



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Instituto de Arquitectura Diseño y Arte

“DINÁMICA TEMPORAL DE LA ACTIVIDAD VEGETAL EN ZONAS DEGRADADAS POR *Ips confusus* EN BOSQUE DE *Pinus cembroides*: REGIÓN CENTRAL DE CHIHUAHUA (2000-2014).”

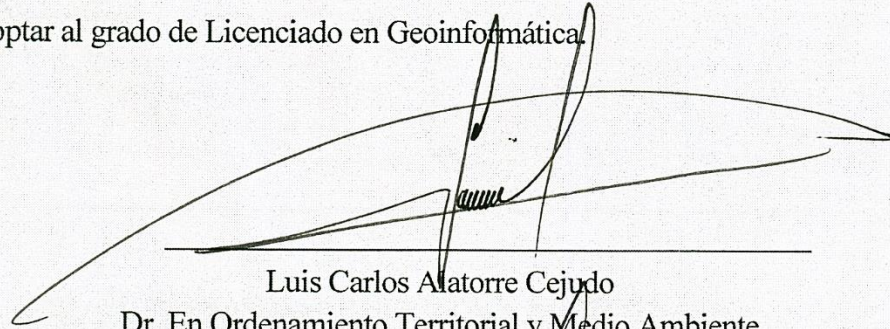
Proyecto de titulación que presenta:

Juan Diego Maldonado Marín

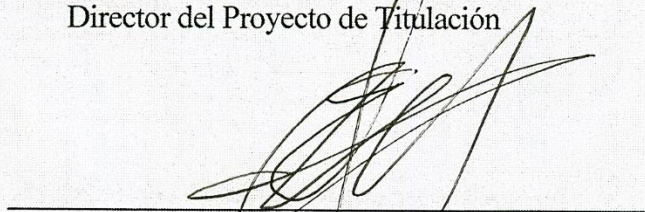
Como requisito parcial para obtener al grado de:

Licenciado en Geoinformática

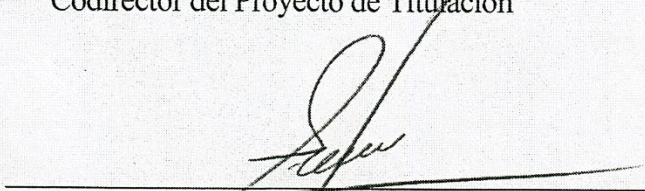
Este proyecto de titulación fue aceptado por el comité revisor designado por la academia del programa de Geoinformática de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, como requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Geoinformática.



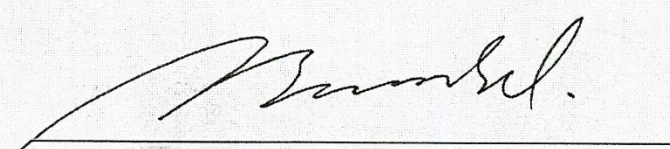
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Dr. En Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
Director del Proyecto de Titulación



María Elena Torres Olave
Dra. En Ciencia y Tecnología Ambiental
Codirector del Proyecto de Titulación



Erick Sánchez Flores
Dr. En Geografía
Sinodal Titular



Alfredo Granados Olivas
Dr. En Agronomía
Sinodal Titular



Luis Carlos Bravo Peña
Dr. En Ciencias Opción en Desarrollo Regional
Sinodal Suplente

DEDICATORIA

Con admiración y respeto a mis padres: Beatriz Marín y Efraín Maldonado, quienes me han apoyado incondicionalmente con su esfuerzo, consejos y enseñanzas. Gracias a su ejemplo de constante dedicación he logrado salir adelante y llegar a la meta. A mi hermano Javier Maldonado, quien siempre ha permanecido cerca. Agradezco también a mi abuela Eva Guaderrama por ese gran cariño que siempre me ha brindado y a mi abuelo José María Marín, que en paz descanse.

Dedico este trabajo a toda mi familia, ellos siempre confiaron en mí y me dieron esta oportunidad de superación.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, porque me dio la vida y con ello la oportunidad de llegar hasta donde estoy.

Agradezco a todos aquellos que de manera directa o indirectamente han colaborado para que pueda terminar mi carrera profesional y realizar mi proyecto de titulación, de forma especial a mi director de tesis: Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo, a mi codirectora: Dra. María Elena Torres Olave, por el seguimiento, tiempo, orientación y confianza que depositaron en mí para el desarrollo de este trabajo. También a cada uno de mis profesores durante todo el trayecto en mi estancia universitaria tanto en la UACJ, UNAM y UMSNH, porque me llevaron hacia el camino correcto en el aspecto académico y de investigación.

Al personal académico y administrativo de la UACJ en Cuauhtémoc, en especial al Lic. Gerardo Ledezma Sánchez, gracias por todo.

A mis compañeros de clase: Jessica Cera, Amalia Mendoza, Adrián Sáenz, Sergio Vázquez, Luis Jesús Moreno y David Rivera, gracias a ellos por estar a lo largo de esta etapa y por brindarme su amistad. Logramos salir adelante a pesar de los retos presentados.

Agradezco también a mis compañeros de trabajo, que me demostraron su amistad con cada detalle por más mínimo que este fuese. A todas las personas que pertenecen a mi vida, que me brindan su amistad incondicional, aquellos que se encuentran dentro y fuera de la universidad: gracias.

DINÁMICA TEMPORAL DE LA ACTIVIDAD VEGETAL EN ZONAS DEGRADADAS POR *Ips confusus* EN BOSQUE DE *Pinus cembroides*: REGIÓN CENTRAL DE CHIHUAHUA (2000-2014).

Juan Diego Maldonado Marín¹

Resumen. Se analizó la evolución temporal de la actividad vegetal en áreas de pino piñonero (*Pinus cembroides*), que está siendo afectada por una plaga de descortezadores (*Ips confusus*) en el estado de Chihuahua, México. Se realizó un análisis multitemporal de imágenes Landsat 5 TM, 7 ETM y 8 OLI, para un periodo comprendido entre el año 2000 y 2014. Como resultado en la cartografía de cobertura y uso de suelo se identificó que el área afectada de pino piñonero es de 95 hectáreas. Además, la serie de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) muestra una tendencia negativa de la actividad vegetal a partir del año 2011. El análisis multivariante demostró que los inviernos más cálidos pueden ser

un factor para la aparición de la plaga, el análisis Mann-Kendall espacialmente distribuido confirma la pérdida de cubierta vegetal a través de la serie de NDVI. Las modelaciones del nicho con MaxEnt demostraron el área de distribución potencial del *Pinus cembroides* y el *Ips confusus* y se encontró una coincidencia entre la distribución de la plaga y la zona afectada, pudiendo validar lo observado con lo predicho por el modelo en cuanto a la identificación de zonas vulnerables de afectación de la plaga en el bosque de pino piñonero en Chihuahua.

Palabras clave: *Sensoría remota, análisis multitemporal, NDVI, Máxima Entropía*

DYNAMIC TEMPORAL OF VEGETATION ACTIVITY IN AREAS DEGRADED BY *Ips confusus* IN FOREST OF *Pinus cembroides*: CENTRAL REGION OF CHIHUAHUA (2000-2014).

Abstract. The study shows the temporal evolution of vegetal activity in areas covered by pino piñonero (*Pinus cembroides*), attacked by an infestation of *Ips confusus* in the Mexican state of Chihuahua. An image analysis-based multitemporal Landsat 5 TM, and a 7 ETM and 8 OLI were performed between 2000 and 2014. It was possible to identify in the resultant mapping that the affected area is 95 hectares wide. Plus, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) shows a negative tendency of vegetation activity since 2011. The multivariate analysis showed that the warmest winters could be a factor in the appearance of the plague, the Mann-Kendall

analysis spatially distributed confirms the loss of vegetation cover through the NDVI series. The modeling with MaxEnt demonstrated the potential area of *Pinus cembroides* and *Ips confusus* distribution. We found coincidences between the distribution of the plague and the affected area, and we validate what was observed with those predictions by the modeling in terms of identification of the vulnerable areas where the plague may affect the forest of *Pinus cembroides* in Chihuahua.

Keywords: *Remote sensing, multi-temporal analysis, NDVI, Maximum Entropy.*

¹ Licenciatura en Geoinformática. Unidad Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac, Km 3.5, C.P. 31600, Chihuahua, México.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad son varios problemas que afectan a las regiones forestales de México, principalmente incendios, sequías, deforestación, plagas (Meneses, 2011) y cambios en el régimen de las temperaturas máximas y mínimas, entre muchos otros (Alatorre, *et al.*, 2014). En México existe una especie de pino que presenta la mayor distribución en todo el país, nombrado científicamente como *Pinus cembroides* y comúnmente conocido como pino piñón o pino piñonero. Se extiende tanto en la Sierra Madre Oriental, con presencia en los estados de Nuevo León, Coahuila, San Luís Potosí, Querétaro e Hidalgo, como en la Sierra Madre Occidental, desde los estados de Zacatecas, Durango, Chihuahua y Sonora (CONAFOR, 2014).

Esta especie es de gran importancia ecológica, se desarrolla en laderas con pendientes abruptas, secas, rocosas y al pie de las montañas. Tarda varios años en fructificar por primera vez, sin embargo, algunas de las ventajas es que evita la erosión de las laderas y permite la infiltración del agua, lo que ayuda al restablecimiento de los mantos acuíferos, además, es tolerante a las heladas, sequías y temperaturas elevadas. Una desventaja es que es susceptible a daños por plagas y enfermedades (CONAFOR, 2014).

Desde años atrás el *Pinus cembroides* ha presentado una grave problemática ya que muestra procesos de degradación por distintos factores (Flores, *et al.*, 2003), por ejemplo hongos y plagas de insectos raiceros, defoliadores, carpófagos, descortezadores y barrenadores (Mendoza, *et al.*, 2011), que en cierta medida han comenzado a disminuir sus poblaciones. De forma específica el descortezador *Ips confusus*, que se desarrolla de forma natural en los bosques de coníferas, es necesario para el funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, en respuesta a factores abióticos de

estrés puede aumentar su densidad a niveles que alteran los procesos ecológicos del bosque, en específico del *Pinus cembroides* (Ojeda, 2010). Las plagas tienen un efecto cíclico natural, la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas e incendios forestales, factores que debilitan a los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar, *et al.*, 2013).

En la Sierra Madre Occidental se ha presentado el ataque de descortezadores en los bosques de pino piñonero en forma dispersa en el estado de Chihuahua, existe presencia de los descortezadores en distintos municipios. Desde el 2012 la CONAFOR recibió reportes dónde el insecto invadió predios en Balleza, extendiéndose a territorios forestales de Nonoava, Carichí, Bocoyna, Guerrero, Riva Palacio, Madera, Cusihuirachi, Cuauhtémoc y Chihuahua, en total 18 ejidos, 10 propiedades privadas, una colonia agrícola y un parque nacional se vieron afectados. Los insectos afectaron varias hectáreas de pinos generando una mortalidad severa (CONAFOR, 2014).

