



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

## **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE *Dendroctonus mexicanus* Y *Dendroctonus frontalis* EN MICHOACÁN, MÉXICO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

SIGIFREDO MARTÍNEZ RINCÓN

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: *Distribución espacial de Dendroctonus mexicanus y Dendroctonus frontalis en Michoacán, México bajo escenarios de cambio climático* realizada por el alumno: **Sigifredo Martínez Rincón** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

---

DR. JOSÉ RENÉ VALDEZ LAZALDE

ASESOR

---

DR. HÉCTOR MANUEL DE LOS SANTOS POSADAS

ASESOR

---

DR. GUILLERMO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2020

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE *DENDROCTONUS MEXICANUS* Y *DENDROCTONUS*  
*FRONTALIS* EN MICHOACÁN, MÉXICO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO**

Sigifredo Martínez Rincón, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2020.

**RESUMEN**

En México los insectos descortezadores son el segundo agente de disturbio natural que más daño ocasionan en los bosques de clima templado. En los últimos años los bosques de coníferas de Michoacán, México se han visto fuertemente afectados por ataques de estos insectos. El propósito de esta investigación fue mapear el riesgo actual y futuro de la ocurrencia de infestaciones por *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques de Michoacán. Inicialmente se identificaron los requerimientos ecológicos de los insectos descortezadores de interés mediante revisión de literatura y a través de entrevistas a siete expertos mexicanos en plagas forestales. Posteriormente, se implementó un análisis multicriterio espacial, en el marco de un sistema de información geográfica (SIG) para dar cumplimiento al objetivo propuesto. Los resultados obtenidos indican que los bosques más susceptibles al ataque de estos insectos para el escenario actual y futuro se encuentran sobre la Faja Volcánica Transversal (FVT). Se espera que los mapas de riesgo elaborados en este trabajo, pero sobre todo la metodología definida, auxilien en las actividades encaminadas a mitigar los ataques de insectos descortezadores.

**Palabras clave:** Insectos descortezadores, bosque de coníferas, evaluación multicriterio, matriz de clasificación cruzada, proceso de análisis jerárquico, lógica borrosa.

**SPATIAL DISTRIBUTION OF *DENDROCTONUS MEXICANUS* AND  
*DENDROCTONUS FRONTALIS* IN MICHOACAN, MEXICO UNDER SCENARIOS OF  
CLIMATE CHANGE**

Sigifredo Martínez Rincón, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2020.

**ABSTRACT**

In Mexico, bark beetles are the second natural disturbance agent that causes the most damage in temperate forests. In recent years the coniferous forests of Michoacan, Mexico, have been strongly affected by the attack of these insects. The purpose of this research was to map out the current and future risk of the occurrence of infestations by *D. mexicanus* and *D. frontalis* in the forests of Michoacan. Initially, the ecological requirements of the bark beetles of interest were identified through literature review and interviews with seven Mexican experts in forest pests. Subsequently, a spatial multi-criteria analysis was implemented within the framework of a geographic information system (GIS) to fulfill the proposed objective. The obtained results indicate that the forests most susceptible to attack by these insects, for the current and future scenario, are located on the Transversal Volcanic Belt (FVT). It is expected that the risk maps elaborated in this work, but especially the defined methodology, will help in the activities performed toward the mitigation of bark beetle attacks.

**Key words:** Bark beetles, coniferous forest, multi-criteria evaluation, cross-classification matrix, analytic hierarchy process, fuzzy logic.

## DEDICATORIAS

*A mis padres por tanto amor recibido.*

*Especialmente a mi compañera de vida por el apoyo incondicional para continuar con mi formación. A pesar de las pruebas en el camino, hemos llegado al final de una meta más de muchas que vendrán.*

*A mis hijas Regina y Victoria Isabela, porque con su alegría y amor a la vida, le dan luz y sentido a la mía.*

*A los amigos que me han acompañado en esta valiosa aventura de la vida.*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, bendecir siempre mi camino y permitirme llegar al final de este proyecto en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para seguir con mi formación.

Al Colegio de Postgraduados y particularmente a todo el personal del Postgrado en Ciencias Forestales por las enseñanzas, experiencias y conocimiento brindado durante mis estudios de postgrado.

Al Dr. José René Valdez Lazalde, por su gran calidez humana, paciencia, ideas, opiniones y conocimientos compartidos para poder llegar al final de este trabajo.

Al Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas, gracias por los conocimientos compartidos y sus comentarios acertados en las reuniones de consejo para mejorar esta investigación.

Al Dr. Guillermo Sánchez Martínez, por sus opiniones, consejos y el tiempo brindado durante la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Enrique Buendía Rodríguez por el espacio y las sugerencias para realizar esta investigación.

A los ingenieros. H. Jesús Muñoz Flores y J. Trinidad Sáenz Reyes por los consejos y el espacio brindado para la redacción de este manuscrito.

Al Ing. Jaime Talavera Pérez, y a la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) por los datos proporcionados para llevar a cabo esta investigación.

Al Ing. Eduardo Cruz Castañeda e Ing. Javier González Rodríguez, y a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por los registros de incendios forestales proporcionados para el desarrollo de la metodología propuesta.

Al M.C. Abel Plascencia González y M.C. Honoria Chávez González, y a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por los registros de insectos descortezadores proporcionados para el desarrollo de la metodología propuesta.

Al despacho forestal Servicios de Ingeniería en Manejo de Recursos Naturales y Medio Ambiente S. C. por el espacio brindado para terminar con la redacción de la tesis.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DEDICATORIAS .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
CONTENIDO.....	vii
LISTA DE CUADROS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
OBJETIVOS .....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
El cambio climático y su efecto en las infestaciones de insectos descortezador en Norteamérica y Centroamérica .....	3
Infestación por descortezadores en México y el estado de Michoacán .....	3
Riesgo en el contexto de la salud forestal.....	4
Antecedentes de mapas de riesgo aplicados a plagas forestales.....	4
Distribución y características ecológicas de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins y <i>Dendroctonus frontalis</i> Zimmermann .....	5
Evaluación multicriterio (EMC).....	6
Toma de decisiones multicriterio.....	6
Proceso de análisis jerarquizado (PAJ) .....	7
Matriz de comparación por pares (MCP) .....	8
Cálculo de la consistencia de la matriz (Razón de Consistencia (RC)).....	10
Construcción de un orden de prioridad general .....	11
Funciones de membresía difusa/borrosa .....	12
Análisis de cambios espacio-temporales a partir de matrices de clasificación cruzada y el índice de Kappa.....	14

CAPÍTULO I. MAPEO DE RIESGO ACTUAL Y FUTURO DE INFESTACIONES POR <i>DENDROCTONUS MEXICANUS</i> HOPKINS Y <i>DENDROCTONUS</i> <i>FRONTALIS</i> ZIMMERMANN EN BOSQUES DE MICHOACÁN .....	17
1.1 RESUMEN .....	17
1.2 ABSTRACT .....	19
1.3 INTRODUCCIÓN .....	20
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
1.4.1 Descripción del área de estudio .....	22
1.4.2 Selección y análisis de variables asociadas con la aparición de brotes de insectos descortezadores .....	23
1.4.3 Obtención de bases de datos espaciales .....	26
1.4.4 Estandarización de subcriterios (lógica borrosa) .....	26
1.4.5 Estimación del riesgo de infestación actual y bajo un escenario de cambio climático .....	30
1.4.6 Pseudo-validación del modelo .....	31
1.4.7 Comparativo de la distribución espacial actual y futura del riesgo de infestación.....	31
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
1.5.1 Criterios y subcriterios identificados relevantes para ocurrencia de infestación de insectos descortezadores en bosques de clima templado.....	32
1.5.2 Riesgo de infestación por <i>D. mexicanus</i> y <i>D. frontalis</i> .....	34
1.5.3 Análisis comparativo del riesgo de infestación actual y futuro .....	38
1.6 CONCLUSIONES .....	43
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES .....	45
REFERENCIAS.....	46

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Matriz de comparación por pares (MCP). A1, A2, ... An: son criterios. ....	9
Cuadro 3.2. Escala usada en comparación por pares para ponderar los criterios y subcriterios para <i>D. mexicanus</i> y <i>D. frontalis</i> por expertos mexicanos en plagas forestales (Saaty, 1980).....	10
Cuadro 3.3. Valores de índice aleatorio (IA) (Saaty, 1980). n: números de criterios en la matriz de comparación. ....	11
Cuadro 3.4. Matriz de clasificación cruzada para comparar dos mapas/imágenes en diferentes periodos (Pontius Jr et al., 2004). ....	16
Cuadro 4.1. Escala de Saaty (1980) (matrices de comparación por pares) utilizada por expertos en este estudio para ponderar criterios y subcriterios asociados con la aparición de brotes de <i>Dendroctonus mexicanus</i> y <i>Dendroctonus frontalis</i> . ....	25
Cuadro 4.2. Funciones de membresía para estandarizar los subcriterios de <i>D. mexicanus</i> . ....	28
Cuadro 4.3. Funciones de membresía para estandarizar los criterios de <i>D. frontalis</i> ...	29
Cuadro 4.4. Ponderación de criterios y subcriterios para estimar el riesgo de brotes <i>D. mexicanus</i> y <i>D. frontalis</i> de acuerdo a expertos mexicanos en plagas forestales.....	32
Cuadro 4.5. Matriz de clasificación cruzada (valores en ha) de las clases de riesgo de infestación por <i>D. mexicanus</i> .....	39
Cuadro 4.6. Matriz de clasificación cruzada (valores en ha) de las clases de riesgo de infestación por <i>D. frontalis</i> .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Funciones de membresía difusa mostrando los valores críticos (puntos de inflexión) de una variable indicadora en el eje “x”. .....	14
Figura 4.1. Área de estudio para modelar el riesgo de brotes de <i>Dendroctonus mexicanus</i> y <i>Dendroctonus frontalis</i> en el estado de Michoacán. ....	22
Figura 4.2. Organización jerárquica de los criterios y subcriterios considerados para estimar el riesgo de infestación de bosques templados con <i>D. mexicanus</i> y <i>D. frontalis</i> en el área de estudio. ....	24
Figura 4.3. Proceso de análisis jerárquico (PAJ) para estimar áreas de riesgo de brote de <i>Dendroctonus</i> sp. ....	31
Figura 4.4. Riesgo de infestación por <i>D. mexicanus</i> en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) mapa de riesgo actual (1910-2009) y b) mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039. ....	35
Figura 4.5. Riesgo de infestación por <i>D. frontalis</i> en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) mapa de riesgo actual (1910-2009) y b) mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039). ....	36
Figura 4.6. Comparación de superficie (% de área total) entre categorías del mapa de riesgo actual (1910-2009) y el mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039) para <i>D. mexicanus</i> . ....	39
Figura 4.7. Comparación de superficie (% de área total) entre categorías del mapa de riesgo actual (1910-2009) y mapa de riesgo con trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039) para <i>D. frontalis</i> . ....	41

Figura 4.8. Número de píxeles por clase de precipitación total anual y temperatura  
media anual en el área de estudio. .... 42

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Los insectos descortezadores son agentes de disturbios naturales que asumen un papel importante en la dinámica de los bosques (Dhar, Parrott, & Heckbert, 2018). Recientemente se han visto potenciados por el cambio climático (del-Val & Sáenz-Romero, 2017) afectando millones de hectáreas de bosque a nivel mundial y regional, e.g., afectaciones en Norteamérica (Dhar et al., 2018; United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service, 2018) y Centroamérica (Billings et al., 2004).

En la República Mexicana estos insectos se consideran la segunda causa de disturbio en los bosques de coníferas (López, Torres, Reséndiz, Sánchez, & Gijón, 2017) causando daño en miles de hectáreas a nivel nacional (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2017).

El cambio climático esperado para las próximas décadas podría tener efectos indeseados en algunos ecosistemas naturales. Por ello es necesario analizar escenarios futuros que den pauta para amortiguar sus efectos mediante la implementación de acciones de adaptación efectiva (Edenhofer et al., 2014). Actualmente causa gran interés el aumento potencial en la mortalidad de los árboles debido a estrés fisiológico y a interacciones con otros procesos provocados por el clima, los incendios forestales y brotes de insectos descortezadores (Allen et al., 2010).

Considerando lo anterior, esta investigación tuvo como propósito implementar una metodología transparente para generar mapas de riesgo de infestación de bosques templados por *D. mexicanus* Hopkins y *D. frontalis* Zimmermann a través de la aplicación combinada de las técnicas evaluación multicriterio espacial (MCE), proceso de análisis jerarquizado (PAJ, AHP por sus siglas en inglés) y lógica borrosa (Krist Jr et al., 2007, 2010). Los mapas generados podrían ayudar a administradores forestales y a encargados de gestionar políticas de monitoreo de riesgos a minimizar la mortalidad de árboles como resultado de una infestación (Robertson, Wulder, Nelson, & White, 2008; Krist Jr et al., 2010; Fragnière, Forster, Hölling, Wermelinger, & Bacher, 2018).

La esencia del trabajo se reporta de manera sintética en formato de artículo científico en el Capítulo I. Previamente, se precisan los objetivos de la tesis y se presenta una revisión de los elementos metodológicos que se incorporaron al proceso de modelado espacial. Además se muestran las conclusiones generales de la tesis y, finalmente, la lista de la literatura revisada durante el desarrollo del trabajo.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Modelar la distribución espacial del riesgo de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* (insectos descortezadores) en los bosques templados del estado de Michoacán.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las áreas más susceptibles al ataque de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques de coníferas del estado de Michoacán.
- Crear mapas de riesgo actual y futuro de infestación de los bosques de coníferas del estado de Michoacán por *D. mexicanus* y *D. frontalis*.
- Realizar un análisis comparativo de la distribución espacial actual del riesgo de infestación por *D. mexicanus* y *D. frontalis* versus el riesgo de infestación de los mismos insectos descortezadores bajo un escenario de cambio climático.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **El cambio climático y su efecto en las infestaciones de insectos descortezadores en Norteamérica y Centroamérica**

Los cambios ambientales que está experimentando la Tierra por las acciones antrópicas repercuten en la dinámica de los ecosistemas (del-Val & Sáenz-Romero, 2017). El calentamiento climático pronosticado, se dice, afectará de manera profunda la dinámica poblacional de los insectos descortezadores. El aumento de la temperatura resultará en incrementos en las tasas de desarrollo, generaciones por año, cambios en la idoneidad del hábitat (Waring et al., 2009), en la distribución, en impactos catastróficos, en la supervivencia, y en la reproducción (Dale et al., 2001; Lange, Økland, & Krokene, 2006). Asimismo las sequías severas tendrán efectos negativos en los árboles al debilitar sus defensas y predisponerlos al ataque de insectos descortezadores (Raffa, Grégoire, & Lindgren, 2015).

En las últimas décadas los bosques forestales de Norteamérica y Centroamérica se han visto fuertemente golpeados por los brotes de insectos descortezadores, e.g. Canadá (Dhar et al., 2018), Estados Unidos de Norteamérica (United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service, 2018) y Centroamérica (Billings et al., 2004), por lo que se cree que el cambio climático está propiciando brotes frecuentes y de mayor superficie (Raffa et al., 2015).

### **Infestación por descortezadores en México y el estado de Michoacán**

En México los pronósticos de cambio climático son radicales para los bosques templados y pocos los estudios que fundamentan la distribución espacio-temporal de plagas como los descortezadores, además de la dimensión de los brotes y su posible asociación con el incremento de la temperatura y la precipitación (del-Val & Sáenz-Romero, 2017). Las fuertes sequías presentadas de 2010 a 2012 provocaron la aparición de grandes infestaciones de insectos descortezadores en el norte y centro del país, siendo los estados de Durango y Chihuahua los más afectados con alrededor de 1,000,000 m<sup>3</sup> de madera plagada (Cibrián Tovar, 2014), lo que representa 11.09 % de total de la

producción de madera del país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2017).

