UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

CIUDAD UNIVERSITARIA

INSTITUTO HONDUREÑO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

PROYECTO DE TESIS

USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS DE CONÍFERA ANTE EL ATAQUE DE LA PLAGA DEL GORGOJO (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) EN HONDURAS, ANALIZANDO INFORMACIÓN DESDE LOS AÑOS 2015-2022.

PRESENTADO POR:

Yolibeth Aderlí López Alcerro

Previa a opción de Grado de Máster en Gestión de Riesgos y Manejo de Desastres

ASESOR TÉCNICO:

MsC. Fabio Leonel Casco Gutiérrez

TEGUCIGALPA M.D.C.,

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

RECTOR

DR. FRANCISCO HERRERA ALVARADO

VICERRECTORA ACADÉMICA

MAE. BELINDA FLORES DE MENDOZA

SECRETARIA GENERAL

DRA. JESSICA PATRICIA SÁNCHEZ MEDINA

DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO DE POSGRADO

DIRECTOR DE POSGRADOS

DR. ARMANDO EUCEDA

DEDICATORIA

A mi madre, que es una mujer fuerte y decidida y que, con mucho esfuerzo, me formó y me dio la posibilidad de llegar hasta aquí; a mis hermanas y hermanos por siempre brindarme su apoyo. Ellos son la fuerza e inspiración que necesito y que me permite seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

- ✓ A la UNAH por la formación recibida a través de cada uno de los catedráticos.
- ✓ A mi asesor el MsC. Fabio Leonel Casco Gutiérrez por todo su apoyo, paciencia y guía.
- ✓ A mis colegas de trabajo y amigos que me apoyaron para alcanzar esta meta.
- ✓ A mis compañeros por las vivencias y lecciones aprendidas en este camino.

RESUMEN

La presente investigación de tesis de postgrado tiene como objetivo la utilización de los sistemas de información geográficos para evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis*) utilizando información desde los años 2015-2022.

Como parte de la metodología se utilizó información de los SIG que permite la evaluación de las condiciones climáticas, biofísicas y geográficas en una determinada área de estudio. Asimismo, con el apoyo de herramientas en la nube Google Earth Engine, se generó el modelo probabilístico que permiten modelar la susceptibilidad a plagas forestales en los ecosistemas de bosques de conífera. En esta investigación se han utilizado diferentes fuentes de información cartográficas y bibliográficas con la finalidad de generar información confiable y transparente que permita monitorear con mayor esfuerzo los bosques con alta susceptibilidad a ataques de plagas forestales como el gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis*).

Para construir un modelo probabilístico de susceptibilidad de los bosques de conífera en Honduras, se clasificaron procesaron los siguientes datos: Muestras de áreas plagadas y variables como (NDVI, DEM, Temperatura, Precipitación, etc. Posteriormente, se realizó el entrenamiento del Modelo, usando como referencia el período 2015, correspondiendo al año con mayor incidencia por ataque de plaga. Mediante el algoritmo de aprendizaje automatizado que combina el resultado de múltiples árboles de decisión para alcanzar un único resultado, se generaron mapas de susceptibilidad anuales durante el período de 2015-2022, con el propósito de diseñar una serie temporal de medición de la susceptibilidad por riesgo a plagas.

Se definieron terciles para definir rangos de susceptibilidad (baja, media y alta.). Se realizó un análisis multipropósito para evaluar la susceptibilidad a nivel de municipio y departamento. Las variables de pendiente y precipitación fueron determinantes para el modelo probabilístico.

Según la información recolectada del Mapa Nacional Forestal del 2018, Honduras posee 6,301,097 hectáreas de cobertura boscosa, de los cuales 1,947,559 hectáreas son de Bosque de Conífera. Los resultados de la investigación indican que el año con mayor incidencia según el análisis de susceptibilidad del bosque de conífera al ataque de la plaga correspondió al período 2015, con un estimado de 3,972.08 ha en su categoría de Riesgo alto.

Como resultado del análisis multipropósito, los departamentos con mayor susceptibilidad son Olancho, Yoro, Francisco Morazán, El Paraíso y Comayagua que en todos los años de estudio

presentaron mayores áreas en susceptibilidad media y alta. Entre los municipios con susceptibilidad media y alta se encuentran: Danlí (El Paraíso) y Gualaco (Olancho).

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I 10
I. INTRODUCCIÓN 10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
2.1. Preguntas de investigación 12
III. OBJETIVOS 14
3.1. Objetivo General: 14
3.2. Objetivos Específicos: 14
IV. JUSTIFICACIÓN 14
V. HIPÓTESIS 17
CAPITULO II 18
VI. MARCO REFERENCIAL 18
6.1. Método 18
6.2. Fuentes y recursos 21
6.3. Análisis 21
6.4. Técnicas para recolección de información 25
6.4.1. Análisis de Contenido: Recopilación y procesamiento de datos 25
6.4.2. Experimentos: análisis exploratorio de variables 26
6.4.3. Técnicas proyectivas: modelado y validación espacial 28
VII. MARCO CONCEPTUAL 30
7.1. Gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) 30
7.2. Factores Ecosistémicos 34
7.2.1. Cobertura forestal 34
7.2.2. Condición sanitaria del bosque 35
7.3. Factores Climatológicos 36

7.3.1. Temperatura 36
7.3.2. Precipitación 37
7.4. Factores Biofísicos 37
7.4.1. Sanidad de la vegetación 37
7.4.2. Humedad 38
7.4.3. Perturbación 39
7.5. Factores Geográficos 39
7.5.1. Altitud 39
7.5.2. Pendiente 39
7.6. Susceptibilidad de bosques 40
7.6.1. Factor de riesgo 40
7.7. Región 41
7.7.1. Regiones forestales 41
7.8. Análisis de la situación actual 42
7.8.1. Cambio Climático en Honduras 42
7.8.2. Incidencia de Plagas Forestal en Honduras 43
7.8.3. Caracterización de especies de plagas 43
7.9. Análisis de las Metodologías 46
7.9.1. Los SIG aplicados en el sector ambiental 46
7.9.2. Los SIG aplicados a los análisis del riesgo 47
7.9.3. Aplicabilidad de los SIG en la evaluación de los Recursos Naturales 47
7.9.4. Sensores Remotos y disponibilidad de Datos espaciales 47
7.9.5. Sistemas de alerta temprana ante plagas 49
7.9.6. Ventajas y desventajas de los SIG en los análisis de riesgos 49
7.10. Instrumentos utilizados 50

7.10.1. Google Earth Engine 50
CAPITULO III 51
VIII. METODOLOGÍA 51
8.1. Materiales y Métodos 52
8.1.4. Modelación