La relevancia en este proyecto está dada por la reciente aparición del *Ips confusus* en una región al norte del municipio de Cuauhtémoc, en el estado de Chihuahua (Maldonado, *et al.*, 2013). En forma específica en Colonia Chupaderos, localizado en el noreste del municipio, distinguido por tener tanto terrenos agrícolas como forestales, presenta una grave afectación en el bosque de *Pinus cembroides*, y sin duda la pérdida de éste puede traer graves consecuencias económicas y ecológicas para la región. Entre las afectaciones económicas está la baja producción de la semilla de piñón, que tiene un gran valor económico, además la creciente pérdida produce una afectación del ecosistema del bosque de la región (García & Cibrián, 2011).

Para el estudio de esta problemática las nuevas herramientas tecnológicas, como los sistemas de

percepción remota, son de gran ayuda porque permiten adquirir información sobre algún objeto o fenómeno a distancia sin tener un contacto directo (Chuvienco, 1995). Para lograr identificar ciertas coberturas de uso de suelo se pueden aplicar métodos como lo es la clasificación supervisada (Loya, *et al.*, 2011).

Se puede dar seguimiento a las variaciones que ha tenido ésta especie a través de imágenes de satélite e índices de vegetación. Algunas imágenes de satélite de la serie Landsat generan información de gran interés para el seguimiento de la vegetación a escala regional, la resolución temporal al obtener imágenes cada 16 días permite plantear un seguimiento continuo en los cambios de la vegetación en cuanto a su verdor y actividad fotosintética aplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Ceroni, *et al.*, 2013).

Existen diversos estudios donde se han aplicado distintas metodologías mediante imágenes satelitales (Chuvienco, 1988) a través de las cuales se detectan los cambios estacionales que se presentan en la vegetación (Gómez, 2005). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, se calcula a partir de las diferencias entre la región del espectro electromagnético del rojo (0.6-0.7 micrómetros) y del infrarrojo cercano (0.7-2.0 micrómetros) (SEMAR, 2012), se presenta en valores que van del -1 a +1 (Meneses, 2001), permitiendo conocer el estado de vigor vegetal de grandes superficies, detectando fenómenos de amplio rango de variación (Iglesias, *et al.*, 2010).

Por otro lado, el generar modelos que permitan observar la distribución de las especies para determinar el nicho ecológico (Fierro, 2013), también es posible para identificar el área de

dispersión de las plagas forestales y permite observar la tendencia de propagación además delimitar las áreas potenciales de ocurrencia. Actualmente uno de los modelos más empleados para este propósito es el de Máxima Entropía, que modela la distribución geográfica de las especies, utilizando como datos sólo los sitios de presencia y las variables bioclimáticas asociadas a cada uno de esos puntos de presencia (Pérez, 2014).

Todos los métodos mencionados en combinación con los sistemas de información geográfica, permiten de una mejor manera realizar el análisis en la zona afectada.

Descripción de la especie

La especie de pino afectada es de nombre común pino piñón, género *Pinus* y especie *cembroides*. El pino piñonero es una especie originaria de México y se extiende al sur de los Estados Unidos, es un árbol de 5 a 10 metros, llegando a medir hasta 15 metros de altura; es de ramas ascendentes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo. Es una especie de lento crecimiento. Los árboles tardan varios años en fructificar por primera vez, de unos 30 a 36 meses y la producción de la semilla es cada 5 ó 6 años. Se encuentra en asociación con los bosques de coníferas y es una de las especies de pino con mayor distribución en México (CONAFOR, 2011).

Sus requerimientos ambientales son en rangos de altitud en valores medios que van de 2100 m a 3100 m; en temperatura con rangos de -7 °C a 42 °C con una media de 17.9 °C; en precipitación los rangos se presentan desde 365 a 800 mm anuales (CONAFOR, 2011). De acuerdo al estudio presentado por (Flores, *et al.*, 2003), dentro de los aspectos ambientales bióticos que afectan al *Pinus cembroides* se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Plagas presentes en *Pinus cembroides*

Hospedero	<i>Pinus cembroides</i>			
Insectos raiceros	<i>Gallina ciega Phyllophaga sp.</i>			
Insectos defoliadores	<i>Gusanos de bolsa Lophocmpa cibarini</i>	<i>Tetralopha sp.</i>	<i>Aphis sp.</i>	<i>Pineus sp.</i>
Insectos carpófagos	<i>Conophthorus cembroides</i>	<i>Leptoglossus occidentales</i>	<i>Eucosoma bobana</i>	<i>Cecidomyia sp.</i>
Insectos descortezadores	<i>Ips confusus</i>	<i>Dendroctonus appropinquatus</i>	<i>Pityophthorus sp.</i>	
Barrenador de yemas y brotes	<i>Retinia arizonaensis</i>	<i>Conophthorus terminalis</i>	<i>Dioryctria sp.</i>	

Proceso de afectación

El descortezador *Ips confusus* es el que más daño causa en los pinos piñoneros, se tienen registros de distribución únicamente en Baja California, Chihuahua, Coahuila, Hidalgo y San Luis Potosí. Presentan un ciclo de vida muy particular ya que existen de tres a cuatro generaciones por año, provocando daños de mayor manera en árboles moribundos, recién muertos en pie, árboles recién caídos y trocería recién cortada. Bajo condiciones favorables para los insectos, éstos pueden matar árboles aparentemente sanos, caso en el que prefieren los árboles maduros. Cuando atacan árboles recién muertos se observan acumulaciones de aserrín rojizo en las hendiduras de la corteza, en cambio cuando infestan árboles vivos los ataques quedan marcados por un grumo de resina blanquecino o rojizo. Las infestaciones del descortezador se presentan en las ramas y en la parte alta del fuste (Cibrián, 1995).

Los síntomas se manifiestan con un cambio de color de verde a amarillento. En otros estudios demuestran que los síntomas observados fueron la marchitez de los brotes nuevos tomando una coloración verde pálido, posteriormente se tornaron amarillentos y por último rojizos. Las

acículas que tomaron esta coloración se desprendieron fácilmente del tallo. Las raíces fueron escasas presentaron pudrición y se quebraron fácilmente, el tallo no presentaba resinación pero sí pudrición (Mendoza, *et al.*, 2011). El pino se degrada en poco tiempo, provocando la pudrición de la base y consecuentemente secándose por completo, no permitiendo la recuperación de la especie. Las muestras tomadas en campo en noviembre del 2014 demuestra la gran población de estos insectos (Figura 1).



Figura 1. *Ips confusus*. Muestra tomada el 2 de noviembre del 2014

El descortezador se puede identificar por etapa de madurez, los que se encuentran en tonalidad negro son aquellos de edad adulta y que están en etapa de reproducción, mientras que los descortezadores en tonalidad café y amarillenta son los que aún están preparándose para la etapa de reproducción. La muestra fue tomada en un sólo pino piñonero, retirando la corteza de una superficie aproximada de 0.20 m². Las fotografías tomadas en campo en verano del 2014 demuestran de forma clara el

proceso de afectación. En la Figura 2.A el bosque sano, característico por las hojas aciculares en tonalidades verdes y un denso dosel forestal, la Figura 2.B presenta el *Pinus cembroides* en tonalidades amarillentas, indicando el inicio del daño. Por último la Figura 2.C presenta la fase final de la afectación, donde la población de pinos ya no presenta actividad fotosintética y sin recuperación alguna.



Figura 2. A) Bosque de *Pinus cembroides* sano. B) Bosque de *Pinus cembroides* con fase de afectación intermedia. C) Bosque de *Pinus cembroides* seco por plaga

El presente proyecto de investigación aborda una temática de gran relevancia en la actualidad, se aborda por medio de técnicas de sensoría remota, SIG y modelado de nicho ecológico. Es de vital importancia dar un seguimiento a la problemática planteada, ya que en la zona de estudio no se ha presentado ningún interés por parte de las dependencias encargadas de controlar estos procesos de degradación forestal.

Es de vital importancia, poder dar un diagnóstico sobre la evolución temporal de los procesos de degradación y el orden de magnitud (velocidad de propagación), para poder evitar que zonas similares puedan ser afectadas. Si bien la comunidad no es de gran interés turístico, o de gran calado forestal para la extracción de recursos maderables, el bosque que existe en la región si presenta beneficios, en primer lugar el bienestar del ecosistema y en segundo lugar la economía para los habitantes de la comunidad que se dedican

a la recolección de las semillas de piñón que produce el pino piñonero.

Realizar la investigación fue factible ya que la zona es de fácil acceso y no implicó grandes costos de traslado para realizar el trabajo de campo, mientras que la información de gabinete necesaria también se puede adquirir, ya que únicamente se adquirió imágenes satelitales de acceso gratuito del servidor web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y a partir de ellas se realizaron ciertos procedimientos y análisis.

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar la evolución temporal y espacial de la actividad vegetal en la especie de *Pinus cembroides* aplicando sistemas de percepción remota y sistemas de información geográfica, para caracterizar el proceso de degradación a causa del descortezador *Ips confusus*. Para ello se

establecieron de forma específica los siguientes objetivos:

- Generación de un mapa de cobertura y uso de suelo a partir de una clasificación supervisada aplicando el clasificador de máxima verosimilitud (MAXLIKE).
- Obtener una serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), mediante imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, en un periodo de 14 años (2000-2014).
- Analizar la evolución temporal del NDVI durante dos años distintos (2000 y 2014), para observar las variaciones estacionales y compararlos.
- Graficar la tendencia del NDVI, tanto en forma anual como estacional.
- Comparar la tendencia del NDVI con variables de precipitación y temperatura.
- Modelar el nicho ecológico para *Pinus cembroides* y el descortezador *Ips confusus*, para estimar áreas potenciales de esparcimiento utilizando el software Maxent.
- Identificar zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua.

Con los objetivos mencionados anteriormente se estableció la siguiente hipótesis: “La utilización de una serie temporal de NDVI permite determinar la variación temporal y espacial de los procesos de degradación que actualmente aquejan al bosque de pino piñonero en Chihuahua. Además mediante modelos de máxima entropía es posible identificar el nicho ecológico del pino piñonero y el descortezador *Ips confusus* para verificar su coincidencia espacial.”

METODOLOGÍA

Área de estudio

La zona de estudio se localiza en la región noreste del municipio de Cuauhtémoc en el estado de Chihuahua, el poblado donde se realiza el proyecto se localiza en las coordenadas geográficas 28°55'40" N y -106°50'17" O. Limita al Oeste con propiedades privadas, al Norte y Este con terrenos agrícolas pertenecientes a Colonia Chupaderos y al sur con el municipio de Riva Palacio (Figura 3). El área comprende una extensión de 1030 hectáreas, con una altura promedio de 2200 msnm, entre las que se encuentran zonas de pastizales y bosque en asociación de pino-encino.