En el estado de Michoacán, entre 2013 y 2014 se afectó un volumen aproximado de 200,000 m<sup>3</sup> de madera por ataque de insectos descortezadores; el 41.66% de la producción anual del estado (480,000 m<sup>3</sup> al año), (Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM], 2015a).

Considerando que la producción maderable en México en el 2017 fue alrededor de 9,000,000 m<sup>3</sup> rollo, y que el estado de Michoacán ocupó el cuarto lugar como productor de madera de coníferas en el país y el primero en la producción de resina (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2017) es importante que se conozcan los factores que favorecen el desarrollo de las infestaciones de insectos descortezadores para poder implementar medidas de control (López et al., 2017).

### **Riesgo en el contexto de la salud forestal**

El riesgo que enfrentan los bosques en su salud tiene dos componentes: la susceptibilidad y la vulnerabilidad. El primero se entiende como la probabilidad (en términos estadísticos) de que la masa forestal sea atacada por una plaga forestal y el segundo como la probabilidad que los árboles mueran si llegara a ocurrir un ataque (Mott, 1963). Krist Jr et al. (2010) definieron el riesgo como el potencial de que ocurra un ataque en el bosque debido a la exposición de una plaga forestal. Ambas publicaciones emplearon la susceptibilidad como el potencial de que pudiera darse una infestación de plaga forestal y la vulnerabilidad como potencial de que los árboles mueran en un determinado tiempo si se diera la infestación. El riesgo de infestación por insectos descortezadores está determinado por los cambios que se puedan presentar en el bosque y por la fluctuación existente de estos insectos (Hicks Jr, Coster, & Mason, 1987).

### **Antecedentes de mapas de riesgo aplicados a plagas forestales**

En 2006 se creó en Estados Unidos de América el Mapa Nacional de Riesgo de Insectos y Enfermedades (NIDRM por sus siglas en inglés) conjuntando herramientas de evaluación multicriterio (EMC) y de sistemas de información geográfica (SIG). En el

proceso se combinaron métodos como la lógica borrosa, las comparaciones pareadas, y la suma lineal ponderada. La idea fundamental atrás del mapa de riesgo fue proveer una herramienta de apoyo a la gestión de la salud de los bosques, particularmente para la evaluación continua del riesgo de muerte de arbolado a causa de insectos u otros patógenos (Krist Jr et al., 2007, 2010).

Recientemente, en Columbia Británica, Canadá, se estimó el riesgo a corto plazo de infestación de descortezadores en las zonas boscosas con base al comportamiento espacio temporal de los insectos (Bone, Wulder, White, Robertson, & Nelson, 2013); además, se construyó un modelo de riesgo climático y un mapa que ayuda a predecir los impactos que puede ocasionar un insecto exótico que amenaza especies de *Abies* en toda América del Norte (Hrinkevich, Progar, & Shaw, 2016).

En México, recientemente ha habido intentos por implementar modelos de predicción de riesgo basados en análisis multicriterio, para prevenir y reducir la posible introducción de dos especies de plagas exóticas forestales *Sirex noctilio* Fabricius y *Anoplophora glabripennis* Motschulsky (Reygadas, 2016).

### **Distribución y características ecológicas de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann**

Ambas especies de insectos descortezadores poseen amplia distribución en todo el país. *D. mexicanus* tiene preferencia por las características climáticas que se presentan en el centro y el occidente de la Faja Volcánica Transversal (FVT) entre el Estado de México y Jalisco, así como en una fracción de la Sierra Madre Occidental (SMOC) que corresponde al estado de Durango (Salinas-Moreno et al., 2010). Se encuentra desde los 800 a 3,400 m.s.n.m. (Salinas-Moreno et al., 2004; Armendáriz-Toledano, Zuñiga, García-Roman, Valerio-Mendoza, & García-Navarrete, 2018; Pinzón, Cuéllar-Rodríguez, E., & González-Tagle, 2018). Por otra parte, *D. frontalis* tiene mayor presencia en la FVT, las zonas forestales del estado de Oaxaca en la Sierra Madre del Sur (SMS) y en la Sierra de Chiapas (SCH) (Salinas-Moreno et al., 2010). Se presenta en el rango de 311 a 2,612 m.s.n.m. (Armendáriz-Toledano et al., 2018). Ambas especies tienen desarrollo óptimo con temperaturas ascendentes (Raffa et al., 2015; del-Val & Sáenz-Romero,

2017; Morales-Rangel et al., 2018), sequias severas que aumentan el estrés hídrico de los árboles y comprometen sus defensas naturales (Mattson & Haack, 1987; Fettig et al., 2007; Raffa et al., 2015), así como densidades altas en rodales relativamente homogéneos y maduros (Negrón, Anhold, & Munson, 2001; Shore, Safranyik, & Whitehead, 2006; Krist Jr. et al., 2007; Raffa et al., 2015).

### **Evaluación multicriterio (EMC)**

La EMC es un enfoque de construcción y análisis de alternativas de decisión relativamente nuevo, se ha desarrollado durante los últimos 40 años con el fin de facilitar la toma de decisiones y dar soluciones a diferentes problemas (Recchia et al., 2011). En el desarrollo de la EMC no se tiene una solución que mejore todos los criterios en un mismo período, por lo tanto al tomar la decisión se debe tener claro cómo abordar una solución compromiso, además, la unión de preferencias e indiferencias no bastan, ya que un acontecimiento cuando es mejor que otro para un criterio, normalmente es malo para otro (Munda, 2012).

### **Toma de decisiones multicriterio**

La decisión multicriterio puede formularse para uno o más objetivos, que pueden ser simples o múltiples y de los cuales se pueden formar mezclas razonables entre objetivos y criterios que podrían cumplirse al momento de hacer una evaluación (Gómez & Barredo, 2005). El objetivo es considerado el nivel más general dentro de la evaluación ya que es el resultado de la toma de decisiones, el criterio es una representación genérica que contiene los objetivos y atributos, siendo este último una propiedad compuesta por elementos de un sistema del mundo real. En la realidad los problemas de decisión normalmente involucran objetivos y atributos, los cuales regularmente se relacionan entre sí, es decir, los objetivos se logran a través de la aportación de uno o más atributos (Malczewski, 1999).

Cuando se tiene definido el objetivo y el área de estudio es necesario buscar los criterios (factores y limitantes) que se van a considerar en el problema de decisión (Gómez & Barredo, 2005).

De acuerdo Malczewski (1999) es recomendable que el conjunto de criterios sean:

- Completos: Es decir que abarquen todos los factores del problema de decisión.
- Operacional: Tienen que ser notables para la evaluación del problema.
- Divisibles: Deben simplificarse hasta alcanzar la parte más pequeña con el propósito de facilitar el proceso.
- No redundantes: Evitar correlación entre ellos.
- De número mínimo: Tratar de utilizar el menor número de criterios.

En el problema de decisión lo ideal es cubrir todas las condiciones y criterios necesarios, sin embargo, a pesar que esto se logra con cierta facilidad en la teoría al involucrar todos los factores que deberían estar en el análisis, en el entendiendo que entre más participen mejor será el análisis, en la práctica su inclusión dependerá del problema planteado, de si los criterios están disponibles y si se tiene acceso a ellos (Gómez & Barredo, 2005).

Al intentar resolver un problema de decisión bajo el enfoque de EMC se deben considerar las recomendaciones siguientes (Gómez & Barredo, 2005):

- Definir y formular la estructura del problema: se forma a partir de un estado actual y uno deseado.
- Definir las alternativas posibles e identificar los criterios que se van a evaluar: se piensa en las alternativas que lleven a solucionar el problema de decisión y se crean los criterios que ayuden a analizar las alternativas.
- Evaluar las alternativas: se valora el nivel de impacto que tuvo cada alternativa.
- Clasificar las alternativas: se definen de la más deseable a la peor para hacer una clasificación final.
- Análisis de sensibilidad: es recomendable hacer una comprobación mediante modificaciones a los elementos del modelo y ver cuánto afectan el resultado final.

### **Proceso de análisis jerarquizado (PAJ)**

El PAJ es un enfoque de análisis estructurado de problemas. Fue desarrollado por Thomas L. Saaty y es usado para facilitar la toma de decisiones de problemas complejos

con base en el análisis simultáneo de múltiples criterios (Saaty, 1980). La esencia del proceso consta de tres elementos (Malczewski, 1999):

1. Jerarquiza el problema complejo a una manera simple en la que se pueden percibir los criterios/elementos relevantes.
2. Pondera (otorga un peso) la importancia de cada criterio/elemento a través del procedimiento de comparación por pares, incorporando el cálculo de un valor de consistencia para evaluar la validez de las comparaciones.
3. Sintetiza la evaluación del problema mediante la combinación de los elementos antes mencionados (puntos 1 y 2) en cada nivel de la jerarquía y mediante la agregación de resultados parciales para obtener valores asociados a cada alternativa de solución al problema.

La prioridad del PAJ es descomponer un problema de decisión en una jerarquía, priorizando los criterios/elementos de mayor importancia en el problema. Esta se construye de lo general a lo específico para adquirir un nivel de atributos, siendo con éstos con los que se evalúan los últimos niveles de la jerarquía (Cuadro 4.2) formando la composición de la estructura en cuatro niveles: meta, objetivos/criterios, atributos/subcriterios y alternativas/clasificación de riesgo. El nivel más alto de la jerarquía será el objetivo al que se quiere llegar. En un ambiente de análisis multicriterio espacial, el nivel de alternativas se representa como una combinación de capas y base de datos definidas en un SIG con valores de atributos/criterios o subcriterios ligados a los elementos del nivel superior, siendo el criterio/subcriterio el que relaciona el PAJ con los procedimientos de los SIG (Malczewski, 1999).

### **Matriz de comparación por pares (MCP)**

La MCP es un elemento relevante en el PAJ, al igual que en otros enfoques de análisis de problemas y toma de decisiones multicriterio. Es una alternativa metodológica para asignar un peso (ponderar) a cada criterio identificado como relevante al problema bajo análisis. Una ponderación se puede especificar como un valor asignado a un criterio de evaluación que muestra su importancia en relación con otros criterios. Lo más sencillo es evaluar la importancia de los criterios y organizarlos de manera que tengan orden de

rango, por ejemplo, cada criterio de evaluación se puede clasificar en orden de preferencia del tomador de decisiones (Malczewski, 1999).

El Cuadro 3.1 muestra una MCP, para ilustrar el proceso de comparar cuatro criterios ( $A_i$ ) entre sí utilizando la escala de valores propuesta por Saaty (1980), Cuadro 3.2.

Cuadro 3.1. Matriz de comparación por pares (MCP).  $A_1, A_2, \dots, A_n$ : son criterios.

	A1	A2	A3	An
A1	<b>1</b>	5	6	7
A2	1/5	<b>1</b>	4	6
A3	1/6	1/4	<b>1</b>	4
An	1/7	1/6	1/4	<b>1</b>

La MCP (Cuadro 3.1) cuenta con dieciséis espacios para realizar las comparaciones de pares de criterios, cuatro implican comparaciones del mismo criterio, *i.e.* los correspondientes a la diagonal ( $A_1, A_1$ ), ( $A_2, A_2$ ), ( $A_3, A_3$ ), ( $A_n, A_n$ ), y se les da el valor de 1. De los doce restantes, seis se usan para presentar el valor de importancia relativo de un criterio sobre otro (celdas en color gris); los otros seis son comparaciones inversas y deben ser recíprocos de los primeros seis, aunque ingresar el recíproco no es obligatorio, pero generalmente se recomienda hacerlo (Saaty, 1980).

Una vez llena la matriz, debe resolverse para estimar los pesos de cada uno de los criterios bajo comparación. Lo anterior puede realizarse mediante el módulo WEIGHT del software TerrSet® (Eastman, 2016).

Cuadro 3.2. Escala usada en comparación por pares para ponderar los criterios y subcriterios para *D. mexicanus* y *D. frontalis* por expertos mexicanos en plagas forestales (Saaty, 1980).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos criterios/actividades contribuyen igualmente a lograr el objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y los juicios favorecen levemente un criterio sobre otro
5	Fuerte importancia	La experiencia y los juicios favorecen fuertemente un criterio sobre otro
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Un criterio es mucho más favorecido sobre otro y la dominancia es demostrada en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre otro es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio
Recíproco distinto a 0	Si se asigna $a_{ij}$ al comparar la actividad $i$ con la $j$ , entonces se asigna $a_{ji} = 1/a_{ij}$ al comparar la $j$ con la $i$	Supuesto razonable

### Cálculo de la consistencia de la matriz (Razón de Consistencia (RC))

Tomando en cuenta que los tomadores de decisiones pueden incurrir en inconsistencias cuando hacen las ponderaciones en la MCP, Saaty (1980) desarrolló una medida cuantitativa para su estimación: la Razón de Consistencia (RC) de la matriz. La RC es función de un índice de consistencia (IC) calculado para la matriz de comparaciones de pares de criterios y un índice aleatorio (IA) que resulta de estimar de forma aleatoria un promedio de matrices relacionadas y positivas del IC. La comparación realizada por los tomadores de decisiones es aceptable cuando el valor de la RC es  $<0.10$ , se rechaza de

otra manera, considerándose que la MCP es inconsistente y debe corregirse (Malczewski, 1999).

Las fórmulas para el cálculo de la RC son (Malczewski, 1999):

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Donde IC es el resultado de estimar una matriz por pares generada aleatoriamente y el IA es el valor de números de criterios que se compararan en la matriz por pares (Cuadro 3).

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación (3.2)}$$

Donde  $\lambda$  es igual o mayor que  $n$  en matrices recíprocas positivas e iguales en una matriz consistente. Por lo tanto,  $\lambda - n$  se considera el grado de inconsistencia.

El IA se creó del IC de una matriz recíproca generada aleatoriamente con una escala de 1 a 9 con recíprocos forzados. En el Cuadro 3.3 se observa en la primera fila el orden de la matriz y en la segunda el IA calculado (Saaty, 1980).

Cuadro 3.3. Valores de índice aleatorio (IA) (Saaty, 1980). n: números de criterios en la matriz de comparación.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IA	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

### Construcción de un orden de prioridad general

Este proceso es la última etapa del PAJ en la que se adicionan los pesos relativos de los niveles que se adquirieron de la segunda etapa para producir pesos compuestos. Lo anterior se obtiene a través de una serie de multiplicaciones de las matrices de pesos relativos con cada nivel de jerarquía. La continuidad de las multiplicaciones se realiza con los pesos relativos de la matriz del segundo nivel por la del tercer nivel y el resultado de estas por el siguiente nivel más bajo. El proceso continúa hasta que se multiplican todos los niveles juntos desde el segundo hasta el nivel inferior formando un vector de

pesos compuestos, el cual tiene una dimensión de 1 por m (m es el número de alternativas de decisión en el nivel inferior de la jerarquía). Estos pesos son los valores efectivos de cada alternativa para lograr llegar al objetivo propuesto. El resultado general R, de la *i*-ésima alternativa representa la suma total de los valores para cada nivel y de acuerdo a Malczewski (1999) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = \sum_k w_k r_{ik} \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

Donde  $w_k$  es el vector de prioridades asociado con el elemento *k*-ésimo de la estructura jerárquica de los criterios,  $\sum_k w_k = 1$ . El vector de prioridades derivado de comparar las alternativas en cada criterio es  $r_{ik}$ . La alternativa preferida es seleccionada identificando el valor máximo de *R*.

