



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Incidencia de plagas y enfermedades en el bosque de *Pinus hartwegii* en el APFF Nevado de Toluca, México, y su relación con factores ambientales y ecológicos

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad

Jorge David Zúniga Mejía

Turrialba, Costa Rica

2020

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

FIRMANTES:



Miguel Cifuentes, Ph.D.
Director de tesis



Diego Delgado, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Sergio Vilchez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Ángel Endara, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Escuela de Posgrado



Jorge David Zúniga Mejía
Candidato

DEDICATORIA

A mi familia, por todo el apoyo brindado desde el inicio hasta el final.

A mi hijo David Alessandro Zúniga, por ser la mayor motivación para seguir siendo un mejor profesional y persona.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional es esta increíble experiencia.

A la UNAG, por el apoyo brindado para poder cursar y culminar este programa de estudios.

Al DAAD, por el generoso apoyo para mi persona en la realización de mis estudios de maestría. Mención especial a esta noble institución por el apoyo a la región en formar capacidades humanas para el desarrollo de esta.

Al CATIE, por el alto nivel de servicios profesionales brindados a mi persona, tanto en el ámbito académico como personal.

A mis asesores Miguel Cifuentes, Sergio Vílchez, Diego Delgado y Ángel Endara, por acompañarme incondicionalmente en este lindo proyecto de investigación, así como compartir experiencias profesionales y personales para ayudar en mi formación.

Al ICAR-UAEMex y su equipo, por el incondicional apoyo en la realización de mi trabajo de campo. Así como el compartir lindas experiencias en la hermosa república mexicana.

A mis compañeros de promoción CATIE 2018-2019, por permitir increíbles relaciones interculturales y el apoyo en todo momento en mi vida estudiantil y recreación; acompañamiento necesario para un placentero paso por la institución.

A los compañeros del ICAR, por el incansable apoyo en el arduo levantamiento de datos de campo en condiciones extremas.

CONTENIDO

RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo general:	4
2.2. Objetivos específicos y preguntas de investigación:	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1. Bosques de <i>Pinus hartwegii</i>	5
3.2. Sanidad forestal	5
3.2.1. Plantas parásitas: muérdagos enanos.	5
3.2.2. Muérdagos enanos: <i>Arceuthobium globosum</i> y <i>Arceuthobium vaginatum</i>	6
3.2.3. Plantas parásitas en las áreas de estudio	7
3.2.4. Descortezador <i>Dendroctonus</i> spp. en México	8
3.2.5. Factores que favorecen la susceptibilidad al ataque por descortezadores.....	10
4. METODOLOGÍA.....	11
4.1. Descripción del área de estudio.....	11
4.2. Diseño de muestreo	12
4.2.1. Instalación de parcelas de muestreo	12
4.3. Determinación del nivel de infestación por muérdagos enanos	13
4.4. Determinación de los niveles de infestación por descortezador.....	15
4.5. Análisis de datos.....	17
5. RESULTADOS	18
6. DISCUSIÓN.....	25
7. CONCLUSIONES.....	29
8. LITERATURA CITADA.....	30
ANEXOS	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a). Plantas de <i>Arceuthobium globosum</i> parasitando a <i>Pinus hartwegii</i> . b). Planta de <i>Arceuthobium vaginatum</i> sobre ramas de <i>Pinus hartwegii</i>	7
Figura 2. Vista lateral y en planta del <i>Dendroctonus adjunctus</i> Blandford (LaBonte y Valley 2013).....	9
Figura 3. Galería del descortezador <i>Dendroctonus adjunctus</i> (Guadarrama de Nova 2013).	10
Figura 4. Ubicación área de estudio, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.....	11
Figura 5. Distribución de las parcelas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. .	12
Figura 6. Diseño de las parcelas de muestreo para caracterizar la incidencia de plagas en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	13
Figura 7. Brotes de <i>Dendroctonus frontalis</i> en expansión, se pueden distinguir pinos en las tres fases de ataque (Billings y Espino 2005).....	16
Figura 8. Grumos y galerías por ataque de <i>Dendroctonus frontalis</i> (Billings y Espino 2005).....	16
Figura 9. Nivel de infestación por muérdago amarillo en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.....	18
Figura 10. Nivel de infestación por muérdago negro en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.	19
Figura 11. Nivel de infestación por descortezador en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.	19
Figura 12. Nivel de infestación por densidad de árboles en las parcelas.	20
Figura 13. Infestación del bosque de <i>P. hartwegii</i> por plagas por clase diamétrica en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	21
Figura 14. Efecto del muérdago amarillo en la densidad de los árboles de <i>Pinus hartwegii</i> en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.	21
Figura 15. Porcentaje de árboles de <i>Pinus hartwegii</i> infestados por exposición, en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.	23
Figura 16. Índice de infestación de <i>Pinus hartwegii</i> por exposición, en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.	24

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Categorías de infestación por muérdago enano en bosques de pino (Hawksworth 1978).....	14
Cuadro 2. Clasificación del nivel de infestación por muérdago enano para un árbol de pino (Hawksworth 1978).....	14
Cuadro 3. Clasificación de niveles de infestación por descortezador (Billings y Espino 2005).	15

RESUMEN

Los bosques de alta montaña son muy susceptibles a las alteraciones en sus hábitats, dada la baja capacidad de regeneración que presentan, en comparación con otros ecosistemas. En estas zonas se crean ambientes específicos o microhábitats en espacios relativamente pequeños, y pueden presentar diferencias fácilmente notables en la estructura y composición de sus especies, a pesar de estar cerca unas de otras (Méndez, Rozzi & Cavieres, 2013). El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la susceptibilidad a plagas de descortezadores y muérdagos en el bosque de *Pinus hartwegii* en el APFF Nevado de Toluca, Estado de México. Para lograr esta meta se estableció el sitio de muestreo entre la cota 3700 y 3800 msnm, rodeando el cráter del volcán. Se establecieron 68 parcelas en esta zona, siendo distribuidas a 500 m una de otra, aproximadamente. Para el establecimiento de cada parcela, se eligió un árbol para representar el centro de esta. En cada parcela se tomó datos generales del sitio como la ubicación UTM, presencia o ausencia de incendios, pendiente y exposición de ladera, con respecto al cráter. En la parcela se midió el DAP en cm de cada individuo, altura total en m, presencia/ausencia y tipo de muérdago por cada tercio del árbol, y la presencia/ausencia de descortezador y la fase de desarrollo de este. También se tomó la ubicación de cada árbol dentro de la parcela, midiendo la distancia de cada uno al centro de la parcela, así como su azimut a la misma referencia.

Se identificó la presencia de descortezador en 32 de las 68 parcelas; el muérdago negro presente en 27 de estas y el muérdago amarillo en 16. El descortezador presenta niveles de infestación medias o bajas en el 70% de las parcelas donde se presenta; algo parecido sucede con el muérdago negro, aunque este tiene su auge en el nivel medio de infestación. El muérdago amarillo presenta niveles de infestación medio a alto, en todas las parcelas donde se encontró. El muérdago amarillo tiene un efecto negativo sobre la densidad de los árboles, donde las infestaciones más severas se encuentran en las parcelas con densidades más bajas. Por otra parte, la presencia de incendios aumenta los niveles de infestación de todos los agentes causales. La presencia del muérdago amarillo muestra una relación importante con la exposición de ladera, ya que este se localiza principalmente en la zona suroeste del volcán. En contraste, el muérdago negro no presenta una relación significativa con respecto a la exposición de ladera. Por su parte, el descortezador presenta relación con la exposición de ladera, dado que se encontró en casi todo el volcán, con excepción de una pequeña parte en la zona noroeste de este.

Palabras claves: Plagas, infestación, muérdago amarillo, muérdago negro, descortezador, *Pinus hartwegii*.

ABSTRACT

High mountain forests are very susceptible to alterations in their habitats, given their low regeneration capacity, relative to other ecosystems. In these areas, specific environments or microhabitats are created in relatively small spaces, and these can present easily recognizable differences in the structure and composition of their species, despite being close to one other (Méndez, Rozzi & Cavieres, 2013). The main objective of this work was to characterize the susceptibility to bark beetles and mistletoes pests in *Pinus hartwegii* forests in the Nevado de Toluca Protected Area, State of Mexico. To achieve this goal, the sampling area was delimited between 3700 and 3800 meters above sea level, surrounding the crater of the volcano. A total of 68 plots were established in this area; distributed approximately 500 m from each other. For the establishment of each plot, a tree was chosen to represent the center of it. In each plot, general site data were taken, such as the UTM location, presence or absence of fire, slope and slope exposure, with respect to the crater. In the plot, the DBH in cm, total height in m; presence / absence and type of mistletoe for every third of the tree, and the presence / absence of bark beetle and its development phase. The location data of each tree within the plot was also taken to know its spatial location, measuring the distance of each one to the center of the plot, as well as its azimuth to the same reference.

The results showed the presence of debarker in 32 of the 68 plots; the black mistletoe was present in 27 of these and the yellow mistletoe in 16. The debarker has medium or low infestation levels in most of the plots where it occurs; something similar happens with the black mistletoe. The yellow mistletoe has medium to high levels, in most of its appearances. Addressing the relationship between the causative agents and the density of trees in the sampled sites, it turned out that the yellow mistletoe has a direct effect on the density of the trees. This relationship is shown negatively, where the most severe infestations are found at the lowest densities. On the other hand, when trying to relate environmental and ecological factors to the degree of infestation by causative agents in pine trees, it was found that the presence of fires increases the infestation levels of all causative agents. The other factor that came to light was the effect of exposure or hillside. In this sense, the yellow mistletoe showed an increase as exposure increased. For black mistletoe, changing exposure had no effect. The debarker decreases its incidence if exposure increases. This shows that there will be more or less incidence of one or another causative agent, depending on where it is located on the slopes of the volcano.

Keywords: Pests, infestation, yellow mistletoe, black mistletoe, bark beetle, *Pinus hartwegii*.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas alpinas de México son muy importantes ya que albergan diversas especies endémicas, y ocupan solamente el 1% del territorio nacional (Hernández *et al.* 2006). Los bosques de coníferas mexicanos presentan amplia diversidad florística y ecológica y son frecuentes en las zonas de clima templado y frío del territorio nacional (Rzedowski 2006). Según Flores *et al.* (1971), el conjunto de los bosques de coníferas ocupa cerca de 15% del territorio del país y más del 90% de esta superficie corresponde a los de *Pinus* o de *Pinus* y *Quercus*.

Pinus hartwegii es una especie dominante, formando rodales puros sobre los 3500 msnm (Endara *et al.* 2012c). Actúa como regulador del ciclo hidrológico (deshielo de los volcanes) y alimentador de agua a los mantos freáticos; como amortiguador importante de los efectos de la contaminación ambiental existente en sus áreas de distribución. El crecimiento de esta especie se ve limitado, principalmente por las condiciones ambientales predominantes en dichas zonas, como las bajas temperaturas y escasa precipitación (Hernández *et al.* 2006), además de plagas y enfermedades.

Los muérdagos enanos *Arceuthobium globosum* y *Arceuthobium vaginatum*, afectan numerosas especies de coníferas en todo el mundo (Hawksworth y Weins 1996). En México, atacan los bosques de alta montaña que se establecen por encima de los 3500 msnm (Endara *et al.* 2010). Estudios han demostrado la presencia de muérdago en poco más de 11,000 ha en el bosque de pino, lo que corresponde a más del 65% del área total. Inclusive, se presentan zonas con hasta el 100% del arbolado infestado en todas sus edades y tamaños (Franco *et al.* 2010).

Por otro lado, los descortezadores del género *Dendroctonus* sp. (familia Scolytidae) son uno de los principales factores de mortalidad durante el desarrollo y establecimiento de bosques y plantaciones, provocando un grave desequilibrio ecológico (Rodríguez *et al.* 2010). Estos insectos barrenadores y defoliadores, tienen también una gran importancia comercial (Zúñiga *et al.* 1994) por los efectos negativos sobre los árboles y los bosques.

En el Estado de México, durante el periodo 2000-2005, estos insectos ocasionaron la muerte de los árboles de 914.7 ha de bosque de coníferas, como pino, oyamel y cedro (Ceballos *et al.* 2009). Esta plaga se encuentra ampliamente distribuida en el estado y las regiones de Toluca, Texcoco, Tejupilco, Coatepec Harinas y Valle de Bravo.