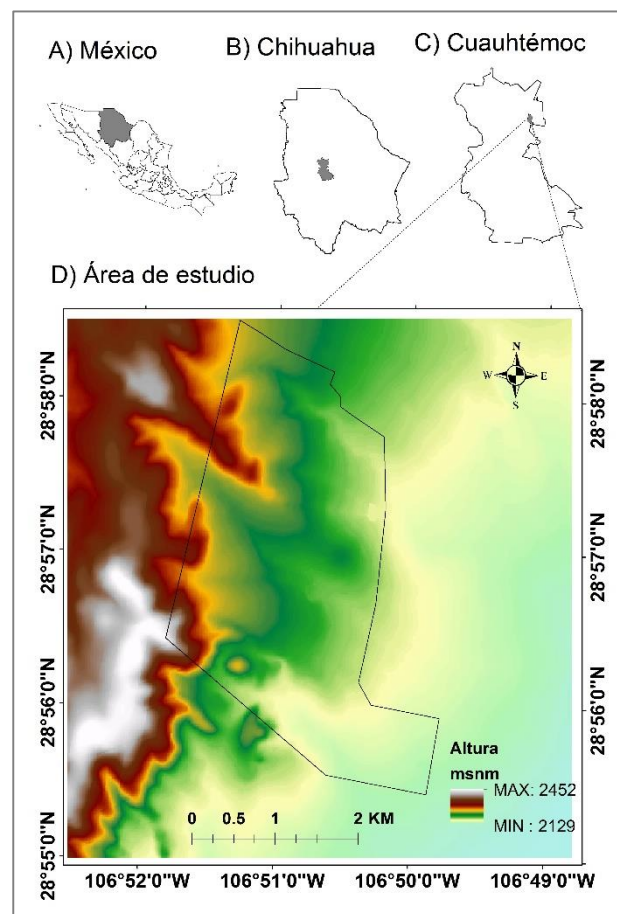


Figura 3. Localización del área de estudio

Datos del Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED, 2014) describen las características del medio físico propias del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. La orografía, comprende la subprovincia fisiográfica, sierras y llanuras tarahumaras, de la provincia denominada Sierra Madre Occidental. El relieve en el área de Colonia Chupaderos se conforma de serranías y llanuras con lomeríos en alturas que van de los 2152 a 2442 msnm.

En cuestiones de hidrografía, el agua superficial se localiza básicamente en pequeños cuerpos de agua superficial, no cuenta con ríos pero la zona es atravesada por varios arroyos, donde la mayor parte de ellos sólo llevan agua en temporada de lluvias, perteneciendo en su totalidad a la vertiente interior, formada por la cuenca de la Laguna de Bustillos. El clima es considerado de transición, de semihúmedo a templado, con temperatura media anual de 14°C, una máxima de 22°C y una mínima de 4°C. La precipitación pluvial media anual es de 440-500 milímetros y un promedio anual de 66 días de lluvia (García, 2014).

La vegetación existente consta de pastos, cactáceas, arbustivas y herbáceas. En el ecosistema de la fauna se encuentran aves migratorias, guajolotes, correcaminos, paloma de collar, conejo, venado cola blanca, puma, gato montés y coyote. La región se encuentra ocupada por bosque de pino, pino-encino, encino y regiones aisladas de táscate (INAFED, 2014).

El tipo de suelo es ocupado en su mayoría por el tipo feozem, que significa tierra parda y se caracteriza por tener una marcada acumulación de materia orgánica en la parte superior del suelo, por lo cual son suelos fértiles y soportan una gran variedad de cultivos, así como pastizales, también se encuentra el planosol y el litosol, que son suelos de piedra. (Alatorre, *et al.*, 2014).

Selección y preparación de la base de datos

Para la elaboración de la clasificación de cobertura y uso de suelo a través de métodos de clasificación supervisada, se trabajó con la imagen perteneciente al sensor Landsat 8 OLI, con fecha de adquisición del 5/03/2014. Para la construcción de la serie temporal de imágenes Landsat, se obtuvieron las imágenes satelitales del servidor de USGS (<http://glovis.usgs.gov/>), las imágenes corresponden a distintos sensores, entre ellos Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI. Todas con una resolución espacial en la banda pancromática de 15 metros y la multiespectral de 30 metros, además de una resolución temporal de 16 días (INEGI, 2014). Las imágenes seleccionadas para la serie temporal se encuentran en la proyección UTM (Universal Transversal Mercator) zona 13 N, *Path/Row* 33/40, las cuales corresponden a los meses de marzo y abril, meses de inicio de la primavera, para el periodo 2000-2014.

Tabla 2. Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio para identificar la dinámica vegetal en el periodo comprendido del 2000-2014.

Imagen	Sensor	Fecha adquisición
1	Landsat 5 TM	01/05/2000
2	Landsat 5 TM	17/03/2001
3	Landsat 5 TM	01/04/2003
4	Landsat 5 TM	09/03/2004
5	Landsat 5 TM	11/03/2007
6	Landsat 5 TM	11/03/2008
7	Landsat 5 TM	16/03/2009
8	Landsat 5 TM	19/03/2010
9	Landsat 5 TM	07/04/2011
10	Landsat 8 OLI	19/04/2013
11	Landsat 8 OLI	19/02/2014

Por otra parte, se realizó un análisis interanual, con la finalidad de observar el comportamiento de la vegetación en las distintas estaciones del año. Para ello se obtuvieron imágenes de forma estacional, es decir desde enero hasta diciembre, para los años 2000 y 2014 (Tabla 3), se presentaron algunos meses que están descubiertos de información, esto debido a la presencia nubosa en la temporada de lluvias.

Para la correcta utilización de las imágenes fue necesario realizar algunas correcciones. Una de ellas es la corrección atmosférica, este tipo de correcciones eliminan los ruidos causados a la señal que llega al sensor del satélite luego de haber atravesado la atmósfera, el efecto de distorsión de la señal produce errores en la localización de los niveles digitales (ND) de los píxeles. Además, pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de forma que no coincida con el tono, posición y tamaño de los objetos (Chuvieco, 1995). La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas, por lo que estos pueden ser sustanciales y deben ser corregidos, para ello se aplicó a cada una de las imágenes una corrección con el módulo ATMOSC del Software IDRISI (Brzuela, *et al.*, 2007)

Tabla 3. Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio para identificar la dinámica vegetal de forma estacional para los años 2000 y 2014.

Imagen	Landsat 5 TM Año 2000	Landsat 8 OLI Año 2014
1	10/01/2000	16/01/2014
2	27/02/2000	17/02/2014
3	14/03/2000	05/03/2014
4	15/04/2000	08/05/2014
5	06/09/2000	15/10/2014
6	09/11/2000	16/11/2014

Una vez que las imágenes fueron corregidas atmosféricamente, se aplicó un proceso de georreferenciación, esto es utilizando puntos de control para garantizar que coincidan las áreas con las imágenes, para luego proceder a recortar el área de estudio con base al polígono delimitado anteriormente.

Para desarrollar la modelación de la presencia de la especie del descortezador *Ips confusus* en la especie de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua se trabajó con puntos de ocurrencia derivada del *Global Biodiversity Information Facility* (<http://data.gbif.org/occurrences>).

Primeramente para la especie de *Pinus cembroides* se obtuvieron los puntos de presencia para todo México, posteriormente la base de datos fue depurada, seleccionando los registros dentro de Chihuahua, además de eliminar aquellos duplicados. La base de datos original contaba con un total de 599 ocurrencias de *Pinus Cembroides*, la base de datos final cuenta con 26 puntos, a ésta base de datos se le agregaron puntos tomados en campo y proporcionados por la CONAFOR.

Para la generación de la base de datos del *Ips confusus* se elaboró a partir de registros presentes en el estado de Chihuahua, datos proporcionados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en los años 2012 y 2013, además de puntos tomados de igual forma en campo dentro del área de estudio.

Para la modelación del nicho ecológico se adquirieron variables bioclimáticas de WolrdClim: (<http://www.worldclim.org/current>). También fue adquirido un modelo digital de elevaciones del que se derivaron diferentes variables topográficas (Hijmans, *et al.*, 2005).

Elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo

Para el correcto funcionamiento del algoritmo de clasificación es preciso establecer un conjunto de

categorías que represente de forma adecuada la variabilidad de las cubiertas presentes en la totalidad del área de estudio (Alatorre, *et al.*, 2014).

El procedimiento consiste en la definición de categorías temáticas, de igual forma la creación de áreas de entrenamiento representativas de las coberturas vegetales y uso de suelo, se establecen con base en el conocimiento previo del área de estudio y los puntos de control tomados en campo las siguientes categorías: bosque de pino, bosque de pino seco, bosque de pino-encino, pastizales, cuerpos de agua y zona agrícola.

La imagen utilizada para la clasificación supervisada corresponde al sensor Landsat 8 con fecha de adquisición 5/3/2014, cuenta con una resolución espacial de 30 metros en la banda multiespectral. El software a utilizar es IDRISI (Versión Selva), con el módulo conocido como MAXLIKE, éste genera una clasificación de máxima probabilidad de los datos de teledetección basado en la información contenida en un conjunto de archivos de firmas espectrales. Los píxeles se asignan a la clase más probable sobre la base de una comparación de la probabilidad posterior de que puede pertenecer a cada una de las firmas espectrales que se consideren (IDRISI, 2014).

Posteriormente se aplicó una validación a través de una matriz de confusión (Congalton, 1991), esto a partir de puntos tomados en campo y por fotointerpretación en imágenes de alta resolución proporcionadas por Google Earth

Construcción de la serie temporal del NDVI

Para realizar el análisis temporal de la actividad vegetal se construyó una serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Éste índice arroja valores estimados del verdor del bosque que resultan del análisis de datos espectrales obtenidos mediante imágenes de satélite, se parte de la premisa que el NDVI representa un indicador de la salud de la

vegetación del ecosistema, mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, arrojando valores de la intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud. Es un índice adimensional, y sus valores van de -1 a +1 (Meneses, 2001).

Los valores del índice que se encuentran por debajo del cero, representan cuerpos de agua y suelo descubierto, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de bosque, pastizal y actividad agrícola. Las series temporales del NDVI fueron obtenidas a partir de las imágenes Landsat, con el propósito de monitorizar la actividad vegetal. El NDVI debe ser calculado como se muestra en la ecuación 1 (Rouse, *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde ρ_{IR} es la reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y ρ_R es la reflectividad en la región del rojo.

Construcción de las series temporales de variables climáticas

La actividad vegetal se puede ver afectada por factores climáticos como disminución de la precipitación y temperaturas mínimas y máximas extremas. Para determinar el efecto de estos factores sobre las tendencias temporales de la actividad vegetal se creó una serie temporal de variables climáticas (Medina & Miramontes, 2014).

Para la obtención de la base de datos, se adquirió información existente en estaciones climatológicas pertenecientes a la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>). Estas estaciones se encuentran en operación desde el año 2000 hasta la actualidad, recogiendo información

diaria de diversas variables climatológicas. Para el presente trabajo se utilizó la información de la estación ubicada en Col. Álvaro Obregón, Mpio. Cuauhtémoc (Latitud: 28° 45' 56.6" N y Longitud: 106° 55' 03.3" O), localizada a 20 km en línea recta al suroeste de la zona de estudio que es Colonia Chupaderos.