### **Funciones de membresía difusa/borrosa**

La teoría de conjuntos difusos es usada frecuentemente en los SIG para apoyar en el desarrollo de datos geospaciales estandarizados o normalizados, *i.e.*, para la normalización de datos a una escala de valores frecuentemente entre 0 y 1. Su aplicación se concreta mediante la construcción de funciones de membresía difusa o borrosa a partir del conocimiento de expertos y de información que se tiene sobre un tema específico (Bone, Dragicevic, & Roberts, 2005). Esta teoría aparece como lo contrario a la lógica binaria de 0 y 1, verdadero o falso y puede emplearse para representar fenómenos con límites no definidos de manera clara. Parte del supuesto que la realidad no se forma de partículas elementales indivisibles y discretas, sino al contrario, es un continuo de propiedades en diferentes localizaciones (Gómez & Barredo, 2005).

Las funciones de pertenencia difusa pueden representarse con números reales en un intervalo de 0 a 1, lo cual quiere decir que entre más se aproxime este al valor 0 menos pertenencia tendrá al concepto de estudio y, por el contrario, más cerca de 1 mayor será la pertenencia. Esta teoría se representa normalmente en formulas  $\mu$ , en la que un objeto *x* pertenece a un conjunto difuso A,  $\mu(x) \in A$  (Fisher, 2000).

El modelo de importación semántica es la forma más usada de la lógica difusa, en el cual se utiliza el conocimiento de un experto para establecer la pertenencia de un elemento,

objeto, valor, etc. a una clase predefinida, elemento determinado como  $d$ . Normalmente se usan dos métodos para hacerlo; uno de ellos especifica el número de valores pareados (2, 3, o 4 pares) conocidos como números difusos y que puntualizan los puntos de inflexión de la pertenencia que delimita la conversión de memberships de  $\mu = 0$  a  $\mu = 1$  (Figura 3.1). El otro método es a través de una fórmula que relaciona los cambios en  $d$  con la diferenciación continua en  $\mu$  (Fisher, 2000).

En el siguiente ejemplo se ilustra una manera práctica del método del número difuso ilustrado en la Figura 3.1. En la Figura 3.1a,  $(\{d_1, 0\}, \{d_2, 1\})$  muestran una función de conversión, en la cual  $d_1 < d_2$  donde  $d_1$  y  $d_2$  son productos de  $d$  asociados con la función de pertenencia de  $\mu = 0$  a  $\mu = 1$ . En las Figuras 3.1b,  $(\{d_1, 0\}, \{d_2, 1\}, \{d_3, 0\})$  en la cual  $d_1 < d_2 < d_3$  muestran la función de pertenencia de forma triangular, en la Figura 3.1c,  $(\{d_1, 0\}, \{d_2, 1\}, \{d_3, 1\}, \{d_4, 0\})$  siendo  $d_1 < d_2 < d_3 < d_4$  trapezoidal. La Figura 3.1d representa otra manera en la que se indican más números de puntos de inflexión que proporcionan valores de pertenencia en conjunto con diferentes valores de  $d$ , estos pueden ser en aumento o en disminución como se muestra en el siguiente ejemplo, donde el valor  $d$  indica aumentos en forma gradual de 0 a 1 en el valor de  $\mu$ ,  $(\{d_1, 0\}, \{d_2, 0.1\}, \{d_3, 0.2\}, \{d_4, 0.3\}, \{d_5, 0.4\}, \{d_6, 0.5\}, \{d_7, 0.6\}, \{d_8, 0.7\}, \{d_9, 0.8\}, \{d_{10}, 0.9\}, \{d_{11}, 1\})$  (Fisher, 2000).

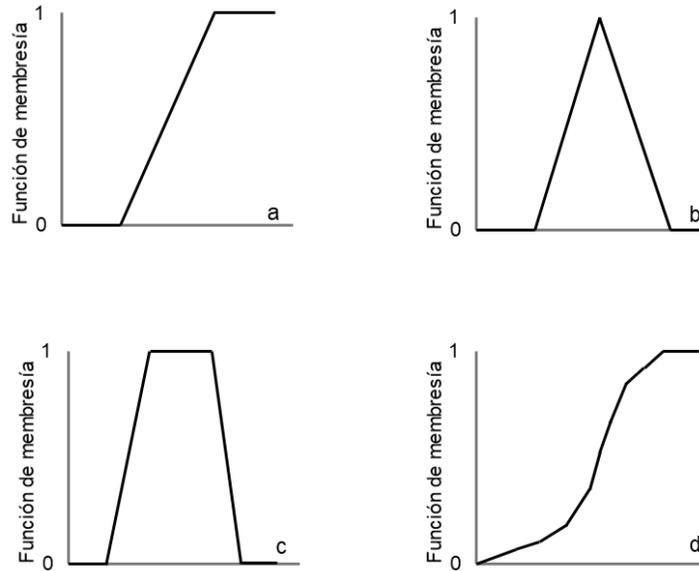


Figura 3.1. Funciones de membresía difusa mostrando los valores críticos (puntos de inflexión) de una variable indicadora en el eje “x”. a) presenta dos valores críticos; b) tres valores; c) cuatro, y d) once. Tomada de Fisher (2000).

Según Fisher (2000), la siguiente ecuación se ha utilizado con frecuencia de diferentes maneras en la literatura geográfica:

$$\mu(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{para } d \leq b_1 \\ \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{d-b_1}{b_2}\right)^2\right)} & \text{para } d > b_1 \end{cases} \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Donde  $\mu(x_{ij})$  es la pertenencia borrosa de un objeto en un conjunto;  $d$  el valor de la propiedad utilizada con la que se puede especificar la función de pertenencia;  $b_1$  es un valor umbral de la propiedad en el límite de cualquier objeto que pertenezca al conjunto; y  $b_2$  es el valor de la propiedad (sobre el valor de  $b_1$ ) propio a la pertenencia difusa = 0.5, también conocido como punto de cruce.

### **Análisis de cambios espacio-temporales a partir de matrices de clasificación cruzada y el índice de Kappa**

Los cambios en las clases o categorías que se representan en mapas o imágenes (ganancias, pérdidas y permanencias) se pueden identificar a través de la construcción

de una matriz de clasificación cruzada como se ilustra en el Cuadro 3.4, en la cual las columnas muestran valores de pertenencia a una clase en el mapa futuro (tiempo 2) y las filas muestran valores de pertenencia a una clase en el mapa actual (tiempo 1).

El símbolo  $P_{ij}$  indica el cambio que surge de la categoría  $i$  a la  $j$  en el cual la cantidad de categorías es  $J$ . La diagonal principal de la matriz registra la fracción de las categorías que permanecieron sin cambio entre el periodo 1 y el periodo 2; de tal modo que  $P_{jj}$  indica la persistencia de la categoría  $j$ . Los valores fuera de la diagonal principal muestran los cambios de la categoría  $i$  a otra diferente,  $j$ . Así mismo, el total de la columna  $P_{i+}$  muestra el porcentaje del cambio en la categoría  $i$  del tiempo 1, siendo esto la suma de  $j$  de  $P_{ij}$ . El total de la fila  $P_{+j}$  indica el porcentaje del cambio en la categoría  $j$  del tiempo 2, siendo esto la suma de  $i$  de  $P_{ij}$  (Pontius Jr, Shusas, & Mceachern, 2004). Las ganancias y pérdidas del periodo 1 al periodo 2, para cada categoría se estiman como sigue (Pontius Jr et al., 2004):

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj} \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

Donde:

$G_{ij}$  = Es la ganancia en el tiempo 2

$P_{+j}$  = Representa los valores del tiempo 2

$P_{jj}$  = Valores en la diagonal principal

$$L_{ij} = P_j - P_{jj} \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Donde:

$L_{ij}$  = Es la pérdida en el tiempo 1

$P_j$  = Representa los valores del tiempo 1

$P_{jj}$  = Valores de la diagonal principal

Cuadro 3.4. Matriz de clasificación cruzada para comparar dos mapas/imágenes en diferentes periodos (Pontius Jr et al., 2004).

Tiempo 1	Tiempo 2				Total tiempo 1	Pérdidas (L)
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
Categoría 1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{1+}$	$P_{1+} - P_{11}$
Categoría 2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{2+}$	$P_{2+} - P_{22}$
Categoría 3	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$P_{3+}$	$P_{3+} - P_{33}$
Categoría 4	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	$P_{4+}$	$P_{4+} - P_{44}$
Total tiempo 2	$P_{+1}$	$P_{+2}$	$P_{+3}$	$P_{+4}$	1	
Ganancias (G)	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$		

El índice de concordancia Kappa ( $K_i$ ) adquiere valores de -1 a 1 para mostrar el grado de coincidencia entre dos mapas/imágenes. Un valor cercano a 1 indica que los mapas/imágenes han permanecido sin cambio. Por el contrario, un valor cercano a -1 supone cambios drásticos entre los mapas/imágenes. Cuando  $K_i$  adquiere un valor de cero se considera que los cambios son al azar. Según Martínez, Martín y Román (2000), el índice de Kappa se define como:

$$K_i = (P_{ii} - P_i \cdot P_{.i}) / (P_i - P_i \cdot P_{.i}) \quad \text{Ecuación (3.7)}$$

Donde:

$P_{ii}$  = Representa la proporción del mapa/imagen donde la categoría  $i$  concuerda en ambas fechas.

$P_i$  = Proporción de la categoría  $i$  en el mapa/imagen de referencia.

$P_{.i}$  = Proporción de la categoría  $i$  en el mapa/imagen de no referencia.

# CAPÍTULO I. MAPEO DE RIESGO ACTUAL Y FUTURO DE INFESTACIONES POR *DENDROCTONUS MEXICANUS* HOPKINS Y *DENDROCTONUS FRONTALIS* ZIMMERMANN EN BOSQUES DE MICHOACÁN

## Highlights

- Identificar áreas susceptibles a *Dendroctonus* spp. Ayuda a prevenir brotes de estos insectos.
- El clima futuro podría modificar la distribución e intensidad de brotes de *Dendroctonus* spp.
- El monitoreo sistemático de áreas forestales ayuda a minimizar la mortalidad de árboles.
- Se propone un método para estimar el riesgo de infestación por insectos descortezadores de pino.

## 1.1 RESUMEN

**Introducción:** Norteamérica y Centroamérica se reportan fuertes infestaciones de bosques por *Dendroctonus* spp. En México, *Dendroctonus frontalis* y *Dendroctonus mexicanus* son una plaga perjudicial, y común en el estado de Michoacán.

**Objetivo:** Modelar la distribución espacial, actual y futura, del riesgo de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques del estado de Michoacán.

**Materiales y métodos:** Se conjuntaron técnicas de evaluación multicriterio espacial, el proceso de análisis jerárquico y funciones de membresía borrosa, con variables climáticas, topográficas, registros de incendios forestales y datos del inventario nacional forestal y de suelos de México, para implementar un modelo espacial que estima el riesgo de infestación de bosques por *D. mexicanus* y *D. frontalis* bajo dos escenarios de condiciones climáticas, uno actual y uno futuro.

**Resultados y discusión:** Se registró un valor máximo de riesgo para *D. mexicanus* de 0.78 para el escenario actual, y 0.83 para el escenario futuro; para *D. frontalis* estos valores corresponden a 0.84 y 0.85 respectivamente. Ambas especies reportan mayor riesgo de infestación sobre la Faja Volcánica Transversal. El riesgo alto de infestación por *D. mexicanus* incrementará de 3.9 a 5 % en el futuro, mientras que el riesgo muy alto

permanecerá en 0.3 %. Para *D. frontalis* el riesgo alto será de 10.8 % para el escenario actual y 9.6 % para el escenario futuro, el muy alto continuará en 0.4 %.

**Conclusiones:** En el escenario actual y futuro la Faja Volcánica Transversal presenta más riesgo de infestación para las dos especies bajo análisis, así como riesgo muy alto al noreste del estado de Michoacán.

**Palabras clave:** Bosque templado; Cambio climático; Insectos descortezadores; Proceso de análisis jerárquico; Modelado espacial; Michoacán.

**RISK MAPPING FOR CURRENT AND FUTURE INFESTATIONS BY  
*DENDROCTONUS MEXICANUS* HOPKINS AND *DENDROCTONUS FRONTALIS*  
ZIMMERMANN IN FORESTS OF MICHOACÁN**

**1.2 ABSTRACT**

**Introduction:** In North and Central America heavy forest infestations by *Dendroctonus* spp. had been reported. In Mexico, *Dendroctonus frontalis* and *Dendroctonus mexicanus* are a harmful pest, and common in the state of Michoacan.

**Objective:** To model the spatial distribution, current and future, of the risk of outbreaks of *D. mexicanus* and *D. frontalis* in the forests of the state of Michoacan.

**Materials and methods:** Spatial multicriteria analysis, analytic hierarchy process, and fuzzy membership techniques were combined with climatic and topographic variables, forest fire records, and data from the national forest and soil inventory of Mexico, to implement a spatial model that estimates risk of forest infestation by *D. mexicanus* and *D. frontalis* under two scenarios of climatic conditions, one current and one future.

**Results and discussion:** A maximum risk value for *D. mexicanus* of 0.78 was registered for the current scenario, and 0.83 for the future scenario; for *D. frontalis* these values correspond to 0.84 and 0.85 respectively. Both species report a higher risk of infestation on the Transversal Volcanic Belt. The high risk of infestation by *D. mexicanus* will increase from 3.9 to 5% in the future, while the very high risk will remain at 0.3%. For *D. frontalis* the high risk will be 10.8% for the current scenario and 9.6% for the future scenario, the very high risk will continue at 0.4%.

**Conclusions:** In the current and future scenario, the Transversal Volcanic Belt presents a higher risk of infestation for the two species under analysis, as well as a very high risk in the northeast of the state of Michoacan.

**Keywords:** Temperate forest; Climate change; bark beetles; analytic hierarchy process; Spatial modeling; Michoacan.

### 1.3 INTRODUCCIÓN

Los insectos descortezadores de coníferas (*Dendroctonus* spp. Erichson) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) son considerados las plagas más perjudiciales para los bosques de México, porque causan la muerte de los árboles (Soto-Correa, Avilés-Carrillo, Giron-Gutiérrez, & Cambrón-Sandoval, 2019). Al mismo tiempo, estos insectos son agentes bióticos reguladores de bosques de clima templado (del-Val & Sáenz-Romero, 2017), y tienen un rol importante en la regeneración de la masa forestal (Raffa et al., 2015; Dhar et al., 2018), y en la estructura y la composición de los bosques (Fettig et al., 2007; Raffa et al., 2008).

Algunas especies de insectos descortezadores generan cambios fundamentales en los ecosistemas forestales (Morris et al., 2018), particularmente cuando alcanzan niveles epidémicos y causan la muerte masiva de árboles a escala de paisaje (Krist Jr et al., 2007; Bentz et al., 2010). En tales casos, afectan el abastecimiento de madera y los servicios ecosistémicos que proveen para el bienestar del ser humano (Alfaro, Campbell, & Hawkes, 2010; Pan et al., 2011; Hawkins, Dhar, Balliet, & Runzer, 2012). Un ejemplo de lo catastrófico que puede resultar este tipo de eventos es la infestación de los bosques en el oeste de Estados Unidos y Canadá por *Dendroctonus ponderosae* Hopkins que afectó alrededor de 28 millones de hectáreas en poco más de una década (Dhar et al., 2018; United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service, 2018).

Seidl et al. (2017) consideran que en el futuro los bosques tendrán mayor riesgo y frecuencia de perturbación debido al cambio climático, lo cual beneficiará a algunas especies de insectos descortezadores (Raffa et al., 2015; del-Val & Sáenz-Romero, 2017; Marini et al., 2017; Morales-Rangel et al., 2018;), logrando que sus poblaciones epidémicas se incrementen más allá de su rango histórico de variabilidad y colonizando otras regiones (Bentz et al., 2019).