Entre 2005 y 2009, el gobierno federal autorizó el saneamiento de al menos 187 hectáreas en los bosques del Nevado de Toluca, tratando de controlar el daño ocasionado por el descortezador de montaña

(*Dendroctonus adjunctus*), que afecta particularmente a *Pinus hartwegii*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae*. El tratamiento implicó la extracción de cerca de 33,000 m³ de madera, un poco más de 15,400 árboles enfermos (Endara *et al.* 2012a). El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) es una importante Área Natural Protegida del Estado de México. Esta área ha sufrido una disminución considerable en la densidad del arbolado, por la extracción ilegal del recurso forestal con fines comerciales (Franco *et al.* 2006; Endara *et al.* 2012a) y la frecuencia de incendios inducidos, siendo este último el factor que más efecto tiene sobre la dinámica de la regeneración, afectando a las poblaciones de *Pinus hartwegii* (Endara 2007).

Otro de los fenómenos que más afectan el bosque de pino, son los incendios. Estos provocan un cambio en la regeneración y distribución de edades a largo plazo, dejando bosques remanentes dominados por árboles viejos y jóvenes, haciendo el rodal más susceptible a plagas y enfermedades (Endara Agramont *et al.* 2012a). Astudillo Sánchez (2016) concluye que las zonas del bosque donde se encuentran los árboles longevos de *P. hartwegii* son vulnerables ante el incremento de las temperaturas, que puede debilitarlos y hacerlos más susceptibles al ataque de plagas, esperando un retroceso del rango altitudinal a largo plazo.

Los bosques de pino son altamente susceptibles al ataque de diferentes patógenos, principalmente descortezadores (*Dendroctonus adjunctus*) y muérdagos enanos (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*), fenómeno que ha aumentado recientemente (Cedillo Alonso 2017). La presencia de plagas, enfermedades y plantas parásitas contribuyen en gran medida a los procesos de extracción selectiva de madera, haciendo del bosque un sistema residual frágil. Anualmente causan la pérdida de la cubierta forestal en un promedio de 500 ha, principalmente en ANP con manejo y sin él (Franco *et al.* 2010).

En el Estado de México, durante el periodo 2000-2005, los insectos del género *Dendroctonus* spp. ocasionaron la muerte de 914.7 ha de bosque de coníferas (pino, oyamel y cedro). Esta plaga se encuentra ampliamente distribuida en el estado y las regiones de Toluca, Texcoco, Tejupilco, Coatepec Harinas y Valle de Bravo, las cuales representan las zonas con mayor incidencia (Ceballos *et al.* 2009).

En análisis temporales de los mapas forestales del ANPFFNT (Endara *et al.* 2013) se puede evidenciar la reducción en densidades de cobertura de los bosques de pino, por la extracción de arbolado adulto con las mejores características fenotípicas. Esto resulta en un ecosistema residual con árboles enfermos o decrepitos, mismos que son el soporte semillero para las futuras masas forestales.

Lo anterior implica la pérdida de poco más de 40% de los bosques de pino densos (Franco *et al.* 2006), lo que ha provocado un incremento de las superficies infestadas por plagas y plantas parásitas. Estas últimas han llegado a parasitar hasta un 60% de los árboles de pino en bosques fragmentados o abiertos. Esta dinámica requiere ser estudiada para medir el efecto de las plagas en este vulnerable ecosistema.

Las montañas proporcionan diversos servicios ambientales como agua, energía, suelo y biodiversidad, y son de vital importancia para los ecosistemas, las poblaciones locales y las que se encuentran a menor altitud (Torres *et al.* 2014). El APFFNT ofrece a las poblaciones locales el suministro de leña, madera y productos forestales no maderables como la perlilla, el musgo y los hongos silvestres comestibles. Lo anterior convierte al área en una excelente fuente de ingresos económicos debido a la venta de algunos de los productos mencionados (Endara Agramont *et al.* 2012b), además de poseer especies de árboles que juegan un papel importante para la conservación. Estos bosques de pino se hallan en la parte central del país, relativamente cercanos a zonas urbanas como la ciudad de México, donde existe una alta demanda de los servicios ecosistémicos que brindan estos (Rodríguez 2001).

Por tanto, el presente proyecto de investigación plantea la necesidad de caracterizar la incidencia de plagas como descortezadores y muérdagos, en los bosques *Pinus hartwegii* del el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), en el estado de México. Es indispensable que una vez detectados los problemas que enfrenta esta ANP, se cuente con los elementos necesarios para diseñar las estrategias específicas de atención y solución a estos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Determinar el grado de incidencia de plagas de descortezadores y muérdagos en árboles de *Pinus hartwegii* en bosques del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, Estado de México.

2.2. Objetivos específicos y preguntas de investigación:

Los objetivos específicos y la principal pregunta de investigación asociada a cada uno se presentan a continuación:

Determinar el nivel de infestación en árboles de *Pinus hartwegii* en bosques del APFF Nevado de Toluca por el descortezador *Dendroctonus adjunctus* y los muérdagos *Arceuthobium globosum* y *Arceuthobium vaginatum*.

- ¿Cuál es el grado de severidad e incidencia por muérdago y descortezador?

Establecer la influencia del descortezador *Dendroctonus adjunctus* y los muérdagos *Arceuthobium globosum* y *Arceuthobium vaginatum* en la densidad de árboles en bosques de *Pinus hartwegii*

- ¿Cuál es el efecto de la presencia de uno o más agentes causales en la densidad en la masa arbórea?

Determinar la relación entre factores ambientales y ecológicos con el grado de infestación por muérdagos y descortezador en las plantas de *Pinus hartwegii*

- ¿Cómo influye la exposición de ladera, pendiente e incendios en el nivel de infestación en estos bosques?

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Bosques de *Pinus hartwegii*

La superficie boscosa del Estado de México es de 740,000 ha (Chávez 2015), compuestas en su mayoría por coníferas y latifoliadas, divididas en bosques naturales con manejo forestal y sin él. El Estado de México posee el 1% de los bosques nacionales (174,822 ha), del cual 172,206 ha son de bosques de coníferas.

Pinus hartwegii es la especie de pino que se distribuye a mayor altitud (2,800 a 4,200 m) en el mundo (Perry 1991), formando comunidades clímax entre los 3 700 y 4 300 msnm. Es una especie dominante por su buen desarrollo aun a bajas temperaturas y pobreza del suelo, siendo considerada la especie de pino más tolerante a bajas temperaturas. Presenta gran adaptación a temperaturas bajas extremas hasta de -30 °C (Perry 1991; Musálem y Solís 2000), así como una distribución geográfica limitada, soportando la caída de nieve durante los meses de diciembre a febrero (Challenger y Soberón 2008).

3.2. Sanidad forestal

3.2.1. Plantas parásitas: muérdagos enanos.

En los bosques templados, las plantas parásitas, que incluyen al grupo de los muérdagos, se han convertido rápidamente en una de las principales causas para disminución de la producción de madera, reduciendo el crecimiento, rendimiento y calidad de esta (Hawksworth 1983).

Dentro de los factores que afectan a estas áreas se encuentran el grupo de las plagas, que incluyen a los insectos descortezadores, defoliadores, barrenadores de yemas y brotes, barrenadores de conos, semillas y chupadores de savia, también los grupos de enfermedades que afectan raíz, tallo y hojas. Las plantas parásitas como el muérdago enano toman mención especial, representadas por dos especies: *Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*, y el muérdago verdadero: *Psittacanthus* sp. (Franco *et al.* 2010).

Los “muérdagos enanos” deben su nombre al tamaño relativamente corto, ya que las especies de mayor altura alcanzan 90 cm (*Arceuthobium globosum*, en Guatemala) y las más pequeñas son de 8 a 9 mm. (*Arceuthobium minutissimum*, en los Himalayas) (Hawksworth 1978). Los caracteres taxonómicos distintivos de este género son tallos ramificados, de color amarillo, rojizo o negruzco, con nudos

engrosados, hojas opuestas reducidas a escamas y fruto ovoide que al desprenderse lanza la semilla al exterior en forma explosiva (Calderón 1982).

Su diversidad de especies es mayor en el noroeste de México y oeste de los Estados Unidos, donde 28 de las 34 especies del Nuevo Mundo están presentes. Se han identificado en México 22 taxas y ocho de ellos son comunes en el oeste de los Estados Unidos de América. Existen registros de muérdagos enanos en 24 estados de la República (Hawksworth y Wiens 1996) parasitando exclusivamente a los géneros *Pinus* (29 especies), *Pseudotsuga* (2 especies) y *Abies* (2 especies), (Hawksworth, 1985). En Michoacán se han identificado 3 especies: *A. globosum* ssp. *grandicaule*, *A. vaginatum* ssp. *vaginatum* y *A. abietis-religiosae*.

3.2.2. Muérdagos enanos: *Arceuthobium globosum* y *Arceuthobium vaginatum*

Arceuthobium globosum son plantas de 17 a 18 cm de altura, tallos verdosos, ramificados; internodos de 1.4 a 3.7 cm de largo y fruto maduro de 7 mm de largo por 3.5 de ancho (Figura 1a). La floración ocurre de junio a mayo y la dispersión de la semilla de junio a octubre del siguiente 17 año. Los frutos tardan en madurar de 16 a 17 meses y prosperan a una altitud de 2,700-3,900 msnm. Sus hospedantes principales son *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. douglasiana* y *P. rudis* (Vasquez et al. 2006).

El *Arceuthobium vaginatum* son plantas de 20 a 50 cm de altura; tiene tallos café oscuros o negros, ramificados, con internodos de 0.5 a 3 cm de largo y de 0.8 a 2 cm de diámetro. La flor masculina mide 1.6 mm de largo y el fruto 5.5 mm de largo por 3.5 de ancho (Figura 1b). La floración es de marzo a abril y la dispersión de la semilla ocurre en agosto del año siguiente; el periodo de maduración del fruto es de 16 a 17 meses. Sus hospederas principales son *Pinus herrerae*, *P. montezumae*, *P. hartwegii*, *P. rudis*, *P. lawsonii*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. teocote* (Vasquez et al. 2006).



Figura 1. a). Plantas de *Arceuthobium globosum* parasitando a *Pinus hartwegii*. b). Planta de *Arceuthobium vaginatum* sobre ramas de *Pinus hartwegii*.

3.2.3. Plantas parásitas en las áreas de estudio

Ramírez y González (2006) determinaron la distribución espacial del muérdago enano, parásito de coníferas, en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. Dicha distribución se estableció por métodos de estadística no espacial y espacial (Geoestadística y Análisis Espacial por Índices de Distancia, SADIE por sus siglas en inglés). Así mismo, Ramírez y Porcayo (2010), aplicaron métodos geoestadísticos para conocer la distribución espacial de muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca. Los resultados de ambos estudios demostraron que las poblaciones de muérdago enano presentaron una distribución agregada, distribuyéndose en varios centros. También se encontró que la infestación de este parásito de coníferas no alcanzó 100% de las parcelas de estudio, pero no se logró determinar una estabilidad espacial y temporal de las poblaciones del parásito.

En 2010 se realizó un estudio fitosanitario del bosque del Nevado de Toluca (Franco *et al.* 2010), en el que se obtuvieron polígonos de las superficies infestadas por muérdago, bajo la metodología de transectos en campo. El estudio señala que el muérdago enano infestaba 3410 ha y el muérdago verdadero 95 ha. Por su parte, Cedillo (2012) identificó 6,003 ha infestadas por muérdago enano, 70 ha por muérdago verdadero y 41 puntos con presencia de descortezador *Dendroctonus adjunctus*, tomando como referencia la metodología propuesta por Billings y Espino (2005).

En 2014, la CONAFOR, a través de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), publicó un documento de plagas y enfermedades en los bosques del nevado de Toluca. Este documento plantea para el bosque de pino 9,308 ha infestadas por muérdago enano, 55 ha por muérdago verdadero, así como 106 puntos de presencia de descortezador. Para el bosque de Oyamel se encontraron 1,539 ha infestadas por muérdago enano y para el bosque de Aile 541 ha infestadas por muérdago verdadero.