La estación meteorológica genera la información de las siguientes variables climatológicas: i) precipitación media anual (PMA; mm año⁻¹); ii) temperatura media anual (TMA; °C); iii) temperatura mínima media anual (TMINA; °C) y iv) temperatura máxima media anual (TMAXA; °C) (García, 2014).

Análisis estadístico NDVI vs Variables Climáticas

Las series temporales de NDVI para las distintas coberturas presentes en el área de estudio fueron analizadas para determinar la presencia de tendencias temporales estadísticamente significativas, para ello se utilizó la correlación de Spearman contra el tiempo (Alatorre, *et al.*, 2010). Este tipo de análisis permite observar la dinámica vegetal en términos de incremento (correlación positiva) y un descenso de la actividad (correlación negativa).

Como un paso previo para analizar los efectos del clima sobre la actividad vegetal se realizó un análisis de correlación para determinar cuál de las series se ajusta mejor a los datos observados de NDVI. Para ello, las precipitaciones totales y las temperaturas máximas/mínimas medias se calcularon a partir de la serie diaria original, sumando los valores diarios durante el periodo inmediatamente anterior a la fecha de cada imagen. Así, las series climáticas se calcularon para los siguientes periodos previos a la fecha de la imagen: 15 días, 30 días, 3 meses (Enero, Febrero y Marzo para las imágenes de Marzo) y 6 meses (de Marzo a Agosto).

La prueba de Spearman permite detectar la presencia de tendencias temporales en las series de NDVI, pero no identifica los factores implicados. Por ello, una vez que se determinó cuál de las series mencionadas tienen un mejor ajuste, se procedió a aplicar una regresión multivariante de los valores medios de NDVI contra las variables climáticas en cada una de las coberturas (Medina & Miramontes, 2014), para así determinar el grado de control que ejerce el clima sobre la actividad vegetal.

Análisis espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI

Para realizar un análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, la regresión multivariante se repitió píxel a píxel para toda la región. Esto para obtener un mapa espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI que no pueden ser explicadas por las variables climáticas, y así identificar las áreas que experimentan procesos de degradación o recuperación vegetal. Para esto se aplicó el análisis Mann-Kendall, en el software IDRISI (Versión Selva).

La estadística Mann-Kendall es la frecuencia relativa de aumentos menos la frecuencia relativa de disminuciones, todas las combinaciones de pares de valores a través del tiempo son evaluadas en cada píxel y se realiza tomando en cuenta los números que están aumentando o disminuyendo con el tiempo; en esta estadística la serie de tiempo es la variable dependiente y el tiempo es la variable independiente (Santana, *et al.*, 2013).

Modelación para la presencia y propagación del descortezador *Ips confusus* en las regiones de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua

La presencia de los descortezadores en los bosques de pino puede ser modelado a través del software Maxent, este método permite determinar el nicho

ecológico y las áreas de distribución (CONABIO, 2014). El funcionamiento de MaxEnt se basa en tomar una lista de ubicaciones de presencia de especies como datos de entrada, además de un conjunto de predicciones ambientales, por ejemplo temperatura y precipitación, todo a través de un grid de la región de estudio, es donde MaxEnt extrae una muestra de ciertas estaciones que contrastan con los lugares donde existe presencia de las especies analizadas (Merow, *et al.*, 2013).

Para la modelación fueron utilizadas un conjunto de 24 variables biofísicas continuas (Tabla 4), conformado por 5 variables topográficas derivadas de un modelo digital de elevaciones y 19 variables bioclimáticas derivadas de las base de datos del Worldclim (0.008 de pixel y 30 arc-segundos ~ 1 Km) (Hijmans, *et al.*, 2005).

Las variables ambientales fueron utilizadas de igual forma para modelar el nicho ecológico del pino y del descortezador. Se usaron los datos puntuales con el nombre de la especie y las coordenadas en grados decimales tanto para latitud como longitud, además de las variables que se deben convertir de formato ráster y cambiar a formato ASCII. Se ejecutó el modelado a través del programa de máxima entropía, se generaron 10 réplicas, con 50 pruebas al azar y un modelo de tipo bootstrap que permite obtener estimaciones de medidas de precisión así como la realización de contrastes de hipótesis en aquellas situaciones en las que no se dispone de información acerca de la distribución (Pérez, 2014).

Los modelos resultantes fueron analizados para saber cuál es el que presenta mejor fiabilidad. Se seleccionaron los 3 modelos con el área bajo la curva (AUC) más alta, éstos fueron importados en ArcMap y convertidos en tipo flotante para que conserven los datos originales. Posteriormente se sumaron los tres mejores modelos creando un mapa consenso, se reclasificaron en dos categorías en base al 10 percentil (que indica la probabilidad

de que el 10% de los puntos de presencia pueden caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial), generando un mapa dicotómico de presencia-ausencia de especies. El procedimiento generado se realizó para las dos especies en cuestión.

Tabla 4. Variables climáticas consideradas en el proceso de modelado. Fuente: (WorldClim, 2014).

CÓDIGO	VARIABLE AMBIENTAL
BIO 1	Temperatura media anual
BIO 2	Rango de temperatura media mensual
BIO 3	Isotermalidad (P2/P7) (*100)
BIO 4	Estacionalidad de la temperatura desviación estándar *100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálida
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 7	Rango anual de temperatura (P5-P6)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 9	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 10	Temperatura media del trimestre más seco
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío
SLOPE	Pendiente en grados
ASPECT	Orientación de ladera
ALTITUD	Metros sobre el nivel del mar
HILLS.	Sombreado
FACUM	Acumulación de flujo

Identificación de zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua

A partir de los dos modelos de especies generados en MaxEnt (Pino piñonero y plaga de descortezador), se realizó un cruce de información para identificar únicamente las zonas donde existen ambas especies. Para realizar un mejoramiento a éste mapa resultante, se obtuvieron de la serie V de cobertura y uso de suelo, aquellas categorías que correspondían a pino y su asociación con otro tipo de vegetación como el encino, asignando un valor de presencia, mientras que todas aquellas coberturas que no correspondieran a pino serían ausencia. Posteriormente se cruzaron el mapa de coberturas y el mapa dicotómico de ambas especies, encontrando un área más delimitada y específica para la presencia del *Ips confusus* en el bosque de pino en específico para la especie de *Pinus cembroides*.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo

Mediante las categorías establecidas para la cobertura y uso de suelo determinadas previamente, se procedió a la digitalización de las áreas de entrenamiento y posteriormente a la elaboración de la clasificación supervisada a través del módulo MAXLIKE. Se obtuvieron las firmas espectrales de dichas coberturas, comparando con las bandas del espectro visible, además de la del infrarrojo y añadiendo una banda de NDVI para obtener una mejor separabilidad en las firmas (Alatorre, *et al.*, 2015).

En la Figura 4 se observa que la banda del infrarrojo en Landsat 8 presenta mejor discriminación, apoyado por la información espectral que nos brinda la banda del NDVI ayuda a que ésta separabilidad sea mayor. Identificando que la clase de interés, en éste caso la cubierta de pino seco, sea la que logre discriminarse de las demás cubiertas de bosque.

Debido a la época del año (termino de invierno), las cubiertas de pastizal y agricultura no presentan elevada actividad fotosintética, seguido de la zona de bosque con pino seco, que se encuentra en condiciones muy similares, en cambio aquellas zonas que no se encuentran con afectación, tienen un elevado valor de vegetación, como el caso del bosque de pino y en su asociación con el encino. En el caso de los cuerpos de agua en las bandas 5 y NDVI, sus valores se encuentran en declive, esto debido a que la energía es absorbida en esos rangos del espectro. Una vez que se observó la separabilidad espectral, se aplicó el método de clasificación MAXLIKE, tomando en cuenta que las áreas de entrenamiento estaban bien definidas (Alatorre, *et al.*, 2015).

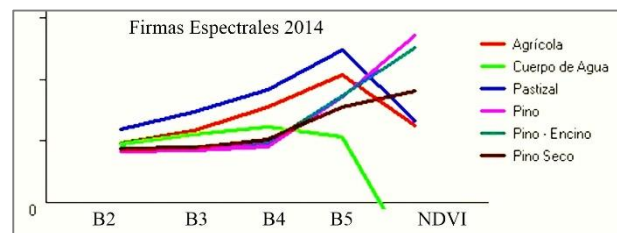


Figura 4. Firmas espectrales para las distintas cubiertas y uso de suelo, 2014

Se realizó la validación a través de la matriz de confusión (Tabla 5), para un total de 253 puntos de control a través de un muestreo estratificado y en comparación a una imagen de alta resolución obtenida de Google Earth. La intersección en la misma categoría son los aciertos obtenidos, mientras los que caen en otra categoría se consideran errores. En total se obtuvo una confiabilidad global del 90%.

De acuerdo al mapa de coberturas y uso de suelo elaborado para el año 2014 (Figura 5), se obtuvo la superficie en hectáreas que ocupaba cada categoría en el área de estudio (Tabla 6). Para el sector forestal de Colonia Chupaderos existe un total de 95 hectáreas de pino piñonero que se han

perdido, esto debido al ataque del descortezador *Ips confusus*.

Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación aplicada a la muestra de entrenamiento. (Puntos por categoría)

	AG	CP	PZ	P	PE	PS	Tot.
AG	49	0	1	0	0	0	50
CP	0	3	0	0	0	0	3
PZ	3	0	39	0	8	0	50
P	0	0	1	47	2	0	50
PE	0	0	1	0	47	2	50
PS	0	0	0	1	6	43	50
Tot.	52	3	42	48	63	45	253
EP	0.94	1	0.92	0.97	0.74	0.95	
EU	0.98	1	0.78	0.94	0.94	0.86	
Fiabilidad Global: 0.90							

*Abreviaturas: AG: Agrícola, CA: Cuerpo de Agua, PZ: Pastizal, P: Pino, PE: Pino-Encino, PS: Pino-Secco, EP: Exactitud del Productor, EU: exactitud del Usuario

Tabla 6. Cobertura en hectáreas del área de estudio para cada categoría

Cobertura y uso de suelo	Has.	% Ocupación
Agrícola	12	1.16%
Cuerpo de Agua	2	0.19%
Pastizal	141	13.68%
Pino	286	27.76%
Pino-encino	494	47.96%
Pino-secco	95	9.22%
Total	1,030	100%

En la cartografía de cobertura y uso de suelo se puede observar la región afectada en una zona muy específica, el ecosistema se encuentra fragmentado y la posibilidad de expansión de la plaga hacia las regiones de pino puede ser muy favorable.