Es conocido que las poblaciones de estos insectos son favorecidas por factores climáticos, particularmente por bajas precipitaciones (Chapman, Veblen, & Schoennagel, 2012) y altas temperaturas (Raffa et al., 2015; Soto-Correa et al., 2019), así como por la presencia de incendios forestales (Billings et al., 2004; Fonseca, Llanderal, Cibrián,

Equihua, & de los Santos, 2009; Bentz et al., 2010). Es también sabido que rodales grandes, homogéneos y maduros favorecen la presencia de insectos descortezadores (Bentz et al., 2010; Raffa et al., 2015).

En los últimos años los bosques de coníferas del estado de Michoacán, México han sido atacados con mayor intensidad por insectos descortezadores (Rubin-Aguirre et al., 2015; del-Val & Sáenz-Romero, 2017), reportándose la presencia de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Salinas-Moreno et al., 2004; Vázquez, Sánchez-Martínez, & Madrigal, 2007). En particular, el año 2017 se afectaron alrededor de 58,191 m<sup>3</sup> de madera, lo que representó 14.78 % de la producción total de madera de pino del estado. A nivel nacional Michoacán ocupa el cuarto lugar en la producción de madera de coníferas y provee 93.5 % del total de resina que se produce en el país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2017).

Krist Jr et al. (2007) definen el riesgo como el potencial de susceptibilidad que tiene la masa forestal al ataque de una plaga forestal y el potencial de vulnerabilidad de que los árboles mueran por el ataque. Detectar anticipadamente áreas forestales en riesgo de ataque por insectos descortezadores, beneficiaría en la mitigación y prevención de posibles infestaciones (Bone et al., 2013).

Esta investigación tuvo como objetivo modelar la distribución espacial, actual y futura, del riesgo de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques del estado de Michoacán. Los objetivos específicos del estudio fueron: 1) crear mapas de riesgo de infestación por *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques de coníferas del estado de Michoacán; 2) identificar las áreas más susceptibles al ataque de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en el estado de Michoacán, y 3) realizar un análisis comparativo de la distribución espacial del riesgo de infestación actual y futuro, bajo un escenario de cambio climático, de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en el estado de Michoacán.

## 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.4.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprendió los bosques de clima templado frío del estado de Michoacán (Figura 4.1), mismos que tienen una extensión territorial aproximada de 1,124,973 ha, exceptuando las masas de encino puro (Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM], 2015b). Esta área forma parte de dos provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur; y cuenta con climas templados, cálidos y secos, así como temperaturas medias anuales que oscilan entre 8 a 30 °C, la precipitación anual total varía de 400 a 2000 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018).

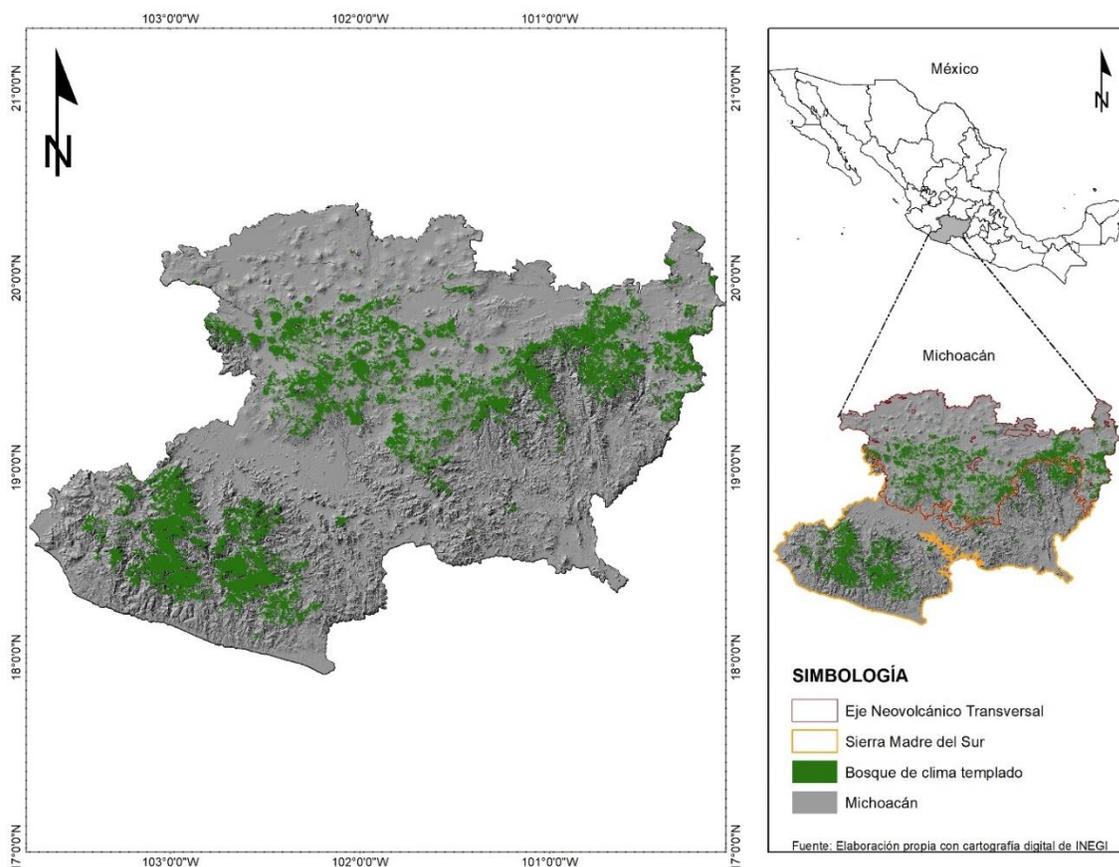


Figura 4.1. Área de estudio para modelar el riesgo de brotes de *Dendroctonus mexicanus* y *Dendroctonus frontalis* en el estado de Michoacán.

#### **1.4.2 Selección y análisis de variables asociadas con la aparición de brotes de insectos descortezadores**

Se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1980), el cual es una herramienta de apoyo en procesos de toma de decisiones para organizar, ponderar y combinar criterios (variables) con miras a resolver problemas específicos (Shah, Solangi, & Ikram, 2019). Este método comprende tres fases (Malczewski, 1999; Ho, 2008): 1) la construcción de una jerarquía específica al problema bajo análisis, con base en criterios y subcriterios identificados como relevantes, 2) la ponderación de los criterios identificados, realizada por expertos en el tema y, 3) la estimación de un valor de consistencia asociada a la ponderación de criterios y subcriterios, realizada para garantizar que las ponderaciones asignadas por los expertos no son producto del azar, sino de un análisis juicioso y correcto. Además, basados en Tienwong, Dasananda, & Navanugraha (2009), el PAJ se combinó con el método de lógica borrosa (PAJ-lógica borrosa) para estimar las áreas de riesgo de infestación de bosques por insectos descortezadores.

Para la primera fase, los criterios y subcriterios (variables) relevantes para la aparición de un brote de *D. frontalis* y *D. mexicanus* fueron identificados y definidos mediante revisión bibliográfica y la consulta a siete expertos mexicanos en el tema de plagas forestales. En el primer caso, se hizo una revisión de la literatura primaria que contiene información sobre la distribución geográfica (e.g. Salinas-Moreno et al., 2010) y las características fisiográficas (Salinas-Moreno et al., 2004; Armendáriz-Toledano et al., 2018; Pinzón et al., 2018), climáticas (Mattson & Haack, 1987; Fettig et al., 2007; Raffa et al., 2015; del-Val & Sáenz-Romero, 2017; Morales-Rangel et al., 2018), y las condiciones dasométricas que presentan los sitios donde ocurren brotes de insectos descortezadores, y en particular para las especies de estudio (e.g. Negrón et al., 2001; Shore et al., 2006; Krist Jr et al., 2007; Raffa et al., 2015).

Con la revisión bibliográfica, y las primeras consultas a los expertos mexicanos, en principio se consideraron los siguientes criterios: clima, ocurrencia de incendio forestal, densidad arbórea del rodal (área basal) y topografía. Además, se identificaron los

subcriterios precipitación, temperatura, exposición, altitud y pendiente. Los criterios y subcriterios identificados sirvieron para construir la jerarquía del problema (Figura 4.2), lo cual se hizo con base en Malczewski (1999).

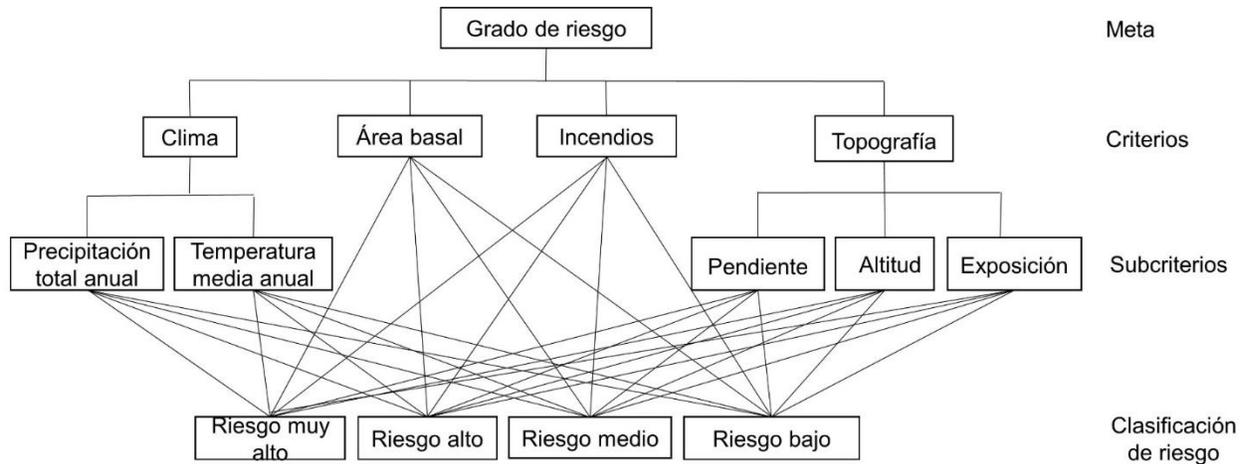


Figura 4.2. Organización jerárquica de los criterios y subcriterios considerados para estimar el riesgo de infestación de bosques templados con *D. mexicanus* y *D. frontalis* en el área de estudio.

Para la segunda fase (ponderación de criterios y subcriterios), se aplicaron siete encuestas a expertos con conocimientos en plagas forestales con el propósito de que ponderaran, mediante matrices de comparaciones pareadas, cada criterio y subcriterio identificado previamente como relevante para determinar el riesgo de brote de insectos descortezadores. Se les indicó utilizar la escala de calificación de 1 a 9 propuesta por Saaty (1980), la cual especifica que al asignar un número mayor a un factor/criterio este representa más importancia que el otro para el propósito que se evalúa (Cuadro 4.1). Las matrices generadas por los expertos fueron resueltas en el módulo WEIGHT del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016) para calcular el valor de importancia (ponderación) de cada criterio y subcriterio.

Cuadro 4.1. Escala de Saaty (1980) (matrices de comparación por pares) utilizada por expertos en este estudio para ponderar criterios y subcriterios asociados con la aparición de brotes de *Dendroctonus mexicanus* y *Dendroctonus frontalis*.

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos criterios/actividades contribuyen igualmente a lograr el objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y los juicios favorecen levemente un criterio sobre otro
5	Fuerte importancia	La experiencia y los juicios favorecen fuertemente un criterio sobre otro
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Un criterio es mucho más favorecido sobre otro y la dominancia es demostrada en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre otro es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio
Recíproco distinto a 0	Si se asigna $a_{ij}$ al comparar la actividad $i$ con la $j$ , entonces se asigna $a_{ji} = 1/a_{ij}$ al comparar la $j$ con la $i$	Supuesto razonable

En la tercera fase, se calculó el índice de consistencia (IC) definido por Saaty (1980) para evaluar la fiabilidad de que las ponderaciones hechas por los expertos fueran consistentes. Un valor de IC menor a 0.10 indica que la consistencia es aceptable. Si es mayor a 0.10 entonces hay inconsistencias en las comparaciones realizadas y por tanto deben corregirse o desecharse (Saaty, 1980; Malczewski, 1999). El valor de IC para cada encuesta realizada por los expertos se calculó en el módulo WEIGHT del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016). Las ponderaciones consistentes se promediaron para obtener un valor único de importancia para cada criterio y subcriterio. De las siete encuestas realizadas a expertos en plagas forestales se tomaron en cuenta

solo tres que resultaron consistentes ( $IC < 0.10$ ). A partir de éstas se calculó la media aritmética como valor de ponderación para cada uno de los criterios y subcriterios. Esos valores se incorporaron como vectores multiplicativos al proceso de evaluación multicriterio para estimar el riesgo de brote.

### **1.4.3 Obtención de bases de datos espaciales**

Una vez identificados los criterios y subcriterios, se obtuvieron bases de datos espaciales correspondientes a éstos para implementar el análisis. Se utilizaron mapas de precipitación total anual y temperatura media anual ( $\sim 1 \text{ km}^2$  de resolución espacial) para las condiciones actuales (período climático mensual promedio 1910-2009), obtenidos de Cuervo-Robayo et al. (2014) y un escenario a futuro para los mismos subcriterios [trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero] con horizonte de futuro cercano 2015-2039), obtenidos de Fernández, Zavala, Romero, Conde y Trejo (2015). Por otro lado, se obtuvieron datos georreferenciados de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) para el periodo de 2010 a 2019.

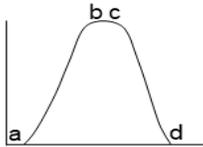
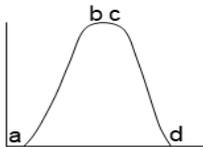
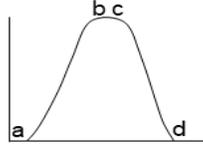
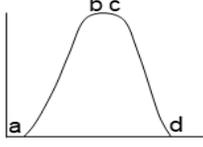
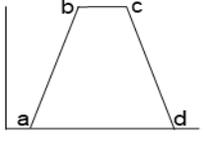
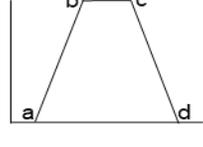
Con respecto a la densidad arbórea, se generó un mapa de área basal  $\text{ha}^{-1}$  a partir de los datos del inventario nacional forestal y de suelos (INFyS) empleando estimadores de medias de razón (Šmelko & Merganič, 2008) y el método de interpolación de la distancia inversa ponderada (IDW) (Chirinos & Mallqui, 2016). Finalmente, se generaron mapas de pendiente, exposición y elevación del terreno a partir del modelo digital de elevación (MDE) con resolución espacial de 30 m (<https://www.inegi.org.mx/>). Todos los procesos para crear los mapas se realizaron con el programa ArcGis® 10.5, homogenizando el tamaño de pixel a 30 m, y la proyección cartográfica al sistema de coordenadas geográfico y el Datum Norteamericano de 1927 (NAD 27).