3.2.4. Descortezador *Dendroctonus* spp. en México

A nivel mundial la familia Scolytidae contiene más de 500 especies. Esta familia se divide en dos grupos según su hábito alimenticio: los escarabajos ambrosiales, que son 7 barrenadores de la madera y los escarabajos descortezadores, que se alimentan del floema (Coulson y Witter 1990). De esta familia, el género *Dendroctonus* es uno de los principales factores de mortalidad durante el desarrollo y establecimiento de los bosques y plantaciones

Los adultos de este género tienen un cuerpo duro, moderadamente alargado y cilíndrico. Son de color café (cuando son preimagos) o negro y miden 1.0 a 3.0 mm (Figura 2). Las antenas son geniculadas y contienen un segmento basal alargado conectado a una serie de segmentos cortos. Los élitros cubren el abdomen. En algunos casos, el extremo distal de los élitros es cóncavo y en otros casos es convexo con varias espinas peculiares (Coulson y Witter 1990).

Este descortezador es la principal plaga forestal en los bosques de pinos que se encuentran por arriba de los 2800 m. Estos descortezadores tienen un papel ecológico fundamental, ya que son uno de los principales factores de renovación y saneamiento natural de las comunidades forestales, pudiendo causar la muerte de miles de árboles, ocasionando un grave desequilibrio ecológico (Rodríguez *et al.* 2010). Sus infestaciones han obligado a la aplicación de campañas emergentes de saneamiento. Es de particular importancia en los Parques Nacionales del centro de México, ya que en ellos se encuentran rodales formados por árboles de edad avanzada, en baja densidad y sometidos a incendios frecuentes (Cibrián *et al.* 1995).

Se consideran plagas forestales debido a la significativa mortalidad y las pérdidas económicas que provocan a todo el sector forestal (Salinas *et al.* 2010). Los escarabajos infestan latifoliadas y coníferas. Las especies que son más afectadas son aquellas que presentan un valor comercial como el pino (*Pinus* spp.), abeto (*Abies* spp.) y *Picea* spp. (Coulson y Witter 1990). Salinas (2010) menciona que además de

las especies, intervienen varios factores ecológicos, químicos y geográficos determinan la especie a atacar por parte del insecto.

En México este género se distribuye desde las Sierra Baja de California, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Transmexicana, Sierra Madre del Sur, hasta la Sierra de Chiapas. Sus rangos altitudinales se encuentran desde los 600 hasta cerca de 4 000 m, con mayor presencia entre los 1 700 y los 2500 m (Salinas *et al.* 2010). El *D. adjunctus* se distribuye desde el suroeste de los Estados Unidos hasta Guatemala, en altitudes que oscilan entre los 3100 y 3500 m. También se puede encontrar esta especie desde 1600 a 3929 m y sus principales hospederos son: *P. hartwegii*, *P. montezumae*, *P. rudis*, *P. ponderosa*, *P. chihuahuana*, *P. pseudostrobus*, y *P. laewsoni* (Rodríguez *et al.* 2010).

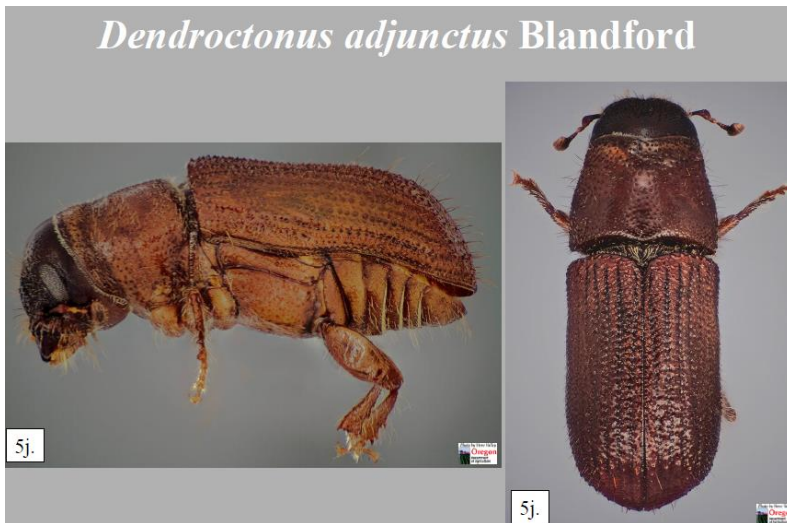


Figura 2. Vista lateral y en planta del *Dendroctonus adjunctus* Blandford (LaBonte y Valley 2013).

Hall y Davies (1968) describen que el ataque de *D. adjunctus* es directamente a través de la corteza del árbol, generando galerías (Figura 3). En estas colocan sus huevecillos, debilitando y llegando a matar al individuo colonizado, para posteriormente dispersarse a árboles cercanos y seguir alimentándose.



Figura 3. Galería del descortezador *Dendroctonus adjunctus* (Guadarrama de Nova 2013).

3.2.5. Factores que favorecen la susceptibilidad al ataque por descortezadores

Según Billings *et al.* (2004), las inundaciones, sequías, incendios, muérdago, patógenos de raíces, contaminación atmosférica, daños por labores de cultivo y la calidad nutricional de la biomasa, son otros factores que facilitan la infestación de descortezadores en el árbol (Coulson y Witter 1990). Las quemas controladas y de baja intensidad de pinares de diez años reducen la competencia entre árboles, aumentan su vigor y aumentan la resistencia de los pinos al ataque de los descortezadores. Sin embargo, cuando estos son demasiado intensos y frecuentes pueden debilitar los pinos ya establecidos y matarlos definitivamente al producir menos resina y ser más llamativos a los ataques de *Dendroctonus* spp. (Billings *et al.* 2004, Fonseca 2007). La relación entre muérdago y el descortezador (*Dendroctonus* spp.) como causantes de la mortalidad de árboles ha sido muy discutida y aunque hay pocos datos sobre este tópico, se han descrito algunos complejos entre *Arceuthobium vaginatum*-*Dendroctonus ponderosa* en *P. ponderosa*. Otro complejo es *Arceuthobium americanum*-*Dendroctonus americanus* en pinos, donde los árboles infestados por muérdago son igualmente susceptibles al ataque de estos coleópteros que en árboles no infestados (Vasquez *et al.* 2006).

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado Toluca (APFFNT), ubicada a 22 km al suroeste de la ciudad de Toluca, entre 8° 59' y 19° 13' norte y 99° 37' y 99° 58' oeste (Figura 4).

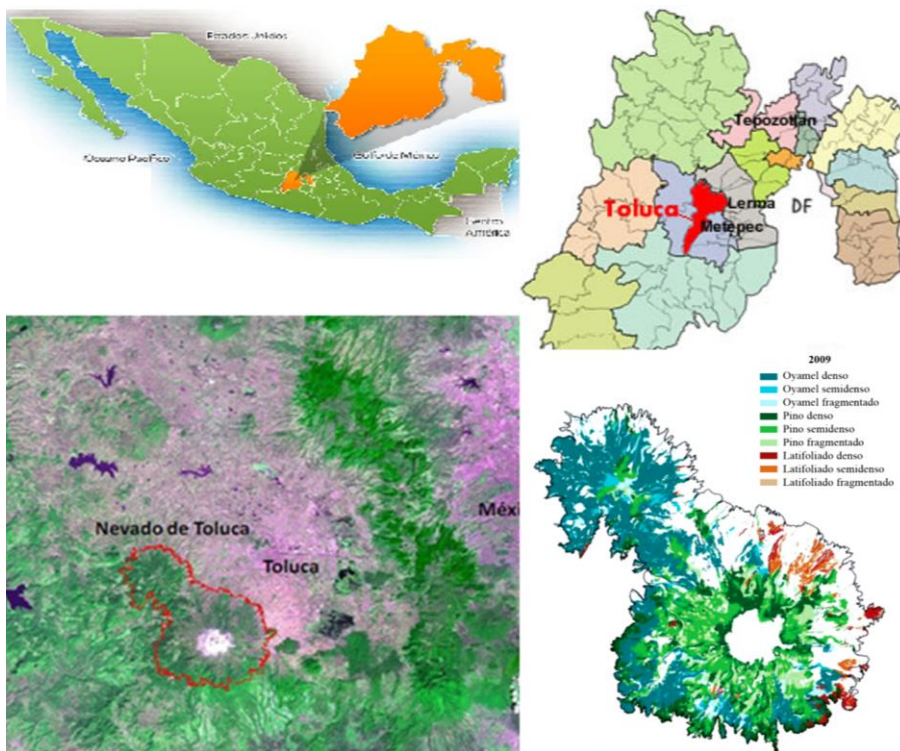


Figura 4. Ubicación área de estudio, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

El Nevado de Toluca es una de las áreas naturales protegidas con más antigüedad en México, decretado inicialmente como Parque Nacional el 25 de enero de 1936, modificado por decreto presidencial el 19 de febrero de 1937 para establecer una reserva forestal nacional dentro del parque. El 1 de octubre de 2013, fue dotada con la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna por decreto presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación (CONANP 2016). Endara *et al.* (2015) la define como una importante área protegida con cerca de 54,000 hectáreas, cubierta por extensos bosques de coníferas (*Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*) y latifoliadas (*Alnus acuminata* y *Quercus* sp.).

De acuerdo con Franco (2009), el volcán Nevado de Toluca o Xinantécatl es la cuarta montaña más alta del país, con 4,680 msnm. Contiene diversos ecosistemas que requieren ser preservados y restaurados

debido a la variedad e intensidad de las actividades humanas que se registran actualmente en su territorio (CONANP 2016).

4.2. Diseño de muestreo

Se realizó una visita preliminar al sitio de estudio para identificar los diferentes agentes causales a estudiar, tales como los diferentes tipos de muérdago (amarillo y negro) y los árboles infestados por descortezador. Las unidades de muestreo fueron ubicadas sistemáticamente, tomando en cuenta la zona clímax de los bosques puros de *Pinus hartwegii*, que se encuentra aproximadamente en la cota 3700 y 3800 msnm. Se instaló un total de 68 parcelas alrededor del volcán, lo que representa un área de muestreo total de 6.8 ha. Este número es derivado del anillo secuencial de parcelas entre las cotas de elevación. Las parcelas fueron circulares, con un área de 0.1 ha (17.86 m de radio), establecidas a una distancia de aproximadamente 500 m entre ellas.

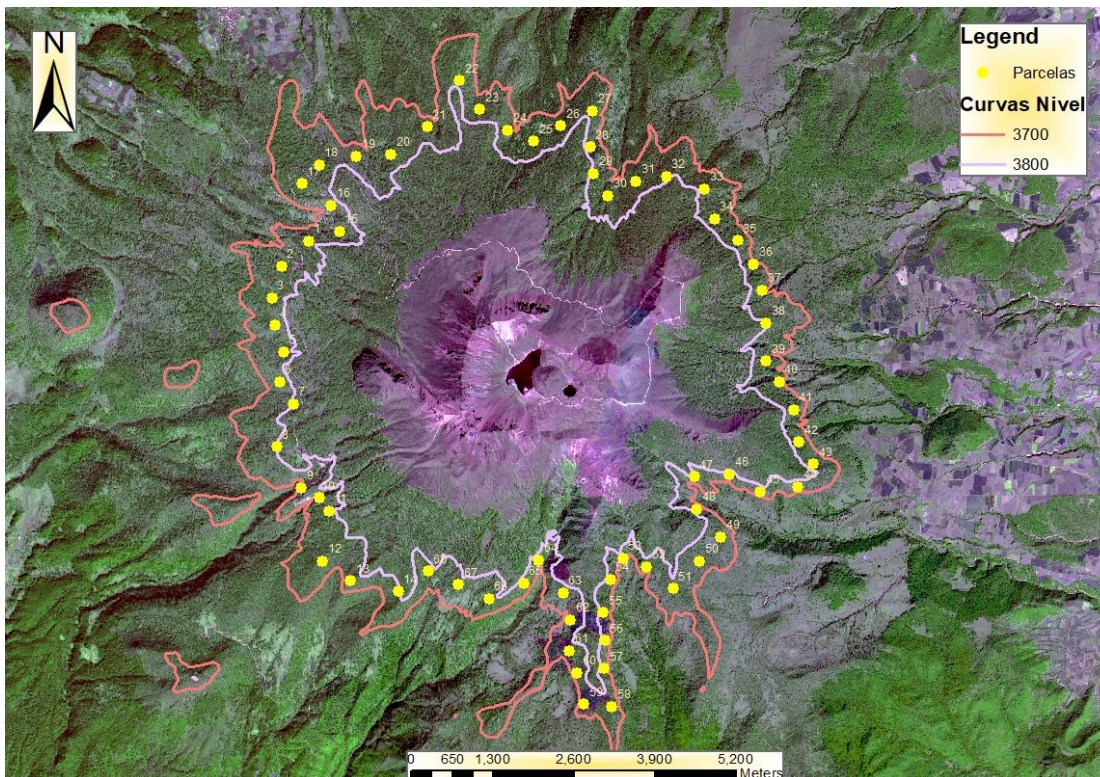


Figura 5. Distribución de las parcelas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.2.1. Instalación de parcelas de muestreo

En cada punto de muestreo, se eligió un árbol dentro de la parcela, para tomarlo como centro de esta. Este debía tener características de tamaño y salud óptimas para tratar de asegurar que el centro de la

parcela tendría una marca a mediano y largo plazo. Para la toma de datos se consideraron solo los individuos con un DAP ≥ 5 cm, a los cuales se midió el diámetro y altura, dentro de un radio de 17,8 m (Figura 6).