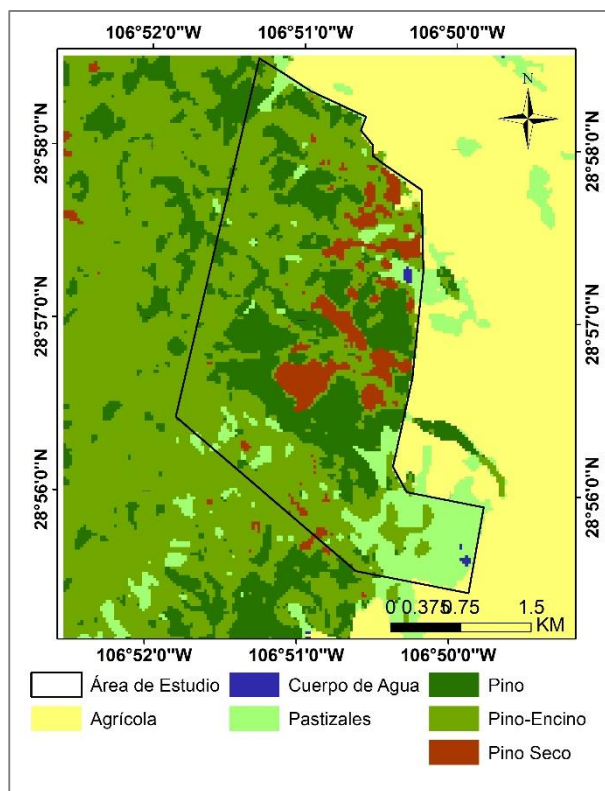


Figura 5. Cartografía de cobertura y uso de suelo en el año 2014, Zona forestal de Colonia Chupaderos

Serie temporal del NDVI y Variables climáticas (Estacional): año 2000 y 2014

Se realizó una evaluación preliminar de las tendencias temporales del índice de vegetación para las áreas analizadas, con especial interés en las regiones de pino. Cabe hacer mención que la categoría de pino seco clasificada para el 2014, fue utilizada de igual forma en el año 2000 con la diferencia de que ésta se encontraba en condiciones estables. En la Figura 6 y 7, se puede observar la comparación entre las dos series de NDVI distintas de forma estacional. La categoría pino seco para el año 2000 cuenta con valores de NDVI iguales a las demás regiones de pino, época en la que no existía ninguna afectación por el descortezador.

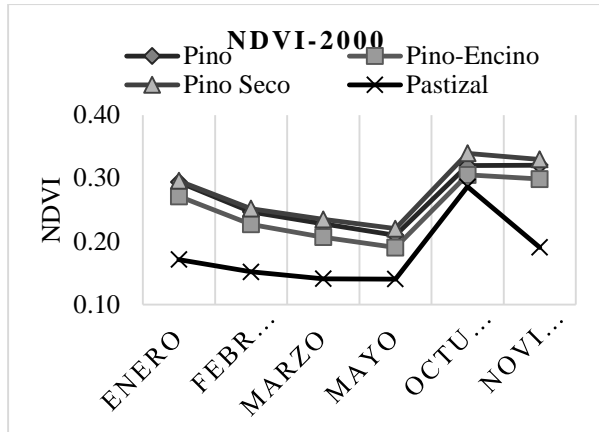


Figura 6. Evolución temporal de los valores medios de NDVI para el año 2000.

Se tomaron los valores medios del NDVI para el año 2014, observando que las áreas afectadas (pino seco) presentaron una disminución considerable en los valores de vegetación (Figura 7). Cabe mencionar que la cobertura de pino seco cuenta con actividad vegetal (valores altos de NDVI), esto se debe a la vegetación secundaria como el pastizal que se encuentra debajo de los pinos secos, o bien por especies arbóreas aisladas como la asociación con el encino (sotobosque). En ambas temporadas se observa un aumento considerable de actividad vegetal a partir del verano, dejando únicamente los meses de inicio del año para poder identificar de forma clara las diferencias entre las temporadas analizadas.

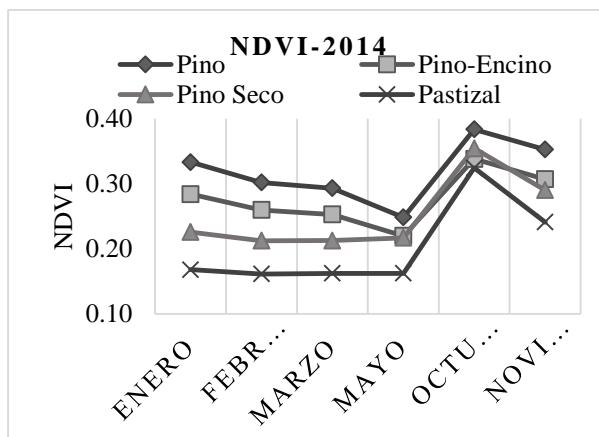


Figura 7. Evolución temporal de los valores medios de NDVI para el año 2014

El análisis preliminar de las series climáticas para las dos temporadas anuales analizadas (2000 y 2014) muestra valores similares durante todo el año entre las dos series (Figura 8). En cuanto a precipitación durante el año 2000 se acumularon 390 mm, mientras que el 2014 se presentó un año con mayor precipitación llegando a los 548 mm. La serie temporal de temperaturas máxima/mínima (Figura 9) presenta una tendencia regular y muy similar durante el año.

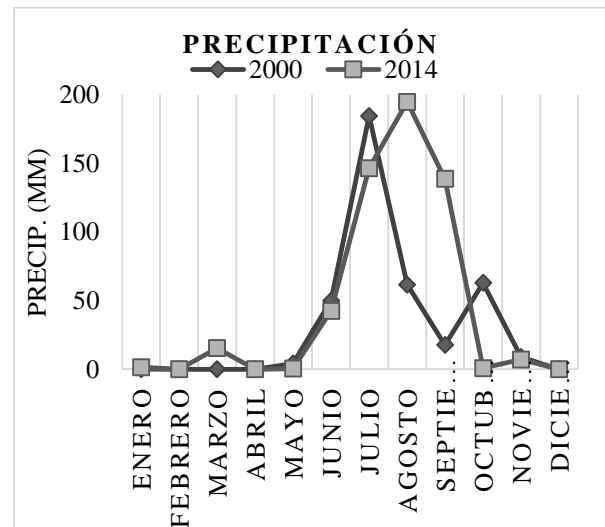


Figura 8. Evolución temporal de la precipitación en los años 2000 y 2014

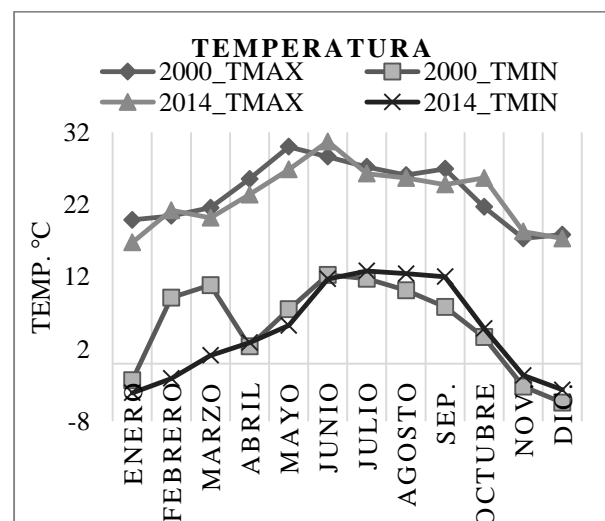


Figura 9. Evolución temporal de la temperatura en los años 2000 y 2014.

De forma visual, las series climáticas de forma estacional no demuestran un gran evento que pudiera verse relacionado con el NDVI, sin embargo en el apartado siguiente se demuestra de forma anual la tendencia tanto de las series climáticas como del índice de vegetación.

Serie temporal del NDVI y Variables climáticas (Anual): años del 2000 al 2014

De la misma forma se realizó el análisis, ahora incluyendo todos los años entre éstas dos temporadas, observando una tendencia más significativa en las variables. Visualmente es evidente la tendencia del NDVI en la cobertura de pino seco (Figura 10), en principio de temporada (año 2000) presentaba valores incluso más elevados que las regiones de pino y pino-encino, se trataba de una región con abundante actividad vegetal. A partir de la presencia de la plaga en el ciclo 2011-2013, ésta tendencia disminuyó de forma considerable, observando que las demás categorías en el año 2014 se encontraban incluso con tendencia positiva. De igual forma aún cuenta con valores del NDVI debido a la vegetación secundaria presente, como el pastizal.

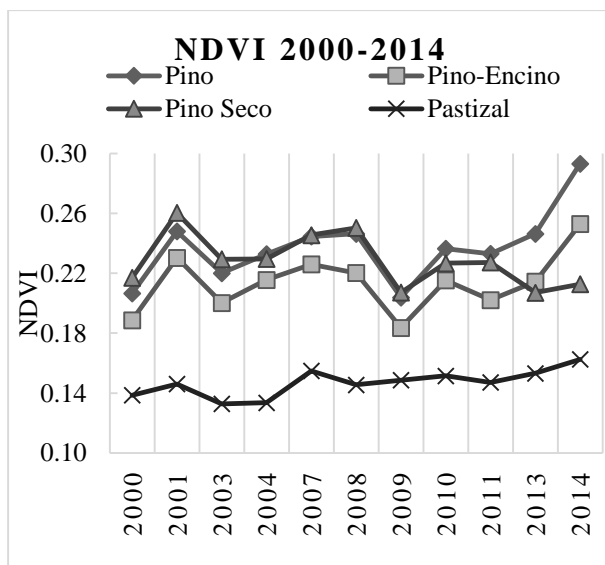


Figura 10. Evolución temporal de los valores medios de NDVI para la serie 2000-2014.

Siguiendo con un análisis visual, en las series climáticas se encontraron valores relevantes en precipitación, se ha presentado una temporada muy variada con alzas y bajas muy considerables (Figura 11), la precipitación promedio en los últimos 15 años fue de 403 mm anuales, con registros extremos en el año 2004 donde se acumuló hasta 700 mm, para el año 2009 sólo se registraron 230 mm siendo el año más seco, a partir de ese ciclo fue la temporada en que estuvo presente la plaga de descortezadores (2010-2013), donde las precipitaciones fueron alrededor de los 300 mm anuales.

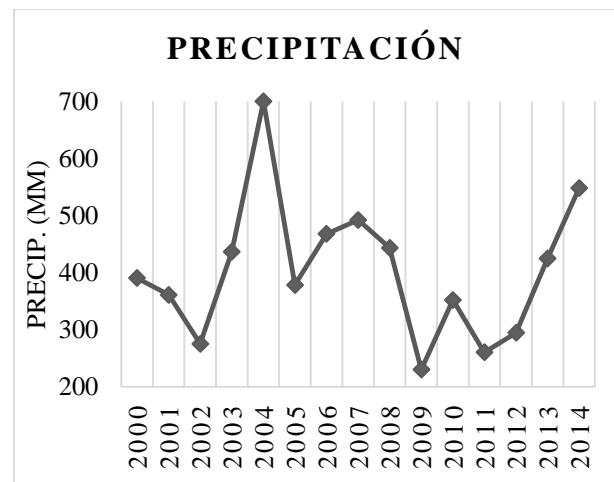


Figura 11. Evolución temporal de la precipitación para la serie 2000-2014.

