M., Trinidad, J., Flores, M., Jesús, H., Miguel Ángel, C., Sánchez, R., Ramos, H. 2014. Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero "Morelia", estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(26), 98–111. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439016008>.
- Sáenz-Ceja, J.E., Pérez-Salicrup, D.R. 2019. The role of in the regeneration of conifer forests. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 25(1), 123-139. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.054>.
- Sáenz-Romero, J.T., Muñoz, F.H.J., Villaseñor, R.F., Prieto, R.J.A., Rueda, S.A. 2010. Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. México. 50 pp.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2018. Bosques templados de México, riqueza forestal y belleza escénica. Consultado el 12 de enero. 2023. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-templados-de-mexico-riqueza-forestal-y-belleza-escenica>.
- Servicios Técnicos Forestales [STF]. 2020. Programa de manejo nivel avanzado. Agua Blanca, Nejapa de Madero, Oaxaca.
- Solano, A.L., Martínez, C.L., Sánchez, G. 2017. Tendencias ecológicas y socioeconómicas de los bosques de pino-encino en Centroamérica: Aportes para mejorar su manejo. *Revista Yu'am*. 2(3), 38-47.

- Stavi, I. 2019. Wildfires in grasslands and shrublands: A review of impacts on vegetation, soil, hydrology, and geomorphology. *Water (Switzerland)*. 11(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w11051042>.
- Úbeda, X., Sarricolea, P. 2016. Wildfires in Chile: a Review. *Global y Planetary Change*. 1-26.
- Ureta-Leones, D.A., García-Quintana, Y., Arteaga-Crespo, Y., Morales-Moreno, A., Lazo Pérez, Y., Jalca, I. 2018. Método de clasificación a partir del diagnóstico de calidad morfológica en vivero para la selección de especies forestales promisorias en programas de restauración. *Revista Amazónica y Ciencia y Tecnología*. 7(3), 142–150.
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J.J., Aguirre-Calderón, O.A., López-Martínez, J.O., de los Santos-Posadas, H.M., Zamudio-Sánchez, F.J., Treviño-Garza, E.J., Martínez-Salvador, M., Aguirre-Calderón, C.G. 2017. SiBiFor; Sistema biométrico forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*. 23(3), 437-455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>.
- Vega, H. 2003. Regeneración del género *Pinus* tras incendios. *Revista Ciencias Forestales*. 15, 59-68.
- Vicente-Arbona, J.C., Carrasco-Hernández, V., Rodríguez-Trejo, D.A., Villanueva-Morales, A. 2019. Seedling quality of *Pinus greggii* produced in sawdust-based growing media. *Madera y Bosques*. 25(2), <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521784>.



- Villalón-Mendoza, H., Ramos-Reyes, J.C., Vega-López, J.A., Marino, B., Muños-Palomino, M.A., Garza-Ocañas, F. 2016. Nursery Oak seedlings quality variables for *Quercus canby* Trel. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 12(1), 46–52.
- Villegas-Jiménez, D.E., Rodríguez-Ortiz, G., Chávez-Servia, J.J., Enríquez-del-Valle, J.R., Cruz-Carrillo, J.J. 2016. Variación del crecimiento en vivero entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Gayana Bot.* 73, 113-123.
- Villegas-Jiménez, D.E., Rodríguez-Ortiz, G., Velasco-Velasco, V.A., Ruiz-Luna, J., Carrillo-Rodríguez, J.C., Ramírez-Sánchez, S.E. 2013. Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el Sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(4), 421–427. Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018773802013000400008](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802013000400008).
- Villegas-Jiménez, D.E., Rodríguez-Ortiz, G., Velasco-Velasco, V.A., Ruiz-Luna, J., Carrillo-Rodríguez, J.C., Ramírez-Sánchez, S.E. 2013. Aboveground biomass allocation of *Pinus greggii* provenances planted in southern México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36(4), 421–427.
- Zavala-Chávez, F. 2000. El fuego y la presencia de encinos. *Ciencia Ergo-Sum. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*. 7(3), Consultado el 25 de enero. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10401909>.