Se tomó la pendiente media de la parcela en grados ($^{\circ}$), usando un clinómetro Suunto $^{\circ}$. Además, se anotó la presencia o ausencia de incendios recientes; tomando como indicador, la presencia de corteza quemada en la base de los árboles presentes. La exposición de la parcela se determinó mediante el programa ArcGis $^{\circ}$, tomando como referencia el centro del cráter del volcán y trazando un azimut (0 a 360°) hacia cada parcela.

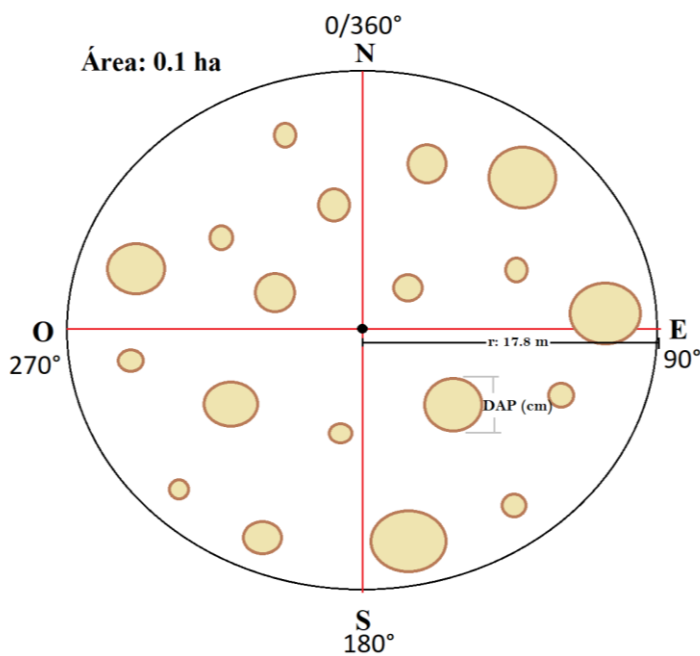


Figura 6. Diseño de las parcelas de muestreo para caracterizar la incidencia de plagas en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.3. Determinación del nivel de infestación por muérdagos enanos

Se realizó una visita preliminar al sitio de estudio para identificar los diferentes agentes causales a estudiar, tales como los diferentes tipos de muérdago (amarillo y negro) y los árboles infestados por descortezador. Para evaluar el grado de infestación y evaluación de daños del muérdago, se utilizó la metodología propuesta por Hawksworth (1978). Esta metodología valora, en una escala semi

cuantitativa, la abundancia de muérdago, al dividir el árbol en tres secciones verticales iguales y a cada una de ellas le asigna un valor de 0, 1 o 2, de acuerdo con su nivel de infestación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Categorías de infestación por muérdago enano en bosques de pino (Hawksworth 1978).

Nivel de muérdago por tercio	Calificación
Infestación no visible	0
Infestación ligera (½ o menos de las ramas infestadas)	1
Infestación severa (más de ½ de las ramas infestadas)	2

Una vez asignado un nivel de infestación a cada tercio del árbol, usando esta clasificación, se procedió a sumar los valores de los 3 tercios de este y así obtener el nivel de infestación del individuo (Cuadro 2). Estos valores van desde 0 (ausencia de muérdago) a 6 (máxima infestación).

Cuadro 2. Clasificación del nivel de infestación por muérdago enano para un árbol de pino (Hawksworth 1978).

Clase	Características	Clasificación
0	Árbol sano	Nulo
1	Muérdago muy escaso en una sección	Bajo
2	Normalmente con muérdago escaso en dos secciones o abundante en una sola sección.	
3	Infestación muy escasa, aunque tiende a distribuirse en las tres secciones.	Medio
4	Muérdago en todo el árbol, aunque abunda sólo en una sección.	
5	Infestación abundante en casi todo el árbol.	Alto
6	Infestación abundante en todo el árbol.	

Cuando cada árbol de la parcela tiene su nivel de infestación asignado, se suman los valores de todos los árboles infestados y se divide entre el número de árboles infestados en la parcela, obteniendo así la clase de Hawksworth (1978) por parcela, usando la siguiente fórmula:

$$NI_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij})}{NpA_i}$$

NI: Nivel de infestación

NpA: Número de árboles infestados por parcela

A: Tipo de afectación

i: Número de parcela (1-63)

j: Nivel de infestación por tercio de cada árbol (0-2)

k: Niveles de infestación por árbol (1-3)

El porcentaje de infestación se obtiene usando los datos del número de árboles infestados en la parcela y el número total de árboles en esta. Por otro lado, el nivel de infestación para cada parcela se calcula usando el promedio de los niveles de infestación de todos los árboles dentro de la parcela con esta condición, dividiendo este entre el número total de árboles infestados en esta.

4.4. Determinación de los niveles de infestación por descortezador

En cada parcela se evaluó la presencia de descortezador en todos los árboles infestados con DAP \geq a 5 cm. La forma de reconocer que un árbol ha sido atacado por alguna especie de *Dendroctonus* spp. es la coloración de la copa y la presencia de grumos de resina de color blanco y consistencia suave en la corteza, los cuales indican que el insecto ha iniciado la colonización. Conforme avanzan las semanas, los grumos toman una coloración de color cremosa de consistencia dura (Castellano *et al.* 2013a).

Los niveles de infestación en los árboles se determinaron mediante la metodología propuesta por Billings y Espino (2005), en donde clasifican la sanidad del árbol en tres fases o niveles (Cuadro 4, Figura 7). Los grumos indican ataques de los gorgojos adultos en el fuste de un pino (Cuadro 3). Las galerías bajo la corteza en forma de “S” llenas de aserrín, caracterizan ataques por el gorgojo del pino. Es común encontrar las larvas blancas del gorgojo dentro de la corteza de pinos infestados con copas amarillentas (fase 2) (Billings y Espino 2005).

Cuadro 3. Clasificación de niveles de infestación por descortezador (Billings y Espino 2005).

Fase infestación	Características del árbol
Árbol sano	El árbol presenta la copa verde y sin grumos de resina.
Fase 1	El árbol presenta la copa verde y grumos de resina fresca.
Fase 2	El árbol se encuentra infestado de larvas dentro de la corteza, presenta la copa amarillenta con grumos secos y duros a lo largo del fuste.

Fase 3

Se caracteriza porque el árbol presenta la copa rojiza o de color marrón, con muchos orificios por la salida de los escarabajos en la corteza suelta, así como de árboles muertos y sin hojas.

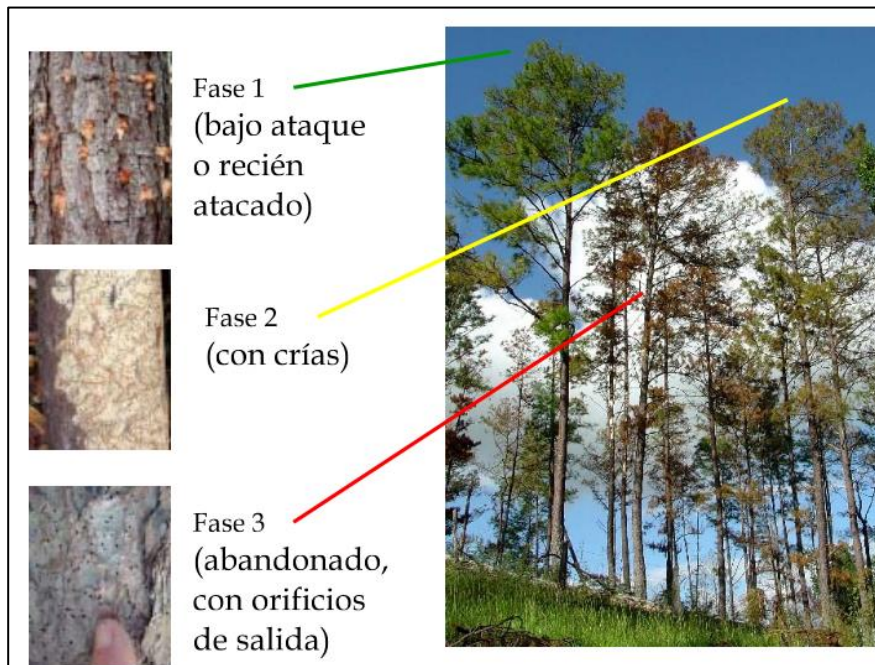


Figura 7. Brotes de *Dendroctonus frontalis* en expansión, se pueden distinguir pinos en las tres fases de ataque (Billings y Espino 2005).



Figura 8. Grumos y galerías por ataque de *Dendroctonus frontalis* (Billings y Espino 2005).

Para determinar el nivel de infestación en la parcela, se promedió los valores de infestación de los árboles encontrados dentro de la misma, incluyendo los árboles sanos.

4.5. Análisis de datos

Para responder a las relaciones las plagas y enfermedades con la densidad de árboles, se ajustó un modelo exponencial con distintas parametrizaciones (Anexo 5). El modelo que maximizó la relación fue evaluado con estadísticos de ajuste, como la raíz cuadrada medio del error (RMSE), medida de ajuste del modelo (R^2), criterio de información de Akaike (AIC), logaritmo de verosimilitud (LogLik) y sesgo (S) (Anexo 6).

Para evaluar la relación entre factores ambientales y ecológicos sobre la incidencia de plagas y enfermedades se ajustó un modelo lineal mixto con función de distribución binomial. La variable de respuesta fue la incidencia de muérdagos o descortezador; como variables explicativas los factores ambientales y ecológicos (efectos fijos) y como efecto aleatorio se consideró la unidad de muestreo con el fin de controlar la sobre dispersión de los datos.

5. RESULTADOS

La presencia de los agentes de infestación, así como la severidad de sus ataques, se presentan gráficamente en las figuras 9, 10 y 11, que son planos cartesianos con X, Y de latitud/longitud para mostrar la ubicación de las parcelas alrededor del cráter, por ello se representa la distribución de cada agente causal en estas. La severidad del ataque está representada por el tamaño del círculo dentro del gráfico; a mayor tamaño, más severo el ataque.

El descortezador tiene incidencia en casi la mitad de las parcelas, por encima de los muérdagos, con presencia en 32 de las 68 muestreadas. Generalmente se encuentra en los niveles de severidad medios o bajos, con parcelas agrupadas en las zonas sur y oeste del volcán (Figura 9).