En cuestión a la serie climática en temperatura (Figura 12), la máxima promedio anual se encuentra en los 23 °C, mientras que la mínima en los 4°C. La temporada es regular, pero analizando el ciclo donde se ha presentado el problema (2010-2013), se encuentra que los valores máximos y mínimos fueron muy diferentes a los demás años. Las temperaturas máximas aumentaron por encima del promedio, de igual forma las temperaturas promedio mínimas disminuyeron. Siendo el año 2011 más extremo en relación a las temperaturas, ya que se registraron las máximas (23.72 °C) y mínimas (2.91 °C) en promedio anual más extremas.

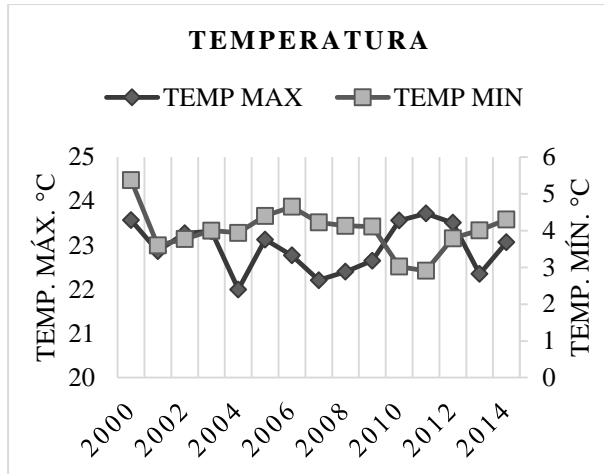


Figura 12. Evolución temporal de la temperatura para la serie 2000-2014

Con el análisis realizado, se comprueba que ese ciclo estuvo afectado por condiciones irregulares de clima, tanto en precipitación como en temperaturas, a partir de ello las regiones de pino pueden presentar afectaciones en su fenología y encontrarse en etapa de estrés y debilidad, es aquí donde la plaga del descortezador aprovecha para atacar, alojándose en la corteza para posteriormente secar el pino. Confirmando lo ya antes visto en otras regiones del país, donde la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas, factores que debilitan a los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar, *et al.*, 2013)

Análisis de la regresión del NDVI contra las variables climáticas

De acuerdo al análisis estadístico de regresión multivariante que se observa en la Tabla 7, permite explicar los patrones temporales del NDVI observados en cada cobertura, en relación a variables de precipitación, temperaturas, día juliano y el tiempo transcurrido. El mejor ajuste se obtuvo en la categoría de pino seco, que es el área de interés, mientras que las otras categorías de pino y pino-encino no presentaron ajuste al modelo de

regresión multivariante, descartando cualquier tendencia significativa del NDVI.

Tabla 7. Análisis de la regresión multivariante para los valores observados del NDVI en cada cobertura y uso de suelo.

	Pino	Pino-Encino	Pino Seco	Pasto
R ²	0.55	0.47	0.91	0.86
<i>p-Valor</i>	-	-	<0.028*	<0.016*
Error Residual Estándar	0.019	0.024	0.016	0.028
Coeficientes Beta				
Precip. 2 meses	-	-	-	-
T máx. 3 meses	-	-	-0.601	-
T mín. 3 meses	-	-	-	-
Día Juliano	-	-	-	-
Tiempo (Año)	-	-	-0.467	0.756
Tendencia Temporal (Cambio en NDVI)				
Por Año	+0.0027	+0.0014	-0.0020	+0.0015
Periodo 2000-2014	+3.78%	+2.06%	-2.74%	+2.01%

Sólo se encontraron dos variables que explican las tendencias temporales de la vegetación para el pino seco, se trata de la temperatura máxima en los tres meses previos y el tiempo transcurrido. En ambas variables se encontró una correlación negativa, esto significa que al transcurrir el tiempo, en un periodo de 14 años, la vegetación disminuyó su actividad, mientras que la temperatura máxima de acuerdo a la distribución parece ser que un clima más cálido a finales de invierno e inicios de primavera ha favorecido la proliferación de la

plaga de descortezadores, debido a que los pinos entran en una etapa de debilidad, contrariamente a lo observado en otros estudios (Alatorre *et al.*, 2015), un clima más cálido en primavera ha favorecido en la región central de Chihuahua un incremento en los valores medios del NDVI en algunas categorías vegetales, como producto de un adelantamiento del periodo fenológico de la vegetación. En este caso, si tomamos en cuenta lo observado en el apartado anterior, donde la región ha venido padeciendo una sequía prolongada en los últimos años, un incremento en la temperatura podría estar afectando las tasas de evapotranspiración y las funciones de fotosíntesis (FAO, 2002), lo cual indudablemente vulneró el vigor de la vegetación (estrés hídrico) exponiéndola al ataque del descortezador, ya que el ataque en masa de ésta plaga provoca la muerte del hospedero, además pueden atacar árboles vivos que deben encontrarse muy debilitados y con diferentes insuficiencias para detener el ataque (Camacho, 2012).

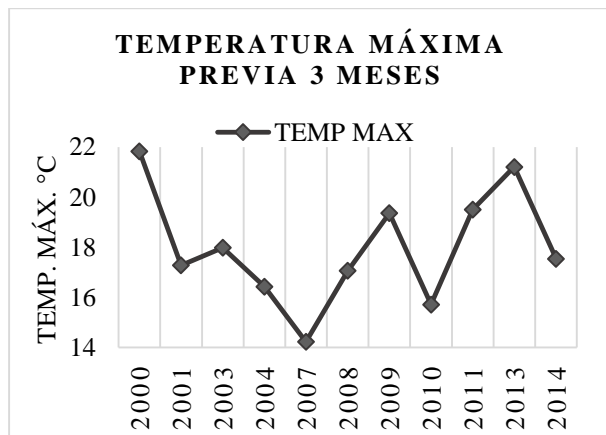


Figura 13. Evolución temporal de la temperatura previa a tres meses para la serie 2000-2014.

La variable de precipitación no ha demostrado ninguna correlación con la actividad vegetal en esa región, pero el que la precipitación acumulada no tenga ningún efecto significativo puede explicarse por la resistencia de la especie del pino a

condiciones extremas, sin embargo Camacho Pantoja (2012) menciona que el ataque de estos insectos se presenta después de eventos atmosféricos como sequías, heladas, incendios y tormentas. La mayoría de las cubiertas presentaron una tendencia temporal positiva, con excepción de la región afectada, mostrando una tendencia negativa.

Análisis espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI

El análisis Mann-Kendall, realizado a partir de la serie temporal del NDVI (años 2000 al 2014) con un estadístico significativo ($p = 0.10$), permitió observar de mejor manera la tendencia de la vegetación en el área de estudio.

En la Figura 14 se puede observar que el área en su mayoría es estable, mientras que en un porcentaje menor se encuentran las zonas con tendencia positiva, clasificados como una región de ganancia o bien de recuperación en la vegetación. La clase de interés es aquella que presenta tendencia negativa, se trata de las regiones donde se ha perdido o degradado la vegetación, para el área de estudio se observa una zona muy considerable, la que coincide en su gran medida con la clasificación supervisada generada con anterioridad (Figura 5), esto para la categoría de pino seco.

Analizando las tendencias de vegetación con la cartografía de cobertura y uso de suelo se puede observar el porcentaje de área correspondiente a cada clase (Tabla 8). La clase de pino seco generada en la clasificación supervisada coincide con un total de 43.7 hectáreas que se han perdido en su totalidad, mientras que las otras 52 has, clasificadas como pino seco, en el análisis de distribución espacial se clasifican como estable, esto significa que no se ha recuperado o bien puede encontrarse en una zona de transición entre una región afectada y una completamente sin daños.

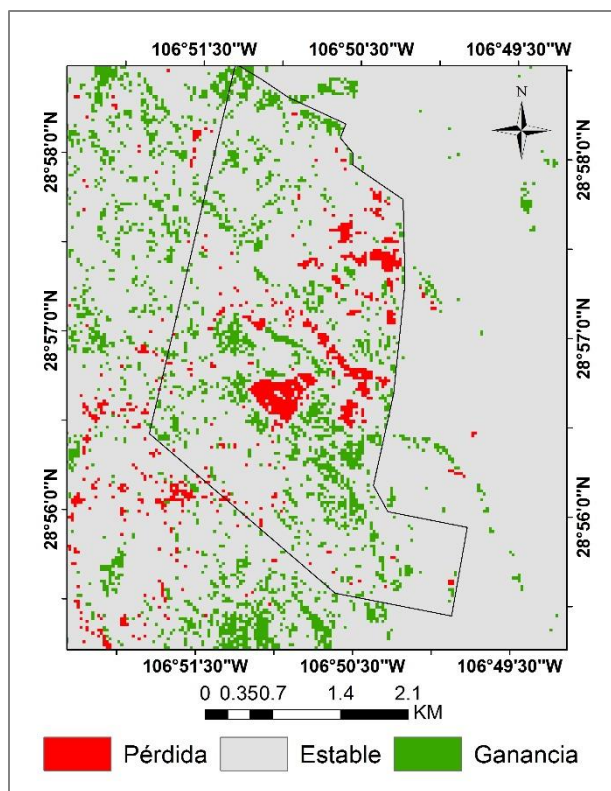


Figura 14. Distribución espacial de las tendencias del NDVI (2000-2014) a través de Mann-Kendall

Tabla 8. Análisis de la frecuencia de las tendencias temporales del NDVI en cada una de las categorías

Clase	Pérdida	Estable	Ganancia.
Pino	0.9%	72%	27.1%
	2.7 Ha	206.2 Ha	77.6 Ha
Pino-Encino	2.7%	87.7%	9.6%
	13.4 Ha	433 Ha	47.3 Ha
Pino seco	46.1%	53.9%	0%
	43.7 Ha	52 Ha	0 Ha
Pastizal	1%	94.5%	4.5%
	1.4 Ha	131.4 Ha	6.3 Ha

El análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, realizado pixel a pixel para evaluar los procesos de recuperación y degradación en la cubierta vegetal, demuestra que

la mayoría de la superficie ha permanecido sin tendencia, en condiciones estables. La cubierta analizada y de mayor interés es la región de pino seco, ésta no presenta ninguna recuperación, en cambio sí se encontró que otras coberturas en el área también presentan pérdida en su actividad vegetal, se trata del pino, pino-encino y pastizal, con un total de 17.5 hectáreas, atribuyéndose a otros posibles factores de influencia en la región, como lo puede ser el sobrepastoreo y extracción de leña principalmente.

Modelación del nicho ecológico para la especie de *Pinus cembroides* y el descortezador *Ips confusus* a través del programa de Máxima Entropía (Maxent)

La primera especie modelada es el pino piñonero, con 28 registros de presencia, su nicho ecológico de distribución se aprecia en la Figura 16, se extiende a lo largo de la Sierra Madre Occidental, en los límites con la Altiplanicie Mexicana, esto es para el estado de Chihuahua.