### **1.4.4 Estandarización de subcriterios (lógica borrosa)**

Los criterios y subcriterios (variables) identificados como relevantes para un problema específico regularmente se registran en unidades de medida diferentes, por ello es necesario estandarizarlos a una unidad común, e.g. a valores en escala del 0 al 1 (Gómez

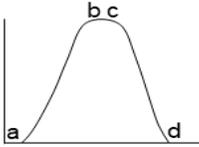
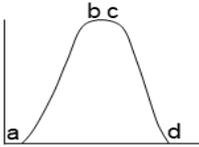
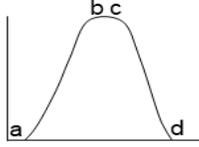
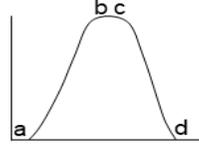
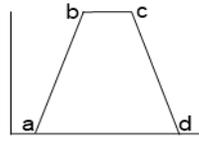
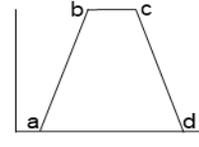
& Barredo, 2005). Para este propósito, en este estudio se utilizaron funciones de membresía (pertenencia) borrosa y con la ayuda de un experto mexicano en plagas forestales se definieron los puntos de inflexión de las funciones de membresía para cada uno de los criterios o subcriterios (Malczewski, 1999). Estas fueron la base para definir el grado de pertenencia (aptitud) de cada pixel que conforma el área de estudio en relación a cada uno de los criterios o subcriterios identificados como relevantes para que se presente un brote de los insectos descortezadores bajo estudio. El grado de pertenencia es mayor cuando el valor estandarizado se aproxima a 1 y menor cuando está cerca de 0. Las funciones de membresía pueden tener formas muy variadas, siendo las más comunes las de forma lineal, sigmoideal y en forma de J, con dirección creciente, decreciente o simétrica (Eastman, 2016). La función lineal se usa con mayor frecuencia cuando se quiere conocer el aumento potencial lineal de un criterio, o si el aumento es progresivo, es decir, que ese aumento tenga variaciones entonces la función sigmoideal es la más recomendada por la precisión que tiene para poder asimilar esos eventos (Krist Jr et al., 2010). En este estudio se utilizaron estas formas de funciones de membresía ya que de acuerdo al comportamiento de los criterios y subcriterios (requerimientos) de las especies de descortezadores (Cuadro 4.2 y 4.3) se consideró que esas funciones podrían dar mejores resultados. El criterio/subcriterio “incendio” se estandarizó utilizando valores binarios. Áreas con presencia de incendio se reclasificaron con valor igual a 1 y áreas sin presencia de incendio con valor de 0. Los valores estandarizados de los subcriterios se generaron en el módulo Fuzzy del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016).

Cuadro 4.2. Funciones de membresía para estandarizar los subcriterios de *D. mexicanus*. El eje “y” indica la aptitud para un subcriterio específico en intervalo de valores de 0 a 1, el eje “x” indica los valores originales del subcriterio, e.g. precipitación total anual en mm.

Factor	Función de membresía	Puntos de inflexión usados en el eje x
Precipitación total anual (mm)		a: 500, b: 550, c: 700: d: 1200
	Simétrica sigmoide	
Temperatura media anual (°C)		a: 5, b: 18, c: 22: d: 26
	Simétrica sigmoide	
Densidad arbórea (AB ha <sup>-1</sup> )		a: 12, b: 15, c:20, d: 28
	Simétrica sigmoide	
Altitud (m.s.n.m.)		a: 900, b: 2300, c: 2500, d: 3300
	Simétrica sigmoide	
Pendiente (°)		a: 0, b: 0.5, c: 2, d: 4
	Simétrica lineal	
Exposición (°)		a: 90, b: 135, c: 225, d: 270
	Simétrica lineal	

**Fuente:** Elaboración propia basado en Silva-Gallegos et al. (2016).

Cuadro 4.3. Funciones de membresía para estandarizar los criterios de *D. frontalis*. El eje “y” indica la aptitud para un subcriterio específico en intervalo de valores de 0 a 1, el eje “x” indica los valores originales del subcriterio, e.g. precipitación total anual en mm.

Factor	Función de membresía	Puntos de inflexión usados en el eje x
Precipitación total anual (mm)		a: 700, b: 750, c: 900, d: 1100
	Simétrica sigmoide	
Temperatura media anual (°C)		a: 12, b: 20, c: 26, d: 30
	Simétrica sigmoide	
Densidad arbórea (AB ha <sup>-1</sup> )		a: 12, b: 15, c: 20, d: 28
	Simétrica sigmoide	
Altitud (m.s.n.m.)		a: 800, b: 1600, c: 2000, d: 3000
	Simétrica sigmoide	
Pendiente (°)		a: 0, b: 0.5, c: 2, d: 3
	Simétrica lineal	
Exposición (°)		a: 90, b: 135, c: 225, d: 270
	Simétrica lineal	

**Fuente:** Elaboración propia basado en Silva-Gallegos et al. (2016).

#### 1.4.5 Estimación del riesgo de infestación actual y bajo un escenario de cambio climático

La estimación del riesgo de brote de ambas especies de descortezadores se realizó considerando los cuatro criterios y los cinco subcriterios definidos como se detalló anteriormente (Figura 4.2). Una vez que los subcriterios (mapas subcriterio) se estandarizaron mediante funciones de membresía (Cuadro 4.2 y 4.3), se ponderaron mediante su multiplicación por los pesos correspondientes definidos por los expertos (Figura 4.3). Posteriormente, los mapas de subcriterios ponderados se sumaron para dar origen a mapas criterio. Mediante procedimiento similar se generaron mapas criterio ponderados. Los mapas criterio se multiplicaron por el peso derivado de la ponderación hecha por los expertos para cada uno de ellos. Finalmente, los mapas criterio resultantes se sumaron para crear el mapa que estima el riesgo de brote de insectos descortezadores a nivel pixel (Figura 4.3). Para facilitar la interpretación de los valores de riesgo calculados, estos se agruparon en cuatro clases de riesgo: bajo (0 – 0.2), medio (0.2 – 0.4), alto (0.4 – 0.6), muy alto (>0.6) (Figura 4.4).

El procedimiento para generar el mapa de riesgo a futuro fue similar al recién explicado para estimar el riesgo de infestación por *Dendroctonus* bajo las condiciones actuales; la única diferencia consistió en sustituir los mapas criterio de clima, específicamente los correspondientes a los subcriterios precipitación total anual y temperatura media anual, por mapas que registran la proyección de esos subcriterios considerando el escenario de cambio climático RCP 4.5, escenario de concentración baja de gases de efecto invernadero, considerada así porque puede alcanzar 580-650 ppm CO<sub>2</sub>eq (partes por millón de dióxido de carbono) para el año 2100 y en el que pueden presentarse cambios de temperatura aproximados de 2.3 a 2.6 °C para este periodo de tiempo. El RCP 4.5 es una de las cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero adoptadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en Inglés) en los escenarios de cambio climático (Edenhofer et al., 2014). El resto de los criterios permanecieron constantes. Aunque sabemos que los subcriterios incendio y área basal podrían cambiar en el futuro, el propósito de este artículo no fue estimar el comportamiento de estos factores.

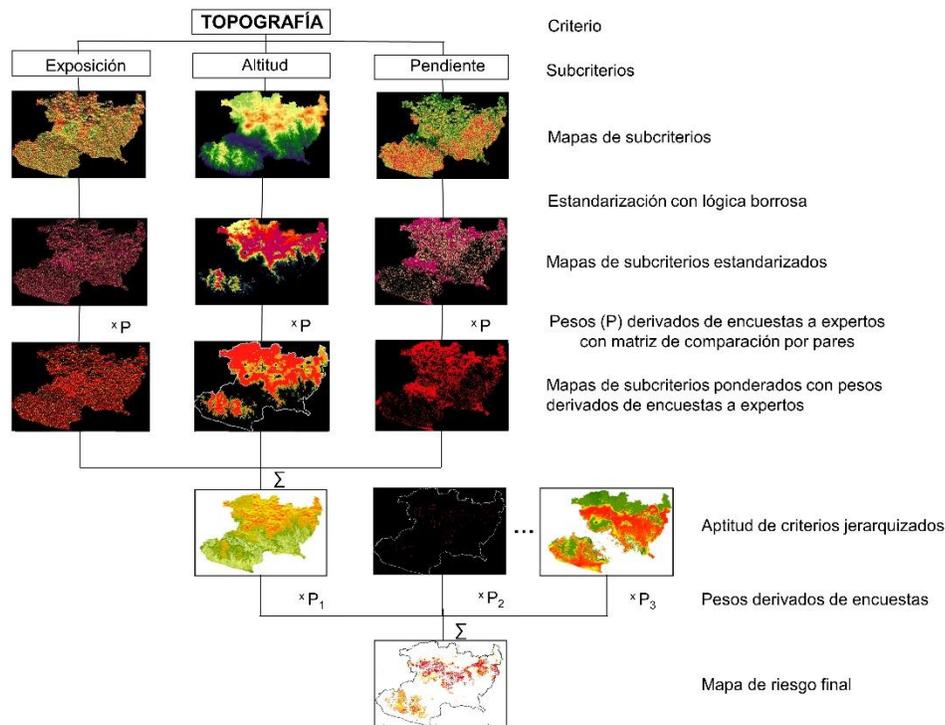


Figura 4.3. Proceso de análisis jerárquico (PAJ) para estimar áreas de riesgo de brote de *Dendroctonus* spp. Elaboración propia a partir de Bustillos-Herrera, Valdez-Lazalde, Aldrete y González-Guillén (2007).

#### 1.4.6 Pseudo-validación del modelo

El mapa de riesgo generado para cada especie de descortezador se comparó con las coordenadas geográficas registradas para brotes de descortezadores ocurridos en el periodo de 2010 a 2019.

#### 1.4.7 Comparativo de la distribución espacial actual y futura del riesgo de infestación

Mediante el módulo CrossTab del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016) se implementó un análisis comparativo de los mapas de riesgo de infestación generados para el escenario actual y el escenario futuro – cambio climático. Este módulo genera una matriz de clasificación cruzada que permitió identificar con detalle los cambios en los valores de riesgo de infestación estimados para los dos escenarios modelados: ganancias, pérdidas, permanencias y cambio total en hectáreas, para cada una de las

categorías de riesgo de infestación definidas para las dos especies de *Dendroctonus* (Martínez et al., 2000). Adicionalmente, CrossTab proveyó el índice de acuerdo Kappa, una medida cuantitativa del acuerdo entre los mapas comparados (Eastman, 2016) considerando valores de -1 a 1 que permiten argumentar el grado de relación entre los mapas; entre más se aproxima el resultado a 1, el grado de concordancia es más fuerte y si el valor está más cerca de -1 el grado concordancia es menor (Martínez et al., 2000).

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.5.1 Criterios y subcriterios identificados relevantes para ocurrencia de infestación de insectos descortezadores en bosques de clima templado

De acuerdo con el Proceso de Análisis Jerárquico, se encontraron cuatro criterios relevantes que inciden en la ocurrencia de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis*, los cuales en orden de importancia fueron clima, incendio, densidad arbórea y topografía (Cuadro 4.4). Asimismo, el clima tuvo la precipitación total anual y la temperatura media anual como subcriterios importantes; mientras que la topografía contuvo la exposición, altitud y pendiente como subcriterios (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Ponderación de criterios y subcriterios para estimar el riesgo de brotes *D. mexicanus* y *D. frontalis* de acuerdo a expertos mexicanos en plagas forestales.

Criterios		Subcriterios			
Criterio	Peso	Clima		Topografía	
			Peso		Peso
Clima	0.45	Precipitación total anual	0.86	Exposición	0.46
Incendio	0.26	Temperatura media anual	0.14	Altitud	0.39
Densidad arbórea	0.14			Pendiente	0.15
Topografía	0.15				

La literatura primaria sustenta la ponderación encontrada del clima como criterio principal que incide en la presencia de brotes de insectos descortezadores. El aumento de la temperatura y la disminución en la precipitación favorecen las poblaciones de los insectos (Chapman et al., 2012; Raffa et al., 2015). De acuerdo con Raffa et al. (2008, 2015) y Six y Brancewell (2015) las sequías prolongadas provocan estrés en los árboles, haciendo que se debiliten y opongan menor resistencia al ataque de descortezadores.

Por otro lado, temperaturas altas pueden beneficiar el desarrollo de los insectos, aunque, de acuerdo con Soto-Correa et al. (2019) temperaturas mayores a 30 °C reducen la población de *D. frontalis*. Morales-Rangel et al. (2018) encontraron que con temperaturas menores a 13 °C bajan las poblaciones de *D. mexicanus* y *D. frontalis*, además mencionan que temperaturas medias anuales entre 16 y 18 °C favorecen su desarrollo. De la misma manera Moser, Fitzgibbon y Klepzig (2005) reportaron que temperaturas promedio por debajo de 16 °C disminuyeron la presencia de ambos insectos y aumentó en áreas con temperaturas diarias promedio entre los 20 y 25 °C, con mayor actividad en los 22 °C. González-Hernández, Morales-Villafaña, Romero-Sánchez, Islas-Trejo y Pérez-Miranda (2018) indican que temperaturas promedio anual de 12 a 18 °C incrementan el desarrollo de *D. mexicanus* así como la precipitación en un rango de 600 a 1,200 mm.

Referente a la ponderación de los incendios, de acuerdo con Fonseca et al. (2009) los árboles sometidos a la acción de un incendio liberan compuestos volátiles que sirven como atrayentes para algunos insectos descortezadores. Por otro lado, Billings et al. (2004) reportaron que la ocurrencia de incendios debilita los árboles, provocando que produzcan menos resina y tengan menor defensa ante un ataque de *Dendroctonus*.

La literatura primaria además sustenta la ponderación de los expertos respecto a la importancia de la estructura de un bosque. Particularmente, la densidad arbórea influye en la aparición de brotes de insectos descortezadores (Raffa et al., 2015). De acuerdo a lo reportado por Raffa et al. (2008) las prácticas de manejo forestal que favorecen la homogeneidad de los bosques los hace relativamente susceptibles a brotes de estos escarabajos. También Morris et al. (2018) argumentan que rodales con alta densidad de árboles son más susceptibles a una infestación debido a la alta competencia existente por los recursos, lo cual es acorde a lo reportado por Negrón et al. (2001) quienes encontraron más ataques de *Dendroctonus pseudotsugae* Hopkins en rodales con más de 26.4 m<sup>2</sup> de área basal ha<sup>-1</sup>, y con mayor intensidad en aquellos que superaban los 39 m<sup>2</sup> de área basal ha<sup>-1</sup>.

En cuanto a la topografía, Según Krist Jr et al. (2007) ésta juega un papel importante en el riesgo de mortalidad de los árboles. De acuerdo con Bennie, Huntley, Wiltshire, Hill y Baxter (2008) la pendiente y la exposición tienen influencia en la radiación solar que reciben los árboles afectando la evapotranspiración y la humedad disponible en el suelo, siendo mayormente afectados los que se encuentran en laderas con exposición sur. Como consecuencia esos árboles sufren mayor estrés y están más propensos a un brote de descortezadores. Alvarado (2013) reportó infestaciones para *D. mexicanus* con diferentes exposiciones entre ellas la Sureste con orientación de 121.94°, altitud que oscila de 2,115 a 2,442 m.s.n.m. e inclinación desde 1.44 hasta 30.5°. Salinas-Moreno et al. (2004) mencionan un rango preferente entre 2,100 y 2,500 m.s.n.m. para este insecto. Para *D. frontalis*, Armendáriz-Toledano et al. (2018) y Salinas-Moreno et al. (2004) reportaron mayor abundancia de insectos en el intervalo altitudinal entre 1,500 y 2,000.