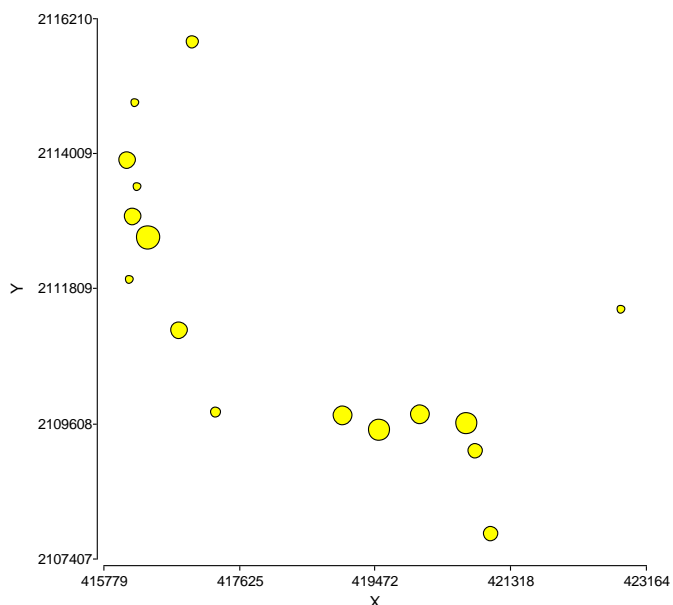


Figura 9. Nivel de infestación por muérdago amarillo en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

Por su parte, el muérdago negro se encontró en 27 de las parcelas, con niveles de infestación mayores al muérdago amarillo, y con una distribución uniforme alrededor del volcán (Figura 10).

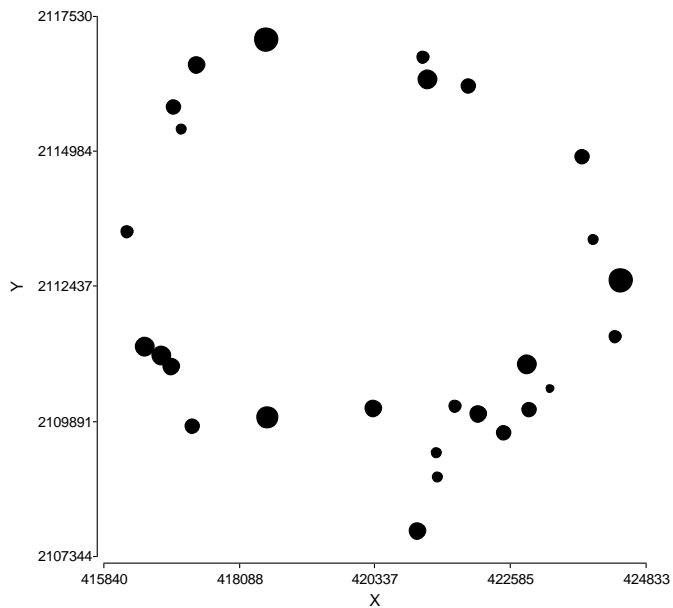


Figura 10. Nivel de infestación por muérdago negro en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

El descortezador presenta una distribución parecida al muérdago negro, salvo la zona noroeste del volcán, donde este está ausente. Presente en solo 16 de las 68 parcelas muestreadas, es el agente de infestación con menos presencia en el sitio de muestreo. La severidad predominante es media (Figura 11).

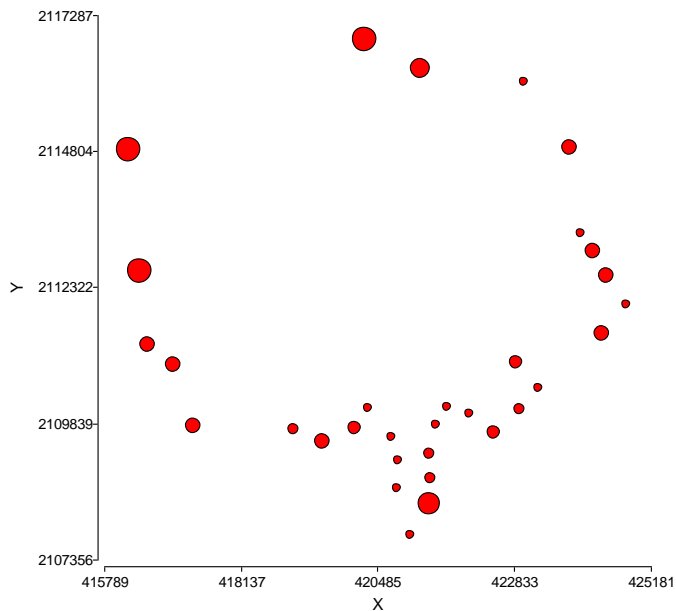


Figura 11. Nivel de infestación por descortezador en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

En el proceso de medición de las parcelas se encontraron todos los escenarios posibles de infestación; la presencia de todas las afectaciones, así como todos los niveles de infestación en el área muestreada. El

nivel de infestación por muérdago amarillo está bien distribuido en las parcelas que lo presentan. Este fenómeno también aplica para los niveles de infestación por muérdago negro. En este sentido el descortezador muestra mayor presencia con niveles bajos de infestación.

El número máximo de árboles de pino registrados en una parcela fue 87, de ahí se refiere los siguientes enunciados. El muérdago amarillo presenta la mayor severidad de infestación en rodales con densidades baja o media (40-50 arb ha⁻¹). Los rodales con densidades media o baja presentan niveles medios de severidad por muérdago negro. Por otro lado, los rodales con densidades bajas tienden a mostrar niveles de severidad medios o bajos por descortezador (Figura 12).

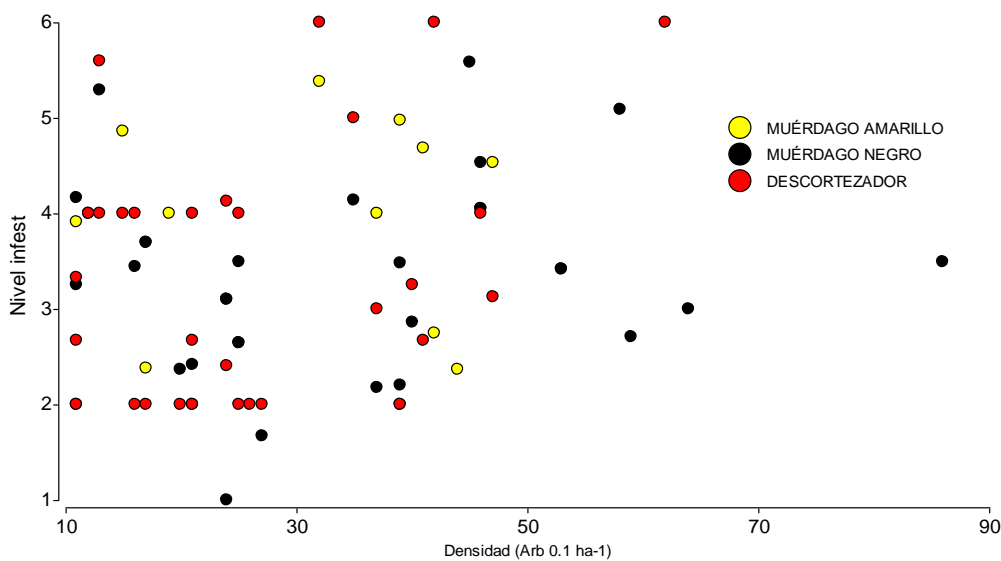


Figura 12. Nivel de infestación por densidad de árboles en las parcelas.

Al referirnos de la presencia de los agentes causales en las diferentes clases diamétricas de los árboles, se muestra que los dos muérdagos evaluados en este estudio presentan una importante presencia en árboles de diámetros menores, principalmente hasta los 30 cm de DAP. El descortezador tiene un comportamiento menos agresivo en la zona de estudio pero con protagonismo en individuos de diámetros mayores que para los muérdagos; teniendo un auge en árboles con diámetros de 20 a 60 cm, aproximadamente (Figura 13).

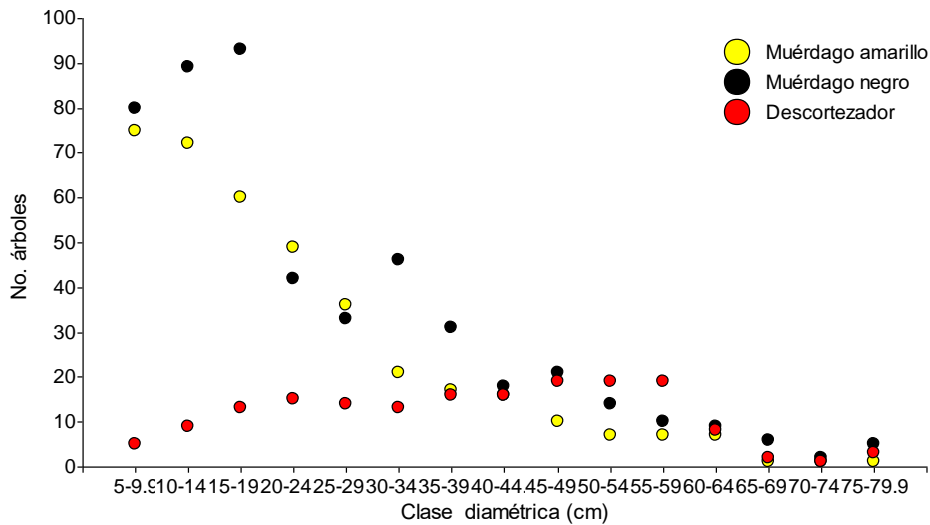


Figura 13. Infestación del bosque de *P. hartwegii* por plagas por clase diamétrica en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

El muérdago amarillo tiene mayor presencia y severidad en árboles de diámetros menores, perdiendo protagonismo en rodales más maduros y menos densos (Figura 14). Esto sugiere que tiene un efecto negativo con respecto a la densidad de los árboles. Las infestaciones más severas se encuentran en las densidades más bajas de los individuos de pino.

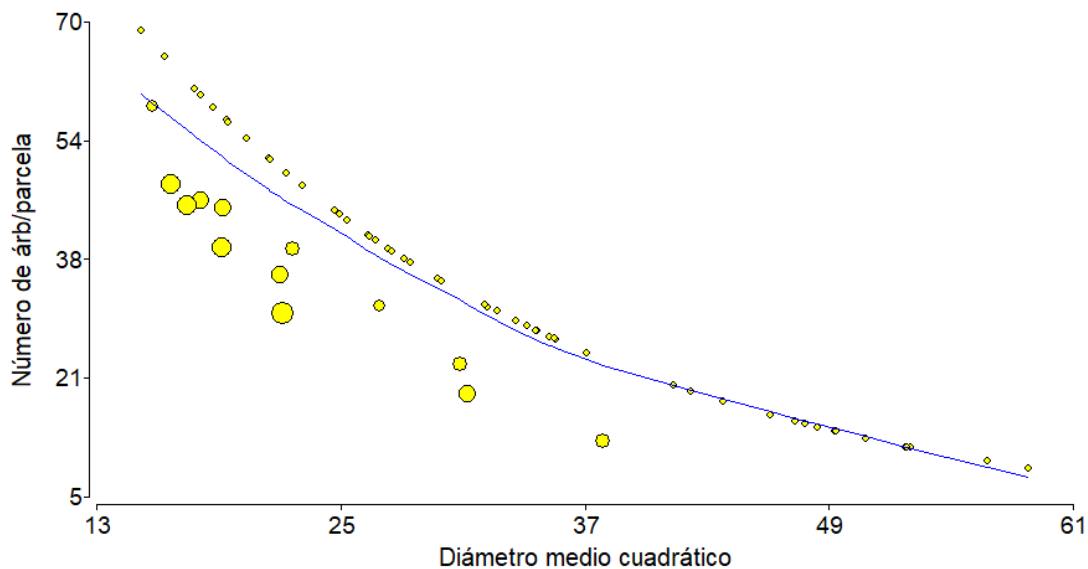


Figura 14. Efecto del muérdago amarillo en la densidad de los árboles de *Pinus hartwegii* en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

La presencia más relevante de muérdago amarillo está reflejada en los sitios o parcelas con densidades más bajas. En este mismo sentido, el muérdago negro está presente de manera casi uniforme en todos los escenarios de densidad muestreados; al igual que el descortezador.

En la relación factores ecológicos ambientales con los niveles de infestación, hay un efecto estadísticamente significativo de los incendios ($p = 0.0002$) y una interacción entre el tipo de afectación y la exposición ($p = 0.0066$) sobre la incidencia de infestación (Anexo 2). Cuando hay incendios, hay un aumento en la incidencia de muérdagos y descortezador (Figura 15). Sin embargo, la exposición tiene un efecto diferenciado sobre los muérdagos y descortezador; dependiendo del tipo de plaga, la relación cambia.