El modelo para el pino presenta una fiabilidad elevada de 0.967. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado del pino fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO10) con un 34.3%, seguido de la precipitación anual (BIO12) con un 16.5% y por último la altitud con un 10.5% de contribución al modelado.

La Figura 15 demuestra la contribución de las 19 variables bioclimáticas y las 5 topográficas, a través del área bajo la curva (AUC) generado por el modulo del Jackknife en el software MaxEnt. El pino piñonero requiere de ciertas condiciones para desarrollarse, como la altura es fundamental también la precipitación anual y temperatura del mes más seco. Sin embargo variables derivadas del modelo digital de elevaciones no son fundamentales para la distribución de la especie, como en el caso de la acumulación de flujo, la orientación de laderas y el sombreado.

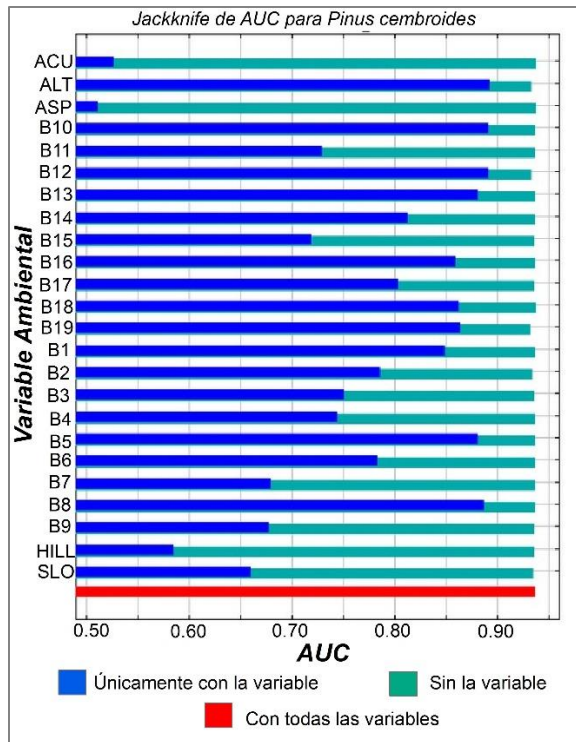


Figura 15. Jackknife de la AUC para la especie *Pinus cembroides*.

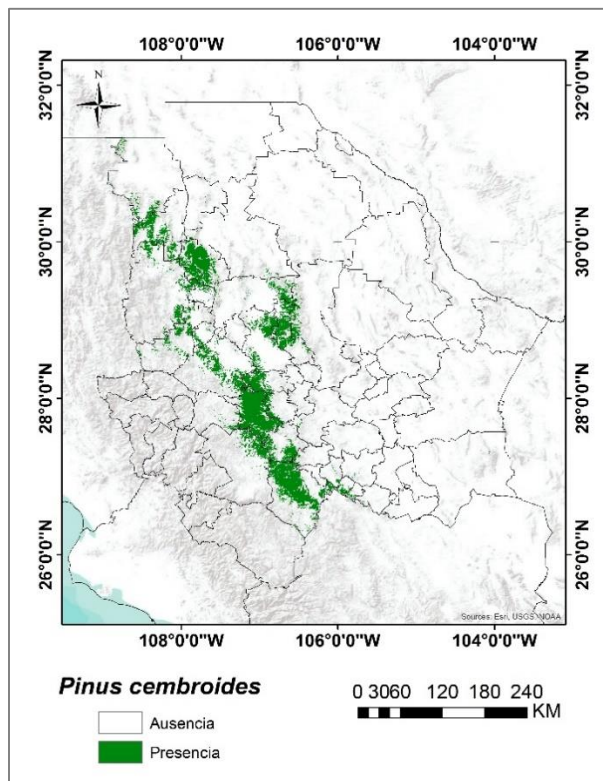


Figura 16. Mapa de distribución de la especie *Pinus cembroides* en el estado de Chihuahua.

El Jackknife muestra la ganancia que genera cada variable en tres diferentes escenarios, en color azul se observa el modelo con una sola variable, en color verde con todas las variables excepto una y en rojo todas las variables. Es utilizado para reflejar cuanta información útil contiene cada variable, dentro del eje X es la ganancia, mientras que en el eje Y es la variable. (Barras verdes: Sin la variable, Barras azules: Solo con la variable, Barras rojas: Todas las variables. Figura 15 y 17).

Posteriormente se realizó la modelación del nicho ecológico para el descortezador *Ips Confusus*, con 18 registros de presencia, la distribución espacial se muestra en la Figura 18, y comparado con los puntos de ocurrencia proporcionados por la CONAFOR, coincide con las áreas donde se ha presentado ésta plaga a partir del año 2012, principalmente en los municipios de Balleza, Carichí y Cusihuirachi.

El modelo para la plaga presenta una fiabilidad promedio de 0.991. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado de la plaga del descortezador fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO10) con un 22.8%, seguido de la precipitación del trimestre más cálido (BIO18) con 13.4% y por último la precipitación anual (BIO12) con un 10.8% de contribución al modelado.

A diferencia del pino piñonero, el descortezador *Ips Confusus* necesita de condiciones que se relacionan más con temperatura y precipitación, mientras que la altitud no es uno de los principales factores para su dispersión pero si es fundamental. En el caso de la plaga deben ser analizados más a detalle las características de dispersión, ya que es posible agregar variables como la población y vías de comunicación que pueden ser factores para propagar la expansión de la plaga.

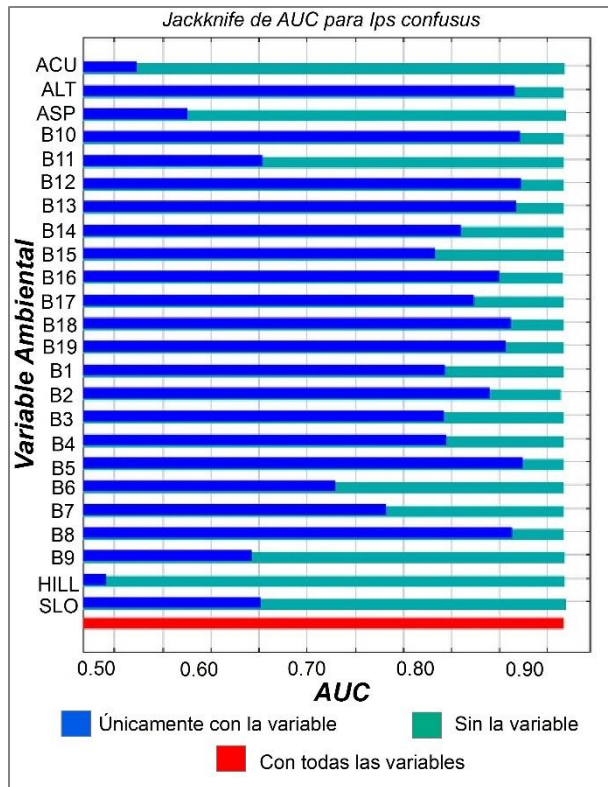


Figura 17. Jackknife de la AUC para la especie *Ips confusus*.

Podemos encontrar diferencias entre el modelado de las especies, por ejemplo para el pino la altura en la que se encuentre es más considerable, además de la precipitación media anual y la temperatura media del trimestre más seco, en cambio para la plaga es más significativo variables como la temperatura y precipitación. Encontrando datos similares a los establecidos en la correlación de variables climáticas con la actividad vegetal, es decir el pino puede verse afectado por temperaturas extremas o por déficit hídrico entrando en etapa de vulnerabilidad, en cambio para la plaga necesita que esas temperaturas sean un poco más cálidas para poder establecerse.

Los modelos generados se ven influenciados de forma considerable por los puntos de presencia utilizados, es una de las limitantes que se presentan aunque MaxEnt puede generar resultados de forma confiable con pocos puntos de registro.

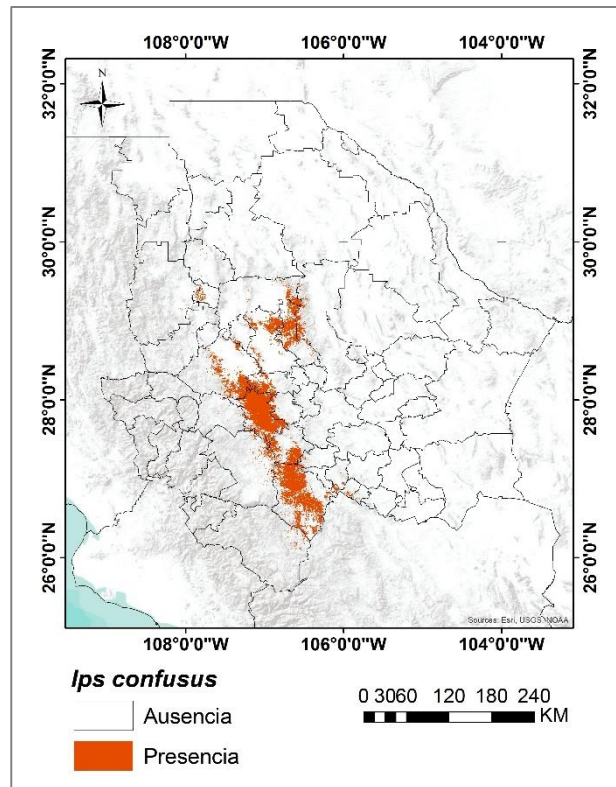


Figura 18. Mapa de distribución de la especie de descortezador *Ips confusus* en el estado de Chihuahua.

Identificación de zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua

Con las modelaciones generadas para obtener el nicho ecológico de cada especie de interés (*Ips confusus* y *Pinus cembroides*), se pudieron establecer las zonas donde la presencia y ocurrencia de ambas especies coinciden. Además, para encontrar las áreas más vulnerables, se hizo un cruce del mapa anterior con la serie V del INEGI, mapa de coberturas y uso de suelo, de la que previamente fueron seleccionadas las coberturas de pino. Esto fue para eliminar las regiones de presencia de plaga que se encontraban en zonas que no corresponden a su distribución, por ejemplo en agricultura o pastizales.

La Figura 19 muestra las zonas vulnerables, con las condiciones más idóneas para el

esparcimiento de la plaga, con probabilidad de presencia en 12 municipios: Balleza, Carichí, Chihuahua, Cuauhtémoc, Cusihuirachi, Guachochi, Guerrero, Namiquipa, Nonoava, Riva Palacio, San Francisco de Borja y San Francisco del Oro. En comparación con los modelos de nicho ecológico generados anteriormente, éste mapa final presenta con un elevado nivel de certidumbre las áreas consideradas donde la especie del *Ips confusus* puede afectar al pino piñonero, es decir un total de 4,195 km² que presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga, y en cierta medida algunas de esas áreas ya fueron afectadas, como en los municipios de Balleza y Carichí en mayor medida.