### **1.5.2 Riesgo de infestación por *D. mexicanus* y *D. frontalis***

La metodología implementada permitió estimar valores de riesgo de infestación a nivel pixel y a partir de éstos generar dos mapas de riesgo para cada especie de insecto, uno para el escenario actual (1910-2009) y otro para el escenario futuro (2015-2039) (Figura 4 y 5). El valor máximo estimado de riesgo de infestación para para *D. mexicanus* fue de 0.78 para el escenario actual, y 0.83 para el escenario futuro. Para *D. frontalis* se estimaron valores de 0.84 y 0.85, para los escenarios actual y futuro respectivamente. Para ambas especies de insectos las áreas de mayor riesgo están ubicadas a lo largo de la Faja Volcánica Transversal (FVT), lo que coincide con lo reportado por Salinas-Moreno et al. (2010) y Armendáriz-Toledano et al. (2018) quienes indicaron que las preferencias ecológicas de los descortezadores bajo análisis se encuentran sobre la FVT.

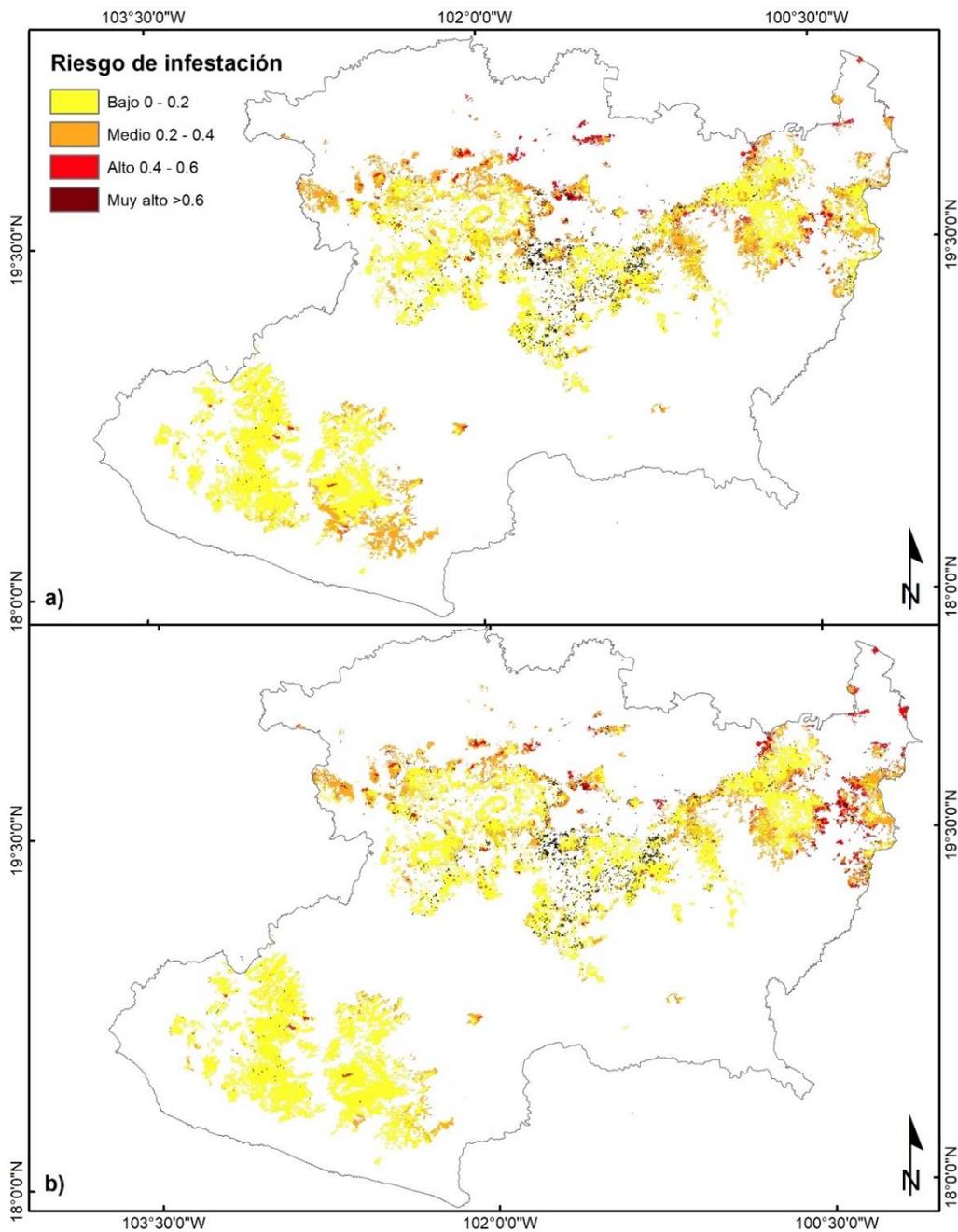


Figura 4.4. Riesgo de infestación por *D. mexicanus* en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) mapa de riesgo actual (1910-2009) y b) mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039. Los puntos negros representan brotes del insecto reportados por la CONAFOR.

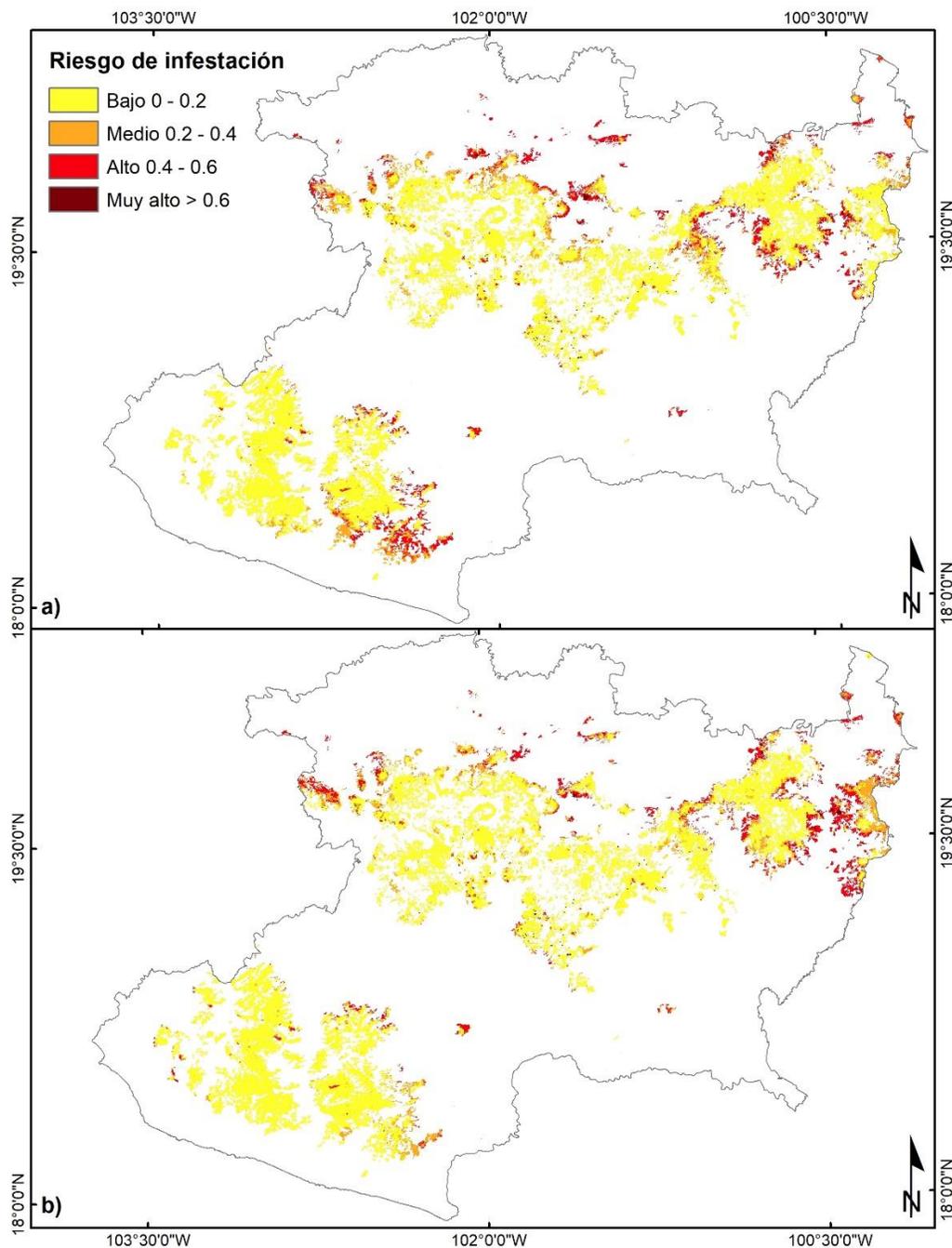


Figura 4.5. Riesgo de infestación por *D. frontalis* en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) mapa de riesgo actual (1910-2009) y b) mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039). Los puntos negros representan brotes del insecto registrados por la CONAFOR (El bajo número de registros de *D. frontalis* hace que sean poco visibles).

El riesgo de infestación mapeado es también consistente con los reportes de ocurrencia de brotes registrados en el periodo de (2010 a 2019) por la CONAFOR (Figuras 4.4 y 4.5). Para *D. mexicanus* se reportaron en el periodo indicado 2,255 registros y 99 registros de *D. frontalis*. Cabe mencionar que anteriormente se daba aviso de un brote por *Dendroctonus* spp. a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) sin hacer una identificación en laboratorio de los insectos, por lo que existe la posibilidad que muchos de esos reportes sean erróneos respecto a la especie que se reportó. Esta puede ser la explicación de la existencia de un mayor número de registros de *D. mexicanus* que de *D. frontalis*.

De acuerdo con Armendáriz-Toledano et al. (2018) en la SMS existen condiciones ideales para que prosperen los dos insectos descortezadores aquí considerados, sin embargo, en los resultados obtenidos el riesgo de ocurrencia de un brote en esta zona es menor al estimado para la FVT. En otro estudio Salinas-Moreno, Ager, Vargas, Hayes y Zúñiga (2010) reportaron que las especies de pino existentes en la FVT y la SMS son muy parecidas, por lo que se puede dar el caso de que *D. mexicanus* y *D. frontalis* se encuentren en el mismo lugar debido a que tienen preferencias por hospederos similares, además de que pueden atacar y coexistir en el mismo árbol (Moser et al., 2005; Salinas-Moreno et al., 2010; Armendáriz-Toledano et al., 2018).

La mayoría de ataques de *D. mexicanus* y *D. frontalis* registrados por la CONAFOR se ubicaron en el centro del estado, sobre la FVT, coincidiendo esa zona con los municipios de Ario de Rosales, Tacámbaro y Salvador Escalante, los que contribuyen con 29.54 % (49,566 ha) del total de la superficie plantada de aguacate en el estado de Michoacán (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2019), además de ser los que más colaboran en la producción de resina en la entidad (Hernández, 2011, citado por Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM], 2015).

Lo anterior es relevante ya que estos municipios, al formar parte importante del monopolio productivo de aguacate, han visto afectados severamente sus bosques por cambios en el uso del suelo (Anguiano et al., 2006), generando debilitamiento en los

pinos y, consecuentemente, haciéndolos menos resistentes al ataque de insectos descortezadores.

### 1.5.3 Análisis comparativo del riesgo de infestación actual y futuro

Las estimaciones de riesgo espacialmente explícitas, mostradas en los mapas obtenidos para el escenario actual y futuro sirvieron de base para realizar un análisis cualitativo de la distribución de las categorías de riesgo (Figura 4.4 y 4.5), además de generar matrices de clasificación cruzada para cada una de las especies (Cuadro 4.5, 4.6). Un análisis somero de las Figura 4.4 y 4.5 permite argumentar que en el escenario futuro el riesgo más alto de infestación por las dos especies de estudio se presentará en la parte noreste del estado de Michoacán. Por otro lado, es también obvio en el comparativo de los mapas que el riesgo de infestación disminuye en los bosques ubicados al sur del estado (SMS) en el escenario futuro. Las matrices de clasificación cruzada por su parte permitieron analizar y evaluar, en términos cuantitativos (ha), la dinámica de cambios esperados en el riesgo de infestación considerando las categorías de riesgo que sufrieron ganancias, pérdidas o permanecieron constantes.

El análisis para *D. mexicanus* indicó que 82.7 % de la superficie clasificada en los diferentes niveles de riesgo actual se mantuvo sin cambios en el escenario futuro. El resto de la superficie (13.7 %) sufrió un cambio en la categoría de riesgo inicialmente asignada (escenario actual). Tales cambios se detallan en los valores fuera de la diagonal principal de la matriz, facilitando la interpretación de los cambios ocurridos entre las categorías de riesgo. La superficie del estado clasificada con riesgo de infestación alto incrementará en 10,136 ha, y la superficie con riesgo muy alto permanecerá, en términos prácticos constante –incremento de 508 ha (Cuadro 4.5 y Figura 4.6). De manera contraria, la superficie clasificada en la categoría de riesgo bajo incrementó de 66.9 % en el escenario actual a 72.4 % para el escenario futuro, significando una ganancia para la clase de riesgo bajo a razón de 51,028 ha; contribuyendo con ello a una disminución en la categoría de riesgo medio (pérdida de 61,672 ha). En general, y contrario a lo que podría esperarse, este resultado indica que, bajo el escenario de cambio climático utilizado, el riesgo de brotes por *D. mexicanus* será menor en el futuro.

Sin embargo, no se debe soslayar la ganancia que en términos absolutos se esperaría en la superficie clasificada con riesgo alto y muy alto en el escenario futuro, a razón de 10,136 y 508 ha, respectivamente.

Cuadro 4.5. Matriz de clasificación cruzada (valores en ha) de las clases de riesgo de infestación por *D. mexicanus* bajo los escenarios actual y futuro (cambio climático RCP 4.5).

Riesgo actual	Riesgo futuro (escenario RCP 4.5)				Superficie total (ha) escenario actual	Pérdidas (ha)
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto		
Bajo	582992	36726	458	0	620176	37184
Medio	88195	158569	21369	61	268195	109625
Alto	17	11228	23787	1293	36326	12538
Muy alto	0	0	846	1665	2511	846
Superficie total (ha) Escenario RCP 4.5	671204	206523	46461	3019	927207	160194
Ganancias (ha)	88212	47953	22674	1354	160194	

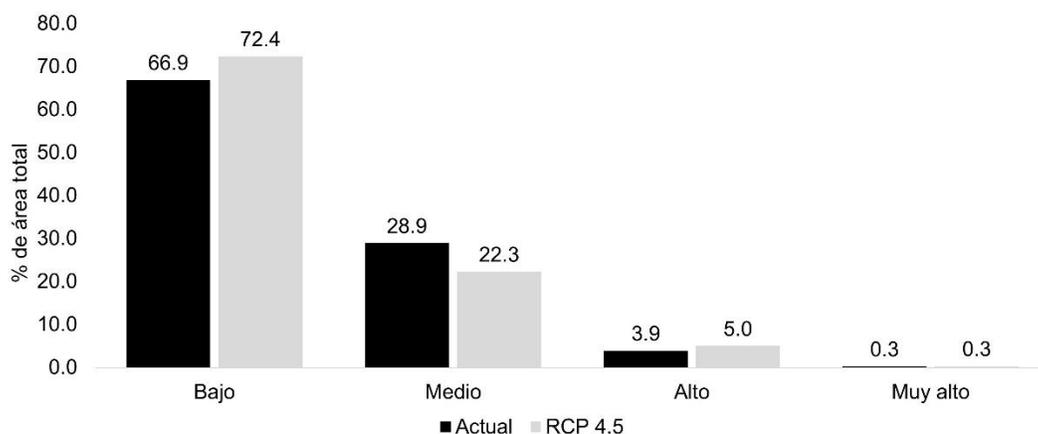


Figura 4.6. Comparación de superficie (% de área total) entre categorías del mapa de riesgo actual (1910-2009) y el mapa de riesgo con trayectoria de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039) para *D. mexicanus*.