El muérdago amarillo muestra una clara relación con la exposición de ladera; a medida que nos trasladamos de la zona sur del volcán a la zona oeste, aumenta la incidencia de este. La distribución geográfica alrededor del cráter no influye en la incidencia del muérdago negro. El descortezador disminuye su incidencia cuando nos trasladamos de la zona este a oeste. Esto muestra que hay mayor o menor incidencia de cada agente causal, dependiendo de las laderas del volcán. Cuando no hay incendios, el efecto de la exposición es menor que cuando los incendios están presentes (Figura 15). En este escenario, la probabilidad de incidencia de descortezador es menor.

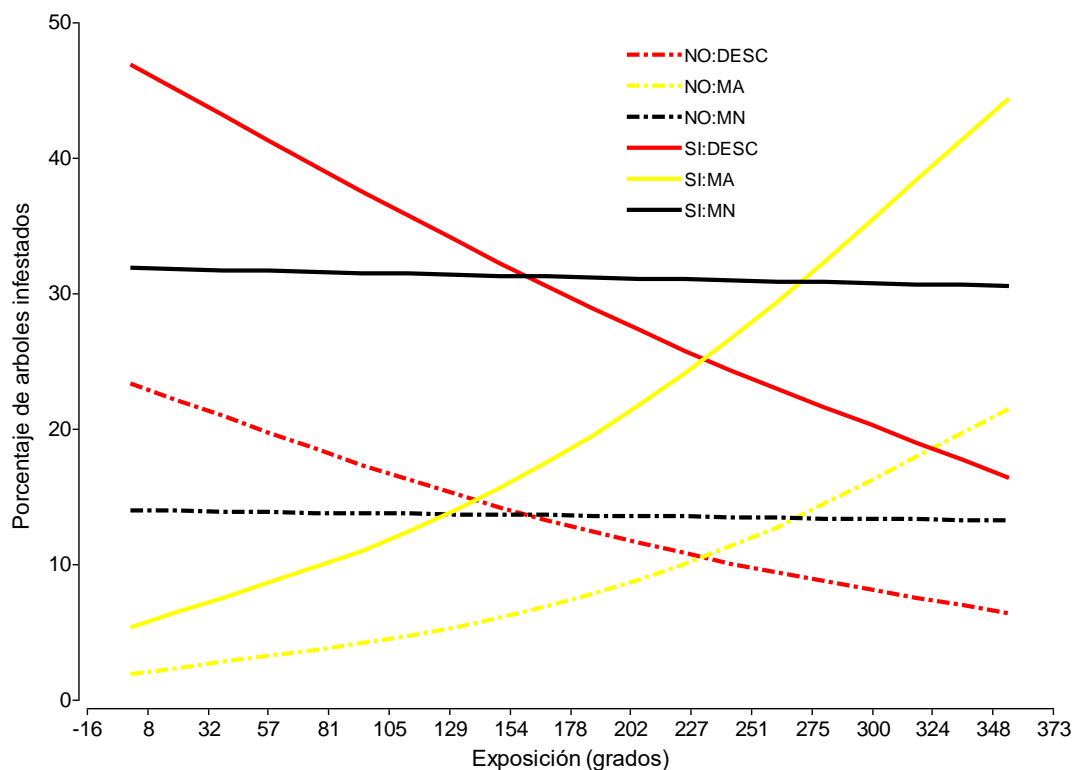


Figura 15. Porcentaje de árboles de *Pinus hartwegii* infestados por exposición, en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

Donde NO: DESC es la probabilidad de incidencia de descortezador sin incendios, NO:MA es la probabilidad de incidencia de muérdago amarillo sin incendios, NO:MN es la probabilidad de incidencia de muérdago negro sin incendios, SI: DESC es la probabilidad de incidencia de descortezador con incendios, SI:MA es la probabilidad de incidencia de muérdago amarillo con incendios, SI:MN es la probabilidad de incidencia de muérdago negro con incendios.

Hay un efecto de los incendios ($p= 0.0001$) y una interacción entre el tipo de afectación y la exposición ($p = 0.0234$). Cuando hay evidencia de incendios recientes, hay un aumento en la severidad de las distintas plagas o enfermedades (Figura 16). Sin embargo, la exposición tiene un efecto diferenciado sobre los muérdagos y descortezador; dependiendo del tipo de enfermedad, la relación cambia de la siguiente manera: el muérdago amarillo aumenta su incidencia hacia la ladera suroeste y noroeste. El muérdago negro está presente en todas las laderas del volcán. El descortezador presenta una mayor incidencia en las laderas noreste y sureste, perdiendo protagonismo al avanzar al oeste. Esto muestra que habrá mayor o menor incidencia, dependiendo dónde esté situado.

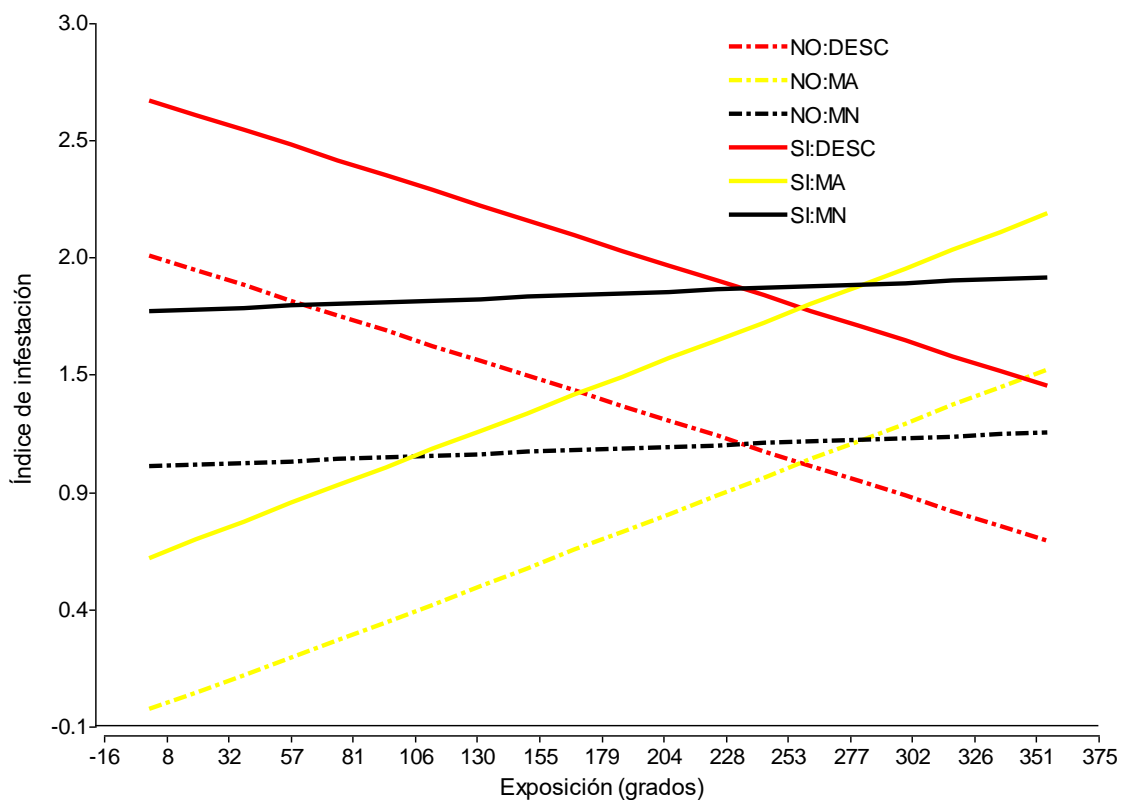


Figura 16. Índice de infestación de *Pinus hartwegii* por exposición, en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México.

NO: DESC es la probabilidad de incidencia de descortezador sin incendios, NO:MA es la probabilidad de incidencia de muérdago amarillo sin incendios, NO:MN es la probabilidad de incidencia de muérdago negro sin incendios, SI: DESC es la probabilidad de incidencia de descortezador con incendios, SI:MA es la probabilidad de incidencia de muérdago amarillo con incendios, SI:MN es la probabilidad de incidencia de muérdago negro con incendios.

Incluyendo a estos factores, se evaluó también el efecto de la pendiente, misma que no presentó efectos estadísticamente significativos, por tanto no fue incluida en el análisis final de datos para la obtención de las figuras 15 y 16.

6. DISCUSIÓN

Los resultados están restringidos a una sola cota altitudinal, dejando de lado las demás zonas con otras características del sitio, posiblemente encontrando un efecto de sitio y, por lo tanto, obteniendo resultados con tendencias diferentes a la totalidad del nevado. El contraste entre la presencia del muérdago y la densidad de los árboles nos lleva a concluir que no hay relación entre estas variables. La mortalidad encontrada en las parcelas de muestreo se resumen en los anexos 8 y 9. La mayor decadencia de árboles en la zona se atribuye al efecto del muérdago negro en la zona. Tal aseveración se deriva de la presencia de este muérdago en las parcelas con mortalidades mayores, pero no necesariamente eliminados por efecto de esta plaga. En muchos de estos casos se encontró a los árboles muertos con restos del muérdago, mismo que se disponía también a morir por que su hospedero ya no posee los insumos de donde éste se alimentaba. El muérdago amarillo y el descortezador presentan niveles de mortalidad mas bajos.

En la relación de incidencia de infestación de los agentes causales por clase diamétrica en los árboles de las parcelas, Castellano *et al.* (2013b) mencionan que árboles con un diámetro basal menor que 12.5 cm tienen menor posibilidad de ser infestados por que poseen un floema delgado el cual difícilmente podría alimentar a los insectos *Dendroctonus*. En el sitio de estudio también se presenta una baja infestación en clases diamétricas menores, aumentando su presencia en árboles desde los 20 cm DAP, alcanzando su pico de presencia en árboles de 50 a 60 cm DAP (Figura 3), por lo que esta dinámica entre plagas y el tamaño de los árboles hospederos parece ser generalizada. El pico de presencia de ambos muérdagos se evidencia en árboles entre 5 y 25 cm de DAP. Tal fenómeno puede explicarse por la forma de distribución de estos muérdagos, cuyo fruto ovoide al desprenderse lanza la semilla al exterior en forma explosiva (Calderón 1982). Partiendo de la premisa que los focos de infestación de estas plantas parásitas inician en árboles de porte alto, principalmente por la distribución natural por aves, se puede inferir que la eclosión y expulsión de sus semillas llegan predominantemente a las ramas de árboles de menor porte, cercanos al hospedero inicial.

Se comparó los índices de infestación y el porcentaje de árboles infestados por los agentes causales contra los incendios y la exposición de ladera. Estos dos enfoques de análisis no mostraron diferencias en la tendencia de los resultados, por lo que se concluyó que basta con evaluar el porcentaje de árboles o nivel de infestación para realizar los análisis contra los incendios y la exposición de la ladera.

La presencia de incendios produce un notorio incremento en los niveles de infestación y el porcentaje de árboles afectados por los diferentes agentes causales. Esto puede deberse a la pérdida de vigorosidad que

sufren estos árboles expuestos a las llamas, disminuyendo considerablemente su capacidad de respuesta ante cualquier afectación a la que se vean expuestos. Tal como lo expone Billings et al. (2004), los incendios demasiado intensos o frecuentes pueden debilitar los pinos establecidos o matarlos definitivamente, porque estos producen menos resina y se defienden peor contra los ataques iniciales de los gorgojos primarios (*Dendroctonus* spp.). Este fenómeno es claramente observable en la zona de estudio.

En Honduras, la CONADEH (2016) realizó un estudio sobre la afectación del descortezador en bosques de pino y su relación con los incendios forestales. Se llegó a concluir que esta afectación influirá significativamente en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales para los siguientes tres a cuatro años, ya que los árboles afectados, los derribados y los que se dejan en pie en el lugar, como producto de las franjas de protección y del control del gorgojo, se convierten en un excelente material combustible que favorece los incendios forestales.

La presencia de incendios está estrechamente relacionada con la presencia de los agentes causales, y en este caso el descortezador porque los incendios facilitan la infestación de bosques por plagas. La situación inversa se da cuando las áreas plagadas no son saneadas de la forma adecuada para el sitio en particular, siendo los restos de los árboles, combustibles potenciales para aumentar la severidad de posibles nuevos incendios (Billings *et. al.* 2004).