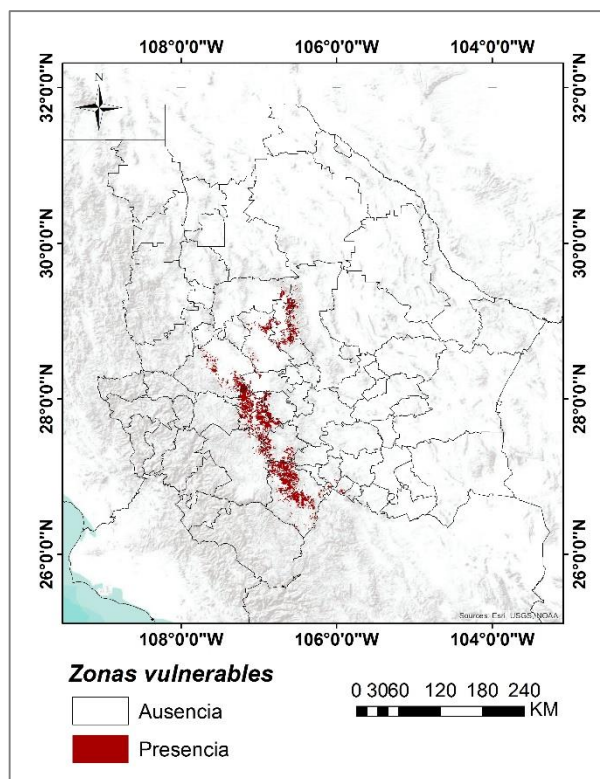


Figura 19. Mapa de distribución potencial del descortezador *Ips confusus* en el bosque de pino piñonero en el estado de Chihuahua

Para el caso de la zona de estudio planteada en ésta investigación, éste modelo aunque es generado en una escala mayor, equivalente a un kilómetro por

pixel, demuestra que toda el área forestal de Colonia Chupaderos, en el municipio de Cuauhtémoc, cuenta con las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

CONCLUSIONES

La utilización de imágenes del satélite Landsat para obtener información espectral para la elaboración del mapa de coberturas y uso de suelo, más la inclusión del NDVI dentro de las firmas espectrales de cada una de las categorías ayudó a mejorar considerablemente la separabilidad espectral de las cubiertas presentes en el área de estudio, además, también permitió identificar las áreas donde la especie de pino piñonero se encuentra afectado por la plaga de descortezadores, con un área aproximada a las 95 hectáreas afectadas.

Posteriormente el análisis y la comparación temporal del comportamiento de variables climáticas como la temperatura y precipitación, además del NDVI, tanto de forma estacional como de forma anual durante 14 años, logró destacar las diferencias entre las series comparadas. Existieron eventos climáticos que afectaron la actividad vegetal, los inviernos han sido más cálidos, lo que puede explicar la aparición de los descortezadores, además la precipitación anual disminuyó en los últimos 5 años, lo que permite que los pinos entren en un estrés hídrico y se encuentren vulnerables.

La serie temporal del NDVI demostró que la actividad fotosintética del pino piñonero comenzó a disminuir a partir del año 2011 en el área analizada, mientras que otras coberturas presentaban valores normales de vegetación.

En el análisis estadístico de regresión multivariante se encontró que la temperatura de los tres meses previos y el tiempo son las variables que determinan la pérdida de la vegetación. El análisis Mann-Kendall ratificó lo generado en la cartografía de cobertura y uso de suelo, al

comparar pixel a pixel en la serie temporal del NDVI las áreas que presentan ganancia, pérdida y estabilidad de la vegetación.

En relación a las modelaciones de nicho ecológico con MaxEnt, es un acercamiento para mostrar las áreas potenciales de distribución de las especies del pino piñonero y el descortezador *Ips confusus*. Las variables ambientales y topográficas son determinantes para la presencia de una especie, en los casos analizados la temperatura, precipitación y altura son las variables que más influyen, calculando un total de 4,195 km² que presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

Aplicar Sistemas de Información Geográfica y Sistemas de Percepción Remota son de gran utilidad para el manejo de datos, además de la interpretación de los mismos. Este tipo de metodologías de reciente creación permite tomar medidas de prevención y generar planes para controlar y monitorear los problemas forestales en la actualidad, además la información generada muestra las evidencias necesarias para que instituciones gubernamentales como la CONAFOR aporten recursos para la reforestación en los bosques.

Los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente, con la información generada y los análisis realizados se confirmó la hipótesis, ya que una serie temporal de NDVI si permite observar las variaciones de la actividad vegetal, en el caso específico del bosque piñonero para la región central de Chihuahua.

Realizar análisis a escala detallada en un área pequeña y específica, como el caso de Colonia Chupaderos en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, permitió mostrar variaciones con más efectividad, en comparación a trabajos realizados a escala municipal o regional por ejemplo.

REFERENCIAS

- Alatorre, L. C., Beguería, S. & Vicente Serrano, S., (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central.
- Alatorre, L. C., Miramontes, S., García, A. K., Díaz, R., Bravo, L. C., (2014). "Evolución de la dinámica vegetal mediante una serie de imágenes Landsat TM (1986-2011): región central de Chihuahua, México". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 2(40), pp. 449-476.
- Alatorre, L. C., Sánchez, E., Amado, J. P., Wiebe, L. C., Torres, M. E., Rojas, H. L., Bravo, L. C., López, E. (2015). "Analysis of the temporal and spatial evolution of recovery and degradation processes in vegetated areas using a time series of Landsat TM Images (1986-2011): Central region of Chihuahua, México". *Open Journal of Forestry*, 5(2), pp. 162-180.
- Brizuela, A., *et al.*, (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *Revista de Teledetección*, pp. 207-214.
- Camacho Pantoja, A., (2012). El Género *Ips* (Coleóptera: *Curculinoidea Scolytinae*) en México. Texcoco, Edo. México: Colegio de postgraduados.
- Ceroni, M., Achkar, M. & Gazzano, I., (2013). Evolución temporal del NDVI mediante imágenes SPOT en el periodo 1988-2012. Simposio de Sensoramiento Remoto, pp. 1314-1321.
- Chuvieco, E., (1988). El factor temporal en teledetección: evolución

- fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10, pp. 1-9.
- Chuvienco, E., (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, España: Ed. Ralph.
- Cibrián, D., Méndez, J. T., Campos, R. Yates, H. O. & Flores, J. E., (1995). Tres especies del género *Dendroctonus* encontradas en México. En: Insectos Forestales de México: Universidad Autónoma de Chapingo, Comisión Forestal de América del Norte, pp. 269-285.
- CONABIO, (2014). Nichos y Áreas de Distribución. [<http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent> Último acceso: 2014]
- CONABIO, (2014). *Pinus Cembroides Zucc.* [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/54-pinac11m.pdf Último acceso: septiembre 2014].
- CONAFOR, (2011). *Pinus Cembroides Zucc.* [<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf> Último acceso: septiembre 2014].
- CONAFOR, (2014). Base de datos: predios afectados por *Ips confusus*, Chihuahua, México: *Departamento de Sanidad Forestal*.
- Congalton, R. G., (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), pp. 35-46.
- Cuéllar Rodríguez, G., Equihua, A., Villa, Jaime., Estrada, E., Méndez, T. & Romero, J., (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides Zucc.*, atacados por *Dendroctonus mexicanus Hopkins*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), pp. 42-49.
- FAO, (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. [<http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.html> Último acceso: abril 2015].
- Fierro Macías, C. D., (2013). Modelado de nicho ecológico para la predicción del área de distribución actual y potencial del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el estado de Chihuahua. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua: UACJ.
- Flores Flores, J. D., Nájera C., J. A. & Morales Quiñones, L., (2003). Principales plagas de los pinos piñoneros en el sur de Coahuila. [<http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/recforestales/plagapino.pdf> Último acceso: agosto 2014].
- García Díaz, S. E. & Cibrián Tovar, D., (2011). Pudrición de raíz causada por *Fusarium oxysporum schldtl* en coníferas. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, pp. 204-207.
- García Peña, A. K., (2014). Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de UNIFRUT. UACJ.
- Gómez Almonte, M. K., (2005). Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales. *Universidad de Piura*, Perú.
- Hijmans, R., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. & Jarvis, A., (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Revista Internacional de Climatología*, 25(15), pp. 1965-1978.

- IDRISI, (2014). MAXLIKE: IDRISI Selva Help System.
- Iglesias, M., Barchuk, A. & Grilli, M., (2010). Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosque nativo de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección*, pp. 44-54.
- INAFED, (2014). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Chihuahua. [<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM08chihuahua/municipios/08017a.html> Último acceso: septiembre 2014].
- INEGI, (2014). Imágenes del territorio: Landsat. [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Landsat.aspx> Último acceso: octubre 2014].
- Loya Carrillo, J., Aguilar, S., Fierro, C. D., Legarreta, C. K., Bencomo, J. A. & Alatorre, L. C., (2011). Análisis de la separabilidad espectral de cultivos agrícolas en imágenes del sensor Landsat TM para la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México. *Memoria del Congreso SELPER*, (19), pp. 43-48.
- Maldonado Marín, J. D., Moreno Mendoza, L. J. & Alatorre Cejudo, L. C., (2013). Evaluación de la pérdida del *Pinus cembroides* aplicando teledetección y SIG: caso de estudio en la zona noroeste del Municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. *Memoria del Congreso SELPER*.
- Medina Enríquez, R. & Miramontes Beltrán, S., (2014). Análisis de la evolución temporal de la actividad vegetal en áreas de manglar (1990-2010): deltas de los Ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y Río Fuerte en Sinaloa, México. *UACJ*.
- Mendoza Campos, A., Cibarián Tovar, D. & García Díaz, S. E., (2011). *Phytophthora cinnamomi* Rands. y *Fusarium oxysporum* Schltdl. como agentes causales de pudrición de raíz en *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Mayr) Franco. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, pp. 191-195.
- Meneses Tovar, C., (2001). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación de la degradación del bosque. *CONAFOR*, Volumen 62, pp. 39-46.
- Meneses Tovar, C. L., (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *UNASYLVA*, 62(238), pp. 39-46.
- Merow, C., Smith, M. & Sandler, J., (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species distribution: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, (36), pp. 1058-1069.
- Ojeda Aguilera, A., (2010). Ficha del *Ips confusus*. [<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/15/1443Ips%20confusus.pdf> Último acceso: 2014].
- Pérez Galdeán, G., (2014). Análisis de fragmentación de hábitat con base en la distribución potencial del águila real (*Aquila chrysaetos*) en Chihuahua, México. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua: *UACJ*.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. & Harlan, J. C., (1974). Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect)

- of Natural Vegetation, Greenbelt, MD.: NASA/GSFC.
- Santana, M. V., Rosales, E. M., Manzano, L. R., Santana, G. & Pineda, N. B. (2013). Las Geotecnologías en la construcción de ciudades saludables: Zona Metropolitana de Toluca, México. Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). *UAEM*, Numero 5. pp. 64-95.
- SEMAR, (2012). Secretaría de Marina. [<http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html> Último acceso: 2015].
- WorldClim, (2014). Bioclim. [<http://worldclim.org/bioclim>: último acceso: 10 octubre 2014].