El comparativo de riesgo actual y futuro para *D. frontalis* indicó que la superficie que no sufrió cambio fue 80.54 % y que la superficie clasificada con los riesgos de infestación de mayor interés para los administradores de áreas forestales (riesgo alto y muy alto) permanecerá aproximadamente invariable (Cuadro 4.6, Figura 4.7). De hecho, la

superficie de la clase de riesgo alto disminuye en 11,015 ha y la clase de riesgo muy alto, en términos absolutos disminuye en 82 ha.

Para entender de mejor manera la interpretación que debe hacerse de las pérdidas y ganancias que se reportan en las matrices de clasificación cruzada (Cuadro 4.5 y 4.6) se puede tomar como ejemplo la clase de riesgo bajo reportada en el Cuadro 4.6. Esta clase fue la que más variación tuvo de acuerdo al intercambio de superficie entre las categorías/clases del riesgo del escenario actual y futuro. La línea 3 de la matriz registra la superficie total (ha) clasificada como de riesgo bajo en el escenario actual (687,902 ha); por otro lado, la columna 2 de la misma matriz registra la superficie total (ha) clasificada en la misma categoría, pero en el escenario futuro (715,491 ha). La diferencia entre estas dos cifras indica la ganancia o pérdida absoluta en la clase de riesgo bajo, que en este caso corresponde a una ganancia de 27,589 ha, es decir, que la clase de riesgo bajo tiene una mayor superficie en el escenario futuro que en el escenario actual. Esto se percibe con facilidad en la Figura 4.7. Es claro que el aumento en la superficie de cierta clase necesariamente abona a la disminución de la superficie clasificada con otro tipo de riesgo. El porcentaje del área total clasificada para esta categoría aumentó de 74.2 a 77.2 % considerando los escenarios actual y futuro respectivamente. Así mismo, el cambio total que se tuvo en la superficie del área de estudio fue 38.91 % (este porcentaje corresponde a la suma de las ganancias y pérdidas de la matriz presentada en el Cuadro 4.6). De manera similar deben interpretarse el resto de los valores reportados en las matrices reportadas (Cuadro 4.5 y 4.6)

Cuadro 4.6. Matriz de clasificación cruzada (valores en ha) de las clases de riesgo de infestación por *D. frontalis* bajo los escenarios actual y futuro (cambio climático RCP 4.5).

Riesgo actual	Riesgo futuro (escenario RCP 4.5)				Superficie total (ha) escenario actual	Pérdidas (ha)
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto		
Bajo	641133	33082	13688	0	687902	46770
Medio	60607	51442	22606	395	135051	83608
Alto	13751	33925	51731	946	100353	48622
Muy alto	0	110	1313	2478	3901	1423
Superficie total (ha) escenario RCP 4.5	715491	118559	89338	3819	927207	180424
Ganancias (ha)	74358	67117	37607	1341	180424	

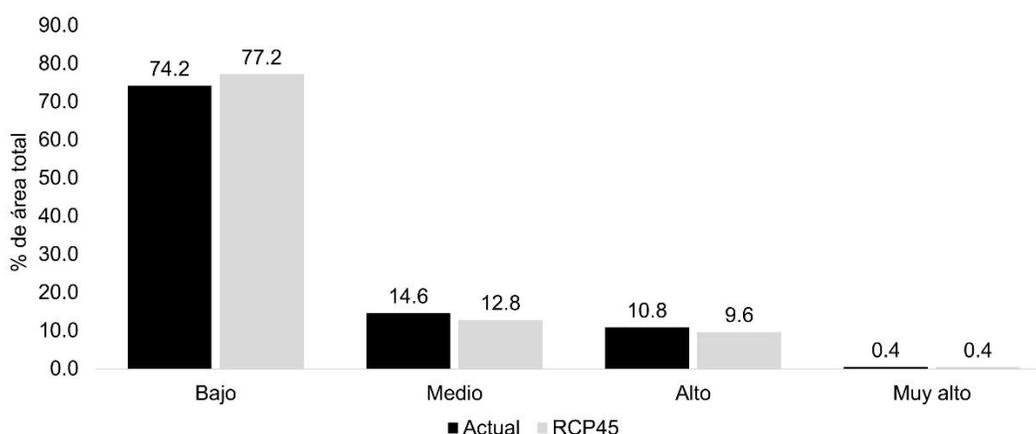


Figura 4.7. Comparación de superficie (% de área total) entre categorías del mapa de riesgo actual (1910-2009) y mapa de riesgo con trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039) para *D. frontalis*.

El índice de Kappa se estimó en 0.91 para *D. mexicanus* y 0.89 para *D. frontalis*. Estos valores sugieren una concordancia muy alta (0.81 – 1.00) (Landis & Koch, 1977) en la distribución espacial de las clases de riesgo mapeadas en las Figuras 4.4 y 4.5. En explicación alterna, los valores de Kappa indican que una fracción importante (la mayor parte) de las clases de riesgo de infestación permanecen invariantes entre los escenarios que se están comparando; así lo corroboran las cifras graficadas en las Figuras 4.6 y 4.7.

Aunque en México existe un “sistema de alerta temprana y de evaluación de riesgo de plagas forestales” (SATERF) administrado por la CONAFOR 2020, (<http://sivicoff.cnf.gob.mx/Default.aspx>), la propuesta metodológica y el análisis aquí presentado son novedosos, particularmente para el estado de Michoacán, considerando la escala a la que se presentan los resultados. El SATERF expide mapas nacionales y estatales por mes. A nivel nacional emite pronunciamientos genéricos en los que determina para Michoacán riesgo alto en las zonas forestales y por entidades reporta riesgo alto en la mayoría del SMS y en el suroeste de la FVT,

(<http://sivicoff.cnf.gob.mx/frmMapasdeRiesgodePlagasForestales.aspx>), lo que dificulta encontrar referencias para confirmar o contrastar los resultados.

Sin embargo, un análisis de la calibración del modelo resulta de utilidad para entender mejor las predicciones de riesgo reportadas. El comparativo de la cantidad de pixeles (superficie) existentes, en cada clase de precipitación total anual y temperatura media anual, en los escenarios actual y futuro (Figura 4.8) ayuda a explicar los cambios encontrados en las categorías de riesgo de infestación a futuro. Para el caso de la precipitación media anual (Figura 4.8a) el número de pixeles existentes en el rango de 700 a 900 mm es menor en el escenario actual, comparado con el escenario futuro, y la temperatura media anual es más alta que la del escenario futuro en la mayoría de las clases indicadas (Figura 4.8b). Lo que necesariamente resulta en un mayor riesgo de infestación para el escenario actual considerando que al criterio clima se le otorgó un valor de importancia (ponderación) de 0.45 (Cuadro 4.4), además de las funciones de membresía utilizadas para estandarizar los subcriterios climáticos (Cuadro 4.2 y 4.3).

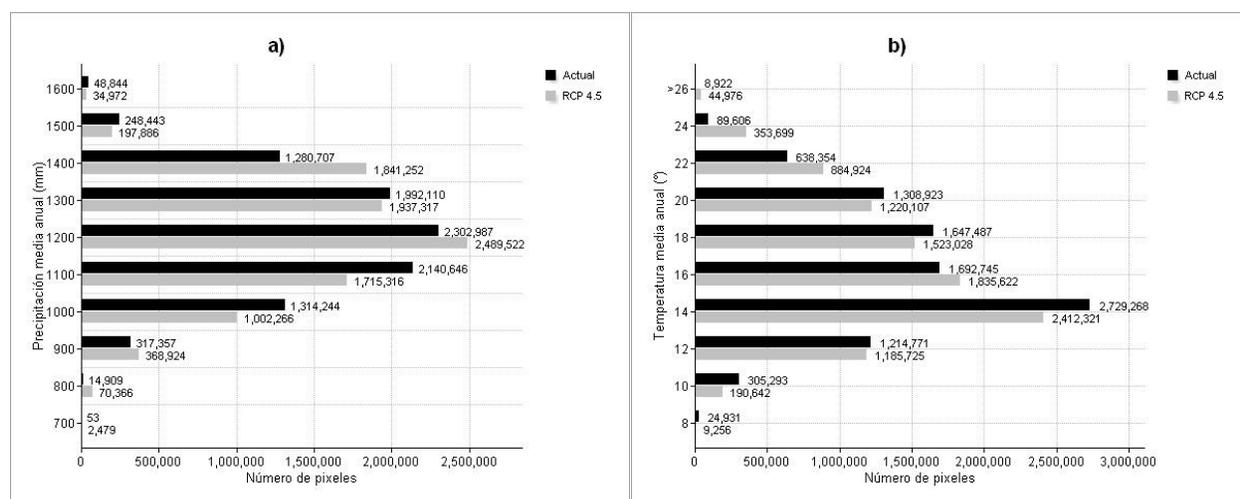


Figura 4.8. Número de pixeles por clase de precipitación total anual y temperatura media anual en el área de estudio. a) comparación de precipitación media anual del escenario actual (1910-2009) y el escenario con trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas y horizonte de futuro cercano (2015-2039), b) comparación de temperatura media anual del escenario actual (1910-2009) y el escenario con trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 por sus siglas en inglés) de emisiones bajas y horizonte de futuro cercano (2015-2039).

El RCP 4.5 que se utilizó para los dos insectos con horizonte de futuro cercano (2015-2030) vislumbra aumento en la temperatura y disminución en la precipitación, y de acuerdo a Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval y Beaulieu (2012) en Michoacán la temperatura aumentará 1.4 °C y la precipitación disminuirá alrededor de 5.6 % para 2030. Pensando que el criterio más importante para los expertos fue el clima (0.45) se creía que estos cambios influirían en las categorías de riesgo que se estimaron con el escenario futuro y por lo tanto estas iban a ser mayores que las del escenario actual. Sin embargo, algunas zonas de los bosques de clima templado del estado de Michoacán para el escenario futuro tendrán mayor precipitación y menores temperaturas que las pronosticadas en el escenario actual (Figura 4.8). Estos cambios influyen de manera considerable en la estimación de las categorías de los mapas de riesgo, de tal manera que las áreas de riesgo medio para el escenario actual presentan mayor superficie que las del escenario futuro (Figura 4.6 y 4.7).

Morales-Rangel et al. (2018) sugieren la ocurrencia de un aumento de 3 °C en la temperatura para el 2030, y que esto favorecerá la incidencia de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en lugares donde antes se reportaba poca presencia. Los resultados obtenidos en esta investigación dan pie para argumentar que tal aseveración es debatible, al menos en el sentido que se omite la ocurrencia futura probable de condiciones de temperatura y precipitación menos favorables para el desarrollo de los insectos, lo que tendrá a equilibrar los cambios esperados en el riesgo de infestación en los bosques del estado de Michoacán.

## 1.6 CONCLUSIONES

Los mapas de riesgo de infestación generados confirman que el área de mayor riesgo de infestaciones de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en el estado de Michoacán es la Faja Volcánica Transversal, tanto para el escenario actual como para el escenario futuro. Lo anterior, considerando los requerimientos ecológicos de las especies de insectos analizadas y a las ponderaciones otorgadas a cada uno de ellos por los expertos mexicanos consultados. Bajo los supuestos del escenario climático futuro utilizado, el

riesgo más alto de infestación para las dos especies bajo análisis ocurrirá en la parte noreste del estado de Michoacán.

La metodología generada representa una herramienta de apoyo para el análisis espacial del riesgo de brotes de insectos descortezadores y para la toma de decisiones respecto al monitoreo, la prevención y la aplicación de medidas sanitarias para el control de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en el estado de Michoacán, pero de aplicación amplia si los datos necesarios para implementarla estuvieran disponibles.

## CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Se identificó que los bosques templados del estado de Michoacán ubicados en la Faja Volcánica Transversal presentan el riesgo mayor de infestación por *D. mexicanus* y *D. frontalis*, tanto en el escenario actual como en el escenario futuro, además se estima que el riesgo muy alto podrá ocurrir al noreste del estado de Michoacán.

Se generaron dos mapas de riesgo para *D. mexicanus* y *D. frontalis*, uno para el escenario actual y otro para el escenario futuro, estos podrán ayudar a los administradores forestales y encargados de gestionar políticas en el estado a tomar decisiones respecto al monitoreo, la prevención y la aplicación de medidas sanitarias en el control de estos insectos.

Al comparar el mapa de riesgo actual con el de riesgo futuro, a través del método de clasificación cruzada, se logró identificar que las categorías de riesgo bajo para el escenario futuro serán la que más cambios sufrirán, mientras que las categorías de riesgo alto y muy alto permanecerán relativamente estables.

La metodología de evaluación multicriterio espacial implementada para estimar el riesgo de infestación del bosque de clima templado de Michoacán por *D. mexicanus* y *D. frontalis* permitió generar modelos útiles para identificar y zonificar el grado de susceptibilidad a posibles ataques por estos insectos.

Finalmente, es importante mencionar que una limitante para generar los mapas a una mayor resolución espacial fue la falta de información dasométrica y climatológica a mayor detalle. Así mismo, los resultados podrían mejorar si se incorpora al proceso de modelado información georreferenciada de incendios forestales en la que se reporte la intensidad del mismo y los daños causados al arbolado.

## REFERENCIAS

- Alfaro, R., Campbell, E., & Hawkes, B. (2010). *Historical frequency, intensity and extent of mountain pine beetle disturbance in British Columbia*. Victoria, British Columbia Canada: Natural Resources Canada. Retrieved from <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=31405>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., Mcdowell, N., Vennetier, M., ... Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Alvarado, V. O. (2013). *Evaluación de los factores asociados a las infestaciones de descortezadores (Coleoptera: Scolytinae) en bosques de piñones (Pinus cembroides) en la reserva Sierra Gorda de Guanajuato*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro. Retrieved from <http://ri.uaq.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1850/RI000028.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Anguiano, C. J., Alcántar, R. J. J., Toledo, B. R., Tapia, V. L. M., Ruiz, C. J. A., & Rodríguez, C. Y. (2006). *Caracterización edafo-climática del área productora de aguacate de Michoacán*. Libro Técnico N0. 4. INIFAP-CIRPAC. Prometeo Editores. Guadalajara, Jalisco.
- Armendáriz-Toledano, F., Zuñiga, G., García-Roman, L. J., Valerio-Mendoza, O., & García-Navarrete, P. G. (2018). *Guía ilustrada para identificar las especies del género Dendroctonus presentes en México y Centroamérica*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Bennie, J., Huntley, B., Wiltshire, A., Hill, M. O., & Baxter, R. (2008). Slope , aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 216(1), 47–59. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.04.010
- Bentz, B. J., Jönsson, A. M., Schroeder, M., Weed, A., Anna, R., Wilcke, I., & Larsson, K. (2019). *Ips typographus* and *Dendroctonus ponderosae* models project thermal suitability for intra- and inter-continental establishment in a changing climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 1–17. doi:10.3389/ffgc.2019.00001
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., ... Seybold, S. J. (2010). Climate change and bark beetles of the western United States and Canada : direct and indirect effects, *BioScience* 60(8), 602–613. doi:10.1525/bio.2010.60.8.6
- Billings, R. F., Clarke, S. R., Espino, M. V., Córdón, C. P., Meléndez, F. B., Campos, R. J., & Baeza, Y. G. (2004). Gorgojo descortezador e incendios: una combinación devastadora para los pinares de América Central. *Unasylva*, 217(55), 15–21. Retrieved from <https://www.barkbeetles.org/centralamerica/y5507s06.pdf>