Una posible explicación al comportamiento de los agentes causales en las laderas del volcán es la relación entre el clima y la exposición de ladera, relacionada a la incidencia de energía solar, los vientos y la humedad. Considerando la posición geográfica del volcán Nevado de Toluca, situado cerca del trópico de cancer, al norte del área de estudio se ubica la zona de umbría y al sur del mismo, la zona de solana.

Los ambientes de alta montaña se encuentran sobre el límite arbóreo y se caracterizan por sus bajas temperaturas del aire y del suelo, una breve estación de crecimiento, altos niveles de radiación solar y fuertes vientos (Körner 2003, 2004). En el hemisferio norte, las laderas con exposición sur reciben mayor radiación solar que sus contrapartes con orientación norte; siendo las laderas con exposición norte más húmedas en comparación con aquellas con orientación sur (López Gómez *et al*, 2012).

Las comunidades vegetales pueden comportarse de maneras diferentes al emplear sus recursos, en especial cuando se trata del recurso hídrico. Cuando el recurso es escaso, la eficiencia del uso del mismo tiende a disminuir, pero la demanda de este aumenta; y viceversa, cuando el recurso no es limitante, lo que podría provocar diferencias en los crecimientos en estos escenarios (Cárter y Klinka 1990). El primer

caso correspondería al efecto que se crea en las solanas, y en el segundo sería la situación aplicable a las umbrías.

La relación mas marcada con este fenómeno sería con el muérdago amarillo, ya que claramente se nota la presencia de éste en la zona de solana del volcán. Similar a este es el caso del descortezador, mismo que tiene su auge de severidad y presencia en la zona de solana; aunque tambien se reporta en una considerable zona de umbría. Caso contrario es el muérdago negro, ya que tiene una distribución casi uniforme en las laderas del nevado. Esto sugiere que el muérdago amarillo prefiere las zonas con mayor radiación para desarrollarse, aunque estas contengan menores niveles de humedad, y un similar fenómeno para el descortezador.

Para Nevo (2001), existen diferencias morfológicas y fisiológicas en las especies que habitan en laderas opuestas, mismas que les permiten desarrollarse en las condiciones climáticas a las que estan expuestas en cada ladera. Así mismo, Korner (2003) asume que la exposición de las laderas puede generar grandes contrastes en la composición y cobertura de la vegetación, asociados a marcadas diferencias micro climáticas entre las laderas de exposición ecuatorial y polar sujetas a distintos regímenes de radiación solar y sombras permanentes (Rozzi *et al.* 1989; Körner 2003). El viento varía con el relieve e influye directamente en las condiciones micro climáticas que experimentan las plantas de montaña, puesto que afectan la pérdida de calor por convección de la superficie de las hojas y la distribución de las precipitaciones (Körner 2003).

La dirección de los vientos en un año natural también tiene un efecto ecológico, conocido como “efecto Foehn”, sobre la dinámica estudiada (Meteoblue 2019). Estos vientos son fuertes, secos y calientes, ocasionalmente presentes en las laderas de sotavento de las cordilleras. El aire se enfría a barlovento a una razón aproximada de 6 °C por kilómetro y se calienta en su descenso a un ritmo cercano a los 10 °C por kilómetro (IDEAM, 2000). Las tres características principales de este efecto foehn son: mayores precipitaciones y humedad relativa en barlovento que en sotavento, y mayor temperatura y condiciones secas en sotavento que en barlovento (Brinkmann, 1971; Hoinka, 1985). En el Nevado el viento proviene de dos direcciones en particular: de suroeste a noreste, y con mayor intensidad, de noreste a suroeste (Anexo 10).

Tomando en cuenta las diferencias en los climas de barlovento y sotavento en las diferentes épocas del año, se puede inferir que en la zona donde predomina el muérdago amarillo (sur a oeste), es favorecida por las condiciones de sitio que supone el efecto foehn en gran parte del año, aunque esté influenciada por las condiciones menos atractivas de solana. El muérdago negro se distribuye de manera uniforme, así

que se asume poca o nula relación con estos fenómenos. El descortezador muestra un comportamiento similar al muérdago amarillo frente a este fenómeno, pero con una mayor distribución en las zonas con menos influencia en el año en barlovento y sotavento, como es la zona noroeste del volcán.

A futuro se deben analizar otras variables (temperatura, características del suelo, entre otras) e integrarlas con los resultados obtenidos en este estudio. También sería interesante replicar el muestreo en otras montañas y abarcar mayores pisos altitudinales para tener conclusiones que puedan aplicarse con mayor confianza y de manera generalizada a los bosques del volcán Nevado de Toluca.

7. CONCLUSIONES

El muérdago amarillo, aunque no es el más abundante en la zona de estudio, es la plaga que presenta mayor contraste con respecto a la densidad de los rodales en la zona.

Los incendios influyen en los niveles de infestación, ya que su presencia representa un aumento en la presencia y severidad de infestación en los árboles.

La exposición de ladera influye en la presencia y severidad de los agentes causales en cuestión. El muérdago amarillo tiene mayor presencia en la zona sur y oeste del volcán, el muérdago negro en todas las laderas y el descortezador casi en todas, a excepción de la zona noroeste.

8. LITERATURA CITADA

- Astudillo Sánchez, CC. 2016. Variabilidad climática y dinámica poblacional del bosque de alta montaña inferidas con anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* en monte Tláloc, México (en línea). Tesis PhD. UAEM, Toluca, México. 87 p. Consultado 7 ago. 2018. Disponible en <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/65673>
- Billings, RF; Clarke, SR; Espino Mendoza, V; Cordón Cabrera, P; Meléndez Figueroa, B; Campos, JR; Baeza, G. 2004. Bark beetle outbreaks and fire: a devastating combination for Central America's pine forest (en línea). *Unasylva* 217 (55):15-21. Consultado 15 Sep. 2018. Disponible en http://eprints.uberibz.org/1501/1/Billings_etal_2004.pdf
- Billings, R. F. & Espino, V. 2005. El Gorgojo Descortezador del Pino (*Dendroctonus frontalis*) como reconocer, prevenir y controlar plagas, Nicaragua: Texas Forest Service.
- Brinkmann, W. A. 1971. What is a Foehn? *Weather*, 26(6), 230-240.
- Cárter, R.E. y Klinka, K. (1990). Relationship between growing season, soil water-deficit, mineralizable soil nitrogen and site Index in Coastal Douglas Fire. *For. Ecol. Manage.*, 30: 301-311.
- Castellano Bolaños, J. F., Ruiz Martínez, E. O., Gómez Cárdenas, M. & González Cubas, R., 2013a. Fundamentos Técnicos Para el Control de Insectos Descortezadores de Pinos en Oaxaca. Folleto Técnico Núm. 40. Oaxaca: INIFAP.
- Castellano Bolaños, J. F., Ruiz Martínez, E. O., Gómez Cárdenas, M. & González Cubas, R., 2013b. GUÍA METODOLÓGICA PARA COMBATIR PLAGAS DE DESCORTEZADORES DE PINO EN EL SUR DE MÉXICO. Publicación especial Núm. 12. Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etila, Oaxaca, México.: INIFAP.
- Ceballos, G. y otros, 2009. La Diversidad Biológica del Estado de México. Primera ed. Estado de México: Estudio de Estado.
- Cedillo Alonso, M. 2012. Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca (Tesis de Licenciatura). Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Cedillo Alonso, M. 2017. Análisis espacial del nivel de infestación por muérdago enano en el bosque de pino del Área de Protección de Flora Y Fauna Nevado de Toluca. Tesis M.Sc. UAEM, Toluca, Estado de México, México. 125 p.
- Challenger, A; Soberón, J. 2008. Los ecosistemas terrestres. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Eds.), Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad (pp.87–108). México: CONABIO.

- Chávez Campuzano, L. M., 2015. Análisis de la dispersión estacional de *Dendroctonus adjunctus* (blandford) en el Área De Protección De Flora Y Fauna Nevado De Toluca. Tesis M.Sc. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cibrián Tovar, D; Méndez Montiel, JT; Campos Bolaños, R; Yates, HO; Flores Lara, JE. 1995. Insectos Forestales de México. Primera ed. Chapingo, Estado de México: Universidad Autónoma de Chapingo. Consultado 19 jun. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/31740202_Insectos_forestales_de_Mexico_Forest_Insects_of_Mexico_David_Cibrian_Tovar_et_al_pref_de_Manuel_Mondragon_y_Kalb_il_de_Leticia_Arango_Caballero
- CONADEH (Comisionado Nacional de Derechos Humanos). 2016. El gorgojo descortezador del pino y otras graves amenazas ambientales a la vida digna de los hondureños y hondureñas. Plan de acción “Vanguardia de la dignidad” 2014-2020. Tegucigalpa M.D.C. Febrero, 2016. 78 p.
- CONANP. 2016. Programa de manejo, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Consultado 19 jun. 2018. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/programa-de-manejo-del-area?idiom=es>
- Coulson, R. & Witter, J., 1990. Entomología Forestal: ecología y control. México, D.F.: Limusa S.A. de C.V.
- Duran, E. & Poloni, A., 2014. Escarabajos descortezadores: diversidad y saneamiento en bosques de Oaxaca. Biodiversitas, pp. 7-12.
- Endara, A. R. 2007. Estructura forestal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca (tesis de maestría). México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Endara, A. R. 2010. Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 100 p.
- Endara Agramont, AR; Franco MS; Nava Bernal, G; Valdez Hernández, JI; Fredericksen, TS. 2012a. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research* 23(1): 39-44
- Endara Agramont, AR; Nava Bernal, G; Franco Maass, S; Espinoza Maya, A; Ordóñez Díaz, JAB; Mallén Rivera, C. 2012b. Extracción de madera en el Parque Nacional Nevado de Toluca (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(11): 81-90. Consultado 6 ago. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n11/v3n11a7.pdf>
- Endara Agramont, A. R., Mora Santacruz, A. & Valdez Hernández, J. I., 2012c. Bosques y Árboles del Trópico Mexicano: Estructura, Crecimiento y Usos. Guadalajara, Jalisco: Prometeo.
- Endara, A. A. R., Calderón, C. R., Nava, B. G., Franco, M. S. 2013. Analysis of Fragmentation Processes in High-Mountain Forests of the Centre of Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, 4: 697-704.

- Endara Agramont, AR; Herrera Tapia, F. 2015. Deterioro y conservación de los bosques del Nevado de Toluca y el rol de los actores locales (en línea). CIENCIA Ergo-Sum (2016) 23(3):247-254. Consultado 8 ago. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10448076006>
- Flores M., G., J. Jiménez L., X. Madrigal S., F. Moncayo R. y F. Takaki T. 1971. Memoria del mapa de tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D. F. 59 pp.
- Fonseca González, J., 2007. Ocurrencia de insectos descortezadores en bosques dañados por incendios. Tesis para obtener el grado de Doctora en Ciencias. Montecillo, Texcoco, Estado de México: Colegio de Postgraduados.
- Franco, M. S., Regil, G. H. H. y Ordoñez, D.J. A. B. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Madera y Bosques, 12(1): 17-28.
- Franco, M. S., Burrola, A. C. (2009). Los hongos comestibles del parque nacional Nevado de Toluca. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR).
- Franco, M.S., Endara, A.A.R., Nava, BE.G. (2010). Estudio fitosanitario forestal del parque nacional Nevado de Toluca. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR).
- Hawksworth, FG. 1978. A comparative distribution of two mistletoes: *Arceuthobium divaricatum* and *Phoradendron juniperinum*. Symposium on dwarf mistletoe control through forest management. Berkeley, California. Forest Service. EDA. 62 pp.
- Hawksworth, FG. 1985. Observations on dwarf mistletoe on Himalayan Blue Pine in Pakistan. The Golden Bough. 7:1-2.
- Hawksworth, FG; Wiens, D. 1996. Dwarf Mistletoes: Biology, Pathology, and Systematics. United States Department of Agriculture. Forest Service. 410 p. Consultado 19 ene. 2017. Disponible en https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_1996_hawksworth_f001.pdf
- Hernández García, MA; Granados Sánchez, D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan Y el impacto ecológico-social de su deterioro (en línea). Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 12(2): 101-109. Consultado 23 Sep. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/629/62912203.pdf>
- Hoinka, K. (1985). What is a Foehn clearance? Bulletin of the American Meteorological Society, 66(9), 1123-1132.
- IDEAM. 2000. El Medio Ambiente en Colombia - 2da Edición. (M. y. Instituto de Hidrología, Ed.) Bogotá, Colombia.
- Körner, C. 2003. Alpine Plant Life, Second Edition. Springer, Berlin. 344 pp.
- Körner, C. 2004. Mountain Biodiversity, Its Causes and Function. Ambio 13: 11-17.

- López Gómez, V; Zedillo Avelleyra, P; Anaya Hong, S; González Lozada, E; Cano Santana, Z. (2012). Efecto de la orientación de la ladera sobre la estructura poblacional y eco morfología de *neobuxbaumia tetetzo* (cactaceae). *Botanical Sciences* 90 (4): 453-457.
- Méndez, M; Rozzi, R; Cavieres, L. (2013). Flora vascular y musgos en la zona altoandina de la Isla Navarino (55°S), Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. *Gayana Bot.* 70(2): 337-343.
- Meteoblue. Clima (modelado) Parque Nacional del Nevado de Toluca. Consultado 5 de sept 2019. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/parque-nacional-del-nevado-de-toluca_m%c3%a9xico_3817585
- Nevo, E. 2001. Evolution of genome–phenome diversity under environmental stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98:6233-6240.
- Perry, JP. Jr. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Portland, USA: Timber Press.
- Ramírez D. J. F, Porcayo C. E. (2010) Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México Bosque, [Fecha de consulta: 1 de junio de 2017]. Disponible en:<<http://oai.redalyc.org/articulo.oa?id=173113300004>> ISSN 0304-8799.
- Rodríguez, OA; Equihua, MA; Cibrián, TJ; Estrada, VEG. 2010. Fluctuación de *Dendroctonus adjunctus* Blandford (Curculionidae: Scolytinae) y sus depredadores atraídos por frontalina + alfa-pineno, en la estación experimental de Zoquiapan Edo. de México. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*, Issue 11, pp. 20-27.
- Rodríguez Trejo, DA. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. (en línea). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2):145-151. Consultado 7 ago. 2018. Disponible en <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Rodriguez-2001.pdf>
- Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp. Consultado 7 ago. 2018. Disponible en https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Salinas Moreno, Y. y otros, 2010. *Atlas de Distribución Geográfica de los Descortezadores del género Dendroctonus* (Curculionidae: Scolytinae) en México, México: CONAFOR.
- Zúñiga Bermúdez, G., González Herrera, M., Fernández Arias, H. & Cisneros Barrios, R., 1994. Estudio de la anatomía e histología del tubo digestivo de *Dendroctonus adjunctus* Blandford (Coleoptera: Scolytidae). *Acta Zoológica mexicana*, Issue 62, pp. 23-35.

ANEXOS

Anexo 1. Estadísticos de la base de datos usada en el ajuste de los modelos.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	SD
NS (arb-0.1ha-1)	6.0000	89.0000	34.7231	19.8273
QMD (cm)	15.1603	58.9588	31.6028	11.9398
Hm (m)	6.6552	24.6364	13.9536	4.8937
NaMa	0.0000	5.3750	0.7012	1.4671
NaMn	0.0000	5.5778	1.2810	1.7812
NaD	0.0000	6.0000	1.5667	1.8971

NS: Número de árboles por parcela, QMD: Diámetro medio cuadrático en centímetros, Hm: altura total en metros, NaMa: Nivel de infestación por muérdago amarillo, NaMn: Nivel de infestación por muérdago negro, NaD: Nivel de infestación por descortezador.

Anexo 2. Prueba de hipótesis marginales.

	Df	LRT.	Pr(>Chi)
INCEND	1	13.926	0.0002
VARIABLES	2	13.248	0.0013
EXPO	1	3.548	0.0596
VARIABLES:EXPO	2	10.042	0.0066

Anexo 3. Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III).

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	132	23.01	<0.0001
INCEND	1	65	5.35	0.0238
Grupo.cols	2	132	6.5	0.002
EXPO	1	65	0.08	0.7779
Grupo.cols: EXPO	2	132	3.87	0.0234

Anexo 4. Efectos fijos de las variables.

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	1.98	0.44	132	4.48	<0.0001
INCENDSI	0.68	0.3	65	2.31	0.0238
Grupo.colsMA	-2.02	0.56	132	-3.59	0.0005
Grupo.colsMN	-0.93	0.59	132	-1.57	0.1177
EXPO	-3.60E-03	2.20E-03	65	-1.62	0.1092
Grupo.colsMA:EXPO	0.01	2.80E-03	132	2.78	0.0063
Grupo.colsMN:EXPO	4.00E-03	3.00E-03	132	1.34	0.1824

Anexo 5. Modelo exponencial con diferentes parametrizaciones

Modelo 1 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \varepsilon_i$

Modelo 2 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_1 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 3 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_2 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 4 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_3 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 5 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_1 NI_{ik} + \gamma_2 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 6 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_1 NI_{ik} + \gamma_3 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 7 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_2 NI_{ik} + \gamma_3 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Modelo 8 $Np_i = \beta_0 e^{(\beta_1 QMD_i)} + \gamma_1 NI_{ik} + \gamma_2 NI_{ik} + \gamma_3 NI_{ik} + \varepsilon_i$

Donde,

Np_i : Número de árboles en el i ésimo sitio

i : Número de parcela (1-63)

k : Niveles de infestación (1-3)

B_0 : Intercepto del modelo # arb cuando el diámetro cuadrático es cero.

B_1 : Pendiente de la línea ajustada.

QMD: Diámetro medio cuadrático.

Y₁NI: Efecto del muérdago amarillo

Y₂NI: Efecto del muérdago negro

Y₃NI: Efecto del descortezador

ε_i : Error

Anexo 6. Estadísticos de ajuste de los modelos probados.

Modelo	RMSE	R ²	AIC	LogLik	S
M1	13.7013	0.5225	512.5577	-253.2789	0.1703
M2	12.6537	0.5927	504.535	-248.2675	0.2063
M3	13.5954	0.5298	513.5803	-252.7902	0.1412
M4	13.2655	0.5524	510.4851	-251.2426	0.1000
M5	12.4492	0.6058	504.482	-247.241	0.1662
M6	12.4623	0.6049	504.6149	-247.3074	0.1539
M7	13.2274	0.5549	512.1221	-251.061	0.0895
M8	12.333	0.6131	505.3003	-246.6501	0.1343

RMSE: Raíz del cuadrado medio del error.

R²: Medida de ajuste del modelo.

AIC: Criterio de información de Akaike.

LogLik: Logaritmo de verosimilitud.

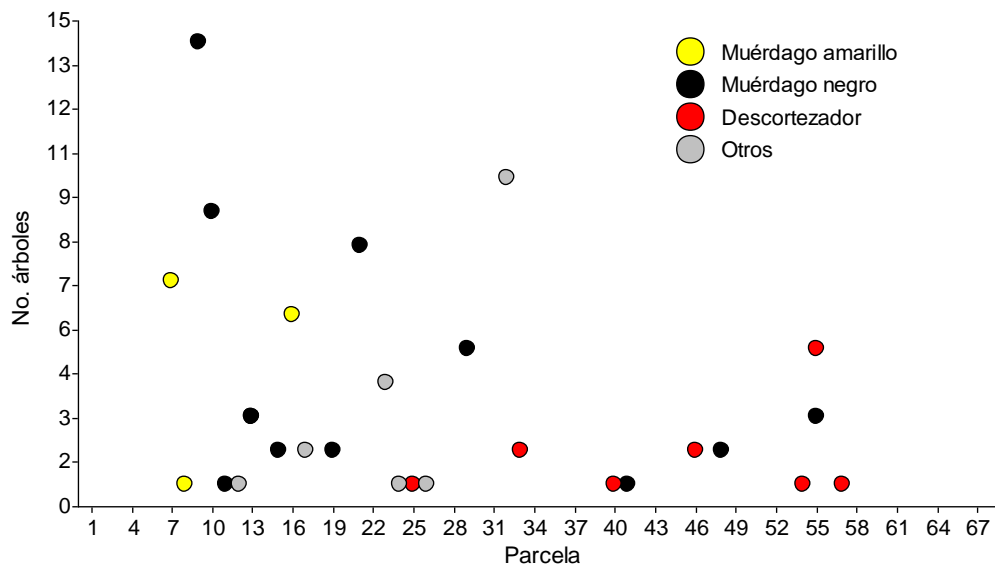
S: Sesgo.

Anexo 7. Estadísticos de ajuste en la prueba de modelos de densidad-infestación.

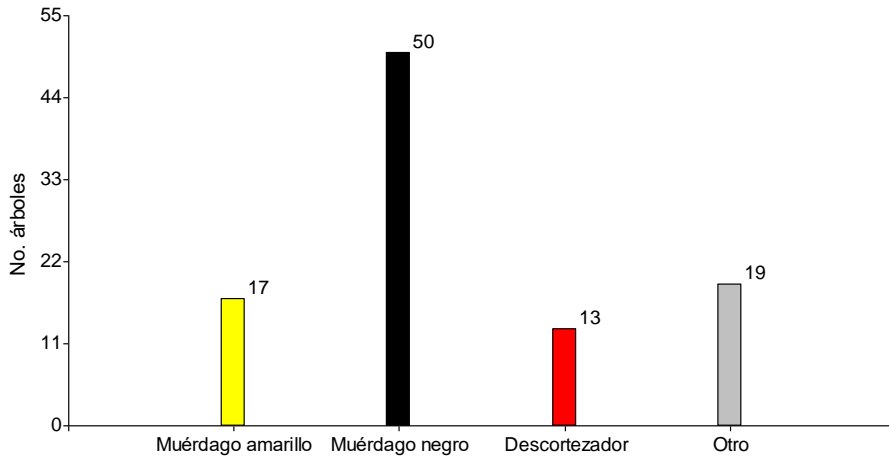
Modelo	Parámetro	Estimador	EE	Valor t	Pr(> t)
M1	β_0	117.05844	17.92776	6.52900	<0.0001
	β_1	-0.04282	0.00624	-6.85900	<0.00001
M2	β_0	139.579726	19.940618	7	<0.00001
	β_1	-0.046588	0.005654	-8.24	<0.0001
	γ_1	-3.636599	1.12957	-3.219	0.0020
M3	β_0	117.662327	17.296795	6.803	<0.00001

	β_1	-0.041558	0.006062	-6.855	<0.00001
	γ_2	-0.956272	0.986264	-0.97	0.336
M4	β_0	110.83728	15.21384	7.28500	<0.00001
	β_1	-0.03776	0.00580	-6.51000	<0.00001
	γ_3	-1.83730	0.91367	-2.01100	0.04880
	β_0	140.704578	18.9313	7.432	<0.00001
M5	β_1	-0.044943	0.005369	-8.37	<0.00001
	γ_1	-3.801882	1.127047	-3.373	0.00132
	γ_2	-1.283045	0.916832	-1.399	0.16692
	β_0	131.455157	18.449674	7.125	<0.00001
M6	β_1	-0.042686	0.005827	-7.326	<0.00001
	γ_1	-3.245804	1.156328	-2.807	0.00677
	γ_3	-1.217455	0.894925	-1.36	0.17888
	β_0	111.87549	15.274048	7.325	<0.00001
M7	β_1	-0.037479	0.005734	-6.536	<0.00001
	γ_2	-0.577778	0.989323	-0.584	0.5614
	γ_3	-1.720939	0.940167	-1.83	0.0722
	β_0	134.36062	18.40402	7.301	<0.00001
M8	β_1	-0.04231	0.00562	-7.528	<0.00001
	γ_1	-3.46105	1.17052	-2.957	0.00449
	γ_2	-1.04423	0.94417	-1.106	0.2733
	γ_3	-0.96964	0.921	-1.053	0.2968

Anexo 8. Mortalidad por parcela y por tipo de plaga en el área de estudio en APFF Nevado de Toluca.



Anexo 9. Mortalidad por tipo de plaga en el sitio de estudio en APFF Nevado de Toluca.



Anexo 10. Rosa de los vientos para APFF del Nevado de Toluca en el año 2018 (Meteoblue 2019).