- Bone, C., Dragicevic, S., & Roberts, A. (2005). Integrating high resolution remote sensing , GIS and fuzzy set theory for identifying susceptibility areas of forest insect infestations. *International Journal of Remote Sensing*, 26(21), 4809–4828. doi:10.1080/01431160500239180
- Bone, C., Wulder, M. A., White, J. C., Robertson, C., & Nelson, T. A. (2013). A GIS-based risk rating of forest insect outbreaks using aerial overview surveys and the Local Moran ' s I Statistic. *Applied Geography*, 40, 161–170. doi:10.1016/j.apgeog.2013.02.011
- Bustillos-Herrera, A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & González-Guillen, M. de J. (2007). Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): Definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. *Agrociencia*, 41, 787–796.
- Chapman, T. B., Veblen, T. T., & Schoennagel, T. (2012). Spatiotemporal patterns of mountain pine beetle activity in the southern Rocky Mountains. *Ecology*, 93(10), 2175–2185. doi:10.1890/11-1055.1
- Chirinos, L. R., & Mallqui, C. G. (2016). Comparación entre interpoladores espaciales en el estudio de distribución de partículas sedimentables insolubles en la cuenca atmosférica de Lima y Callao. *Información Tecnológica*, 27(4), 111–120. doi:10.4067/S0718-07642016000400012
- Cibrián Tovar, D. (2014). *Guía para el monitoreo de plagas forestales a nivel comunitario, adecuada al contexto de la Sierra Rarámuri*. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), Proyecto de Reducción de Emisiones por la Deforestación y la Degradación de Bosques de México (Alianza México-REDD+), México, Distrito Federal.
- Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM]. (2015a). *Diagnóstico fitosanitario forestal del estado de Michoacán*. Morelia, Michoacán, México.
- Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM]. (2015b). *Inventario estatal forestal y de suelos Michoacán de Ocampo 2014*. Morelia, Michoacán, México.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427–2437. doi:10.1002/joc.3848
- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., ... Wotton, B. M. (2001). Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 51(9), 723–734. doi:10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2
- del-Val, E., & Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 20(2), 53–60. doi:10.1016/j.recqb.2017.04.006

- Dhar, A., Parrott, L., & Heckbert, S. (2018). Large scale biotic damage impacts on forest ecosystem services. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(8), 741–755. doi:10.1080/02827581.2018.1495256
- Eastman, J. R. (2016). TerrSet Geospatial monitoring modeling system. Worcester, MA: Clark University. Retrieved from <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Y. Sokona, S., Kadner, J. C., Minx, S., Brunner, S., ... Zwickel, T. (2014). *Resumen técnico. En: Cambio climático 2014; Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, E. Y. Sokona, S. Farahani, K. Kadner, A. Seyboth, ... J. C. Minx, Eds.). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., Romero, C. R., Conde, Á. A. C., & Trejo, V. R. I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudio de impactos, vulnerabilidad y adaptación.* Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM, INECC-SEMARNAT.
- Fettig, C. J., Klepzig, K. D., Billings, R. F., Munson, A. S., Nowak, J. T., Nebeker, T. . E., ... Nowak, J. T. (2007). The effectiveness of vegetation management practices for prevention and control of bark beetle infestations in coniferous forests of the western and southern United States. *Forest Ecology and Management*, 238(1–3), 24–53. doi:10.1016/j.foreco.2006.10.011
- Fisher, P. (2000). Fuzzy modelling. In S. Openshaw & R. J. Abraham (Eds.), *GeoComputation* (pp. 165–187). London and New York: Taylor & Francis.
- Fonseca, G. J., Llanderal, C. C., Cibrián, T. D., Equihua, M. A., & de los Santos, P. H. M. (2009). Secuencia de arribo de coleópteros en árboles de *Pinus montezumae* Lamb. dañados por incendios. *Rev. Ciencia Forestal En México*, 34(106), 149–170. Retrieved from <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/680/1687>
- Fragnière, Y., Forster, B., Hölling, D., Wermelinger, B., & Bacher, S. (2018). A local risk map using field observations of the Asian longhorned beetle to optimize monitoring activities. *Journal of Applied Entomology*, 142(6), 578–588. doi:10.1111/jen.12491
- Gómez, D. M., & Barredo, C. J. I. (2005). *Sistema de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2a ed.). Madrid, España: RA-MA.
- González-Hernández, A., Morales-Villafaña, R., Romero-Sánchez, M. E., Islas-Trejo, B., & Pérez-Miranda, R. (2018). Modelling potential distribution of a pine bark beetle in Mexican temperate forests using forecast data and spatial analysis tools. *Journal of Forestry Research*, 31(2), 649–659. doi:10.1007/s11676-018-0858-4

- Hawkins, C. D. B., Dhar, A., Balliet, N. A., & Runzer, K. D. (2012). Residual mature trees and secondary stand structure after mountain pine beetle attack in central British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 277, 107–115. doi:10.1016/j.foreco.2012.04.023
- Hicks Jr, R. R., Coster, J. E., & Mason, G. N. (1987). Forest insect hazard rating. *Journal of Forestry*, 85(10), 20–26. doi:10.1093/jof/85.10.20
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 211–228. doi:10.1016/j.ejor.2007.01.004
- Hrinkevich, K. H., Progar, R. A., & Shaw, D. C. (2016). Climate risk modelling of balsam woolly adelgid damage severity in subalpine fir stands of Western North America. *PloS One*, 11(10), 1–11. doi:10.1371/journal.pone.0165094
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2018). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825107017>
- Krist Jr, F. J., Sapio, F. J., & Tracz, B. M. (2007). *Mapping risk from forest insects and diseases. FHTET 2007*. Retrieved from [https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/FHTET2007-06\\_RiskMap.pdf](https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/FHTET2007-06_RiskMap.pdf)
- Krist Jr, F. J., Sapio, F. J., & Tracz, B. M. (2010). A multicriteria framework for producing local, regional, and national insect and disease risk maps. In J. M. Pye, M. Rauscher, Y. Sands, D. C. Lee, & J. S. Beatty (Eds.), *Advances in threat assessment and their Application to forest and rangeland management* (pp. 621–636). Retrieved from [https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/gtr802/Vol1/pnw\\_gtr802vol2.pdf](https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/gtr802/Vol1/pnw_gtr802vol2.pdf)
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of observer agreement for categorical data. 33(1), 159–174. doi:10.2307/2529310
- Lange, H., Økland, B., & Krokene, P. (2006). Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. *Interjournal for Complex Systems*, 1648, 1–10. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/228511956\\_Thresholds\\_in\\_the\\_life\\_cycle\\_of\\_the\\_spruce\\_bark\\_beetle\\_under\\_climate\\_change](https://www.researchgate.net/publication/228511956_Thresholds_in_the_life_cycle_of_the_spruce_bark_beetle_under_climate_change)
- López, G. V., Torres, H. B., Reséndiz, M. J. F., Sánchez, M. G., & Gijón, H. A. R. (2017). Influencia de parámetros climáticos sobre las fluctuaciones poblacionales del complejo *Dendroctonus frontalis* Zimmerman, 1868 y *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, 1909. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 7–29. doi:10.29298/rmcf.v8i41.24
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Ontario, Canada: John Wiley & Sons, inc.

- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A. M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., ... Schroeder, M. (2017). Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, *40*, 1426–1435. doi:10.1111/ecog.02769
- Martínez, P. J. E., Martín, M. J., & Román, S. E. (2000). Paisajes amenazados de la cuenca mediterránea: aplicación del SIG en el análisis de la dinámica de usos del territorio (1956-1998) en la Vall de Gallinera (Alicante-España). *Mediterránea. Serie de Estudios Biológicos, Época II*, *17*, 51–60. doi:10.14198/MDTRRA2000.17.06
- Mattson, W. J., & Haack, R. A. (1987). The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience*, *37*(2), 110–118. Retrieved from <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1054&context=barkbeetles>
- Morales-Rangel, A., Cambrón-Sandoval, V. H., Soto-Correa, J. C., Jones, R. W., & Obregón-Zuñiga, J. A. (2018). Efecto de la temperatura en poblaciones de *Dendroctonus frontalis* Zimmerman y *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) bajo un escenario de cambio climático en la Sierra Gorda queretana. *Acta Zoológica Mexicana*, *34*, 1–8. doi:10.21829/azm.2018.3412141
- Morris, J. L., Cottrell, S., Fettig, C. J., Derose, R. J., Mattor, K. M., Carter, V. A., ... Seybold, S. J. (2018). Bark beetles as agents of change in social – ecological systems. *Front Ecol Environ*, *16*(S1), 34–43. doi:10.1002/fee.1754
- Moser, J. C., Fitzgibbon, B. A., & Klepzig, K. D. (2005). The mexican pine beetle, *Dendroctonus mexicanus*: first record in the United States and co-occurrence with the southern pine beetle - *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Scolytidae or Curculionidae: Scolytinae). *Entomological News*, *116*(4), 235–243. Retrieved from <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/21320>
- Mott, D. G. (1963). The forest and the spruce budworm. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, *95*(31), 189–202. doi:10.4039/entm9531189-1
- Munda, G. (2012). *Multicriteria evaluation in a fuzzy environment: theory and applications in ecological economics*. Springer Science & Business Media.
- Negrón, J. F., Anhold, J. A., & Munson, A. S. (2001). Within-stand spatial distribution of tree mortality caused by the Douglas-Fir Beetle ( Coleoptera : Scolytidae). *Environmental Entomology*, *30*, 215–224. doi:10.1603/0046-225X-30.2.215
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... Hayes, D. (2011). A large a persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, *333*(2011), 988–993. doi:10.1126/science.1201609
- Pinzón, D., Cuéllar-Rodríguez, G., E., J., & González-Tagle, M. A. (2018). Efecto de la sequía en la distribución y densidad de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, 1905 en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(50), 463–478. doi:10.29298/rmcf.v9i50.256

- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & Mceachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. doi:10.1016/j.agee.2003.09.008
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G., & Romme, W. H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification : the dynamics of bark beetle eruptions. *BioScience*, 58(6), 501–517. doi:10.1641/B580607
- Raffa, K. F., Grégoire, J. C., & Lindgren, B. S. (2015). Natural history and ecology of bark beetles. In F. E. Vega & R. W. Hofstetter (Eds.), *Bark Beetles: biology and ecology of native and invasive species* (pp. 1–40). USA: Academic Press.
- Recchia, L., Boncinelli, P., Vieri, M., Cini, E., Garbati Pegna, F., & Sarri, D. (2011). *Multicriteria analysis and LCA techniques: With applications to agro-engineering problems*. Media, Springer Science & Business.
- Reygadas, P. D. D. (2016). *Servicios de consultoría para integrar dos Modelos de predicción de riesgo para las plagas exóticas forestales Sirex noctilio Fabricius y Anoplophora glabripennis (Motschulsky) en el territorio mexicano*. México.
- Robertson, C., Wulder, M. A., Nelson, T. A., & White, J. C. (2008). Risk rating for mountain pine beetle infestation of lodgepole pine forests over large areas with ordinal regression modelling. *Forest Ecology and Management*, 256(5), 900–912. doi:10.1016/j.foreco.2008.05.054
- Rubin-Aguirre, A., Saenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., Del-Rio-Mora, A. A., Tena-Morelos, C. A., & Campos-Bolaños, R. (2015). Bark beetle pests in an altitudinal gradient of a Mexican managed forest. *Forest Ecology and Management*, 343, 73–79. doi:10.1016/j.foreco.2015.01.028
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. USA: McGraw-Hil.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Modelos “spline” de climas contemporáneo, 2030, 2060 y 2090 para Michoacán, México. Impactos en la vegetación. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333–345. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/35-4.html>
- Salinas-Moreno, Y., Ager, A., Vargas, C. F., Hayes, J. L., & Zúñiga, G. (2010). Determining the vulnerability of Mexican pine forests to bark beetles of the genus *Dendroctonus Erichson* (Coleoptera : Curculionidae: Scolytinae). *Forest Ecology and Management*, 260, 52–61. doi:10.1016/j.foreco.2010.03.029
- Salinas-Moreno, Y., Mendoza, M. G., Barrios, M. A., Cisneros, R., Macias-Sámano, J., & Zúñiga, G. (2004). Areography of the genus *Dendroctonus* ( Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae ) in Mexico. *Journal of Biogeography*, 31, 1163–1177. doi:10.1111/j.1365-2699.2004.01110.x

- Salinas-Moreno, Y., Vargas, M. C. F., Zúñiga, G., Víctor, J., Ager, A., & Hayes, J. L. (2010). *Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género Dendroctonus (Curculionidae: Scolytinae) en México*. México: Instituto Politécnico Nacional-Comisión Nacional Forestal.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2017). *Anuario estadístico de la producción forestal 2017*. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/542586/2017.pdf>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., ... Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Publishing Group*, 7(6), 395–402. doi:10.1038/nclimate3303
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Shah, S. A. A., Solangi, Y. A., & Ikram, M. (2019). Analysis of barriers to the adoption of cleaner energy technologies in Pakistan using Modified Delphi and Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1037–1050. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.020
- Shore, T. L., Safranyik, L., & Whitehead, R. J. (2006). *Principles and concepts of management*. (L. Safranyik & B. Wilson, Eds.), *The mountain pine beetle a synthesis of biology, management, and impacts on lodgepole Pine*. Victoria, BC Canada. Retrieved from <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/library/documents/bib96122.pdf>
- Silva-Gallegos, J. J., Aguirre-Salado, C. A., Miranda-Aragón, L., Sánchez-Díaz, G., Valdez-Lazalde, J. R., Pedroza-Carneiro, J. W., & Flores-Cano, J. A. (2016). Locating potential zones for cultivating *Stevia rebaudiana* in Mexico: Weighted linear combination approach. *Sugar Tech*, 19(2), 206–218. doi:10.1007/s12355-016-0446-x
- Six, D. L., & Brancewell, R. (2015). *Dendroctonus*. In F. E. Vega & R. W. Hofstetter (Eds.), *Bark Beetles: biology and ecology of native and invasive species* (pp. 305–350). Academic Press.
- Šmelko, Š., & Merganič, J. (2008). Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia. *Journal of Forest Science*, 2008(10), 476–483. doi:10.17221/26/2008-JFS
- Soto-Correa, J. C., Avilés-Carrillo, I., Giron-Gutiérrez, D., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2019). Abundancia altitudinal de *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae) en relación a variables climáticas en Hidalgo, México. *Revista de Biología Tropical*, 67(3), 370–379. doi:10.15517/RBT.V67I3.34436
- Tienwong, K., Dasananda, S., & Navanugraha, C. (2009). Integration of land evaluation and the analytical hierarchical process method for energy crops in Kanchanaburi, Thailand. *ScienceAsia*, 35, 170–177. doi:10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.170

- United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service. (2018). *The summary of areas with tree mortality from bark beetles in the Western US from 2000 – 2017*. Retrieved from [https://www.fs.fed.us/foresthealth/applied-sciences/news/2018/wbb\\_summary.shtml](https://www.fs.fed.us/foresthealth/applied-sciences/news/2018/wbb_summary.shtml). Consultado el 28-06-2020
- Vázquez, C. I., Sánchez-Martínez, G., & Madrigal, H. S. (2007). Fluctuación poblacional de de *Dendroctonus mexicanus* Hopk. bajo dos condiciones de manejo forestal en Michoacán, México. *Rev. Ciencia Forestal En México*, 32(102), 57–77. Retrieved from <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/750>
- Waring, K. M., Reboletti, D. M., Mork, L. A., Huang, C.-H., Hofstetter, R. W., Garcia, A. M., ... Davis, T. S. (2009). Modeling the impacts of two bark beetle species under a warming climate in the southwestern USA : ecological and economic consequences. *Environmental Management*, 44(4), 824–835. doi:10.1007/s00267-009-9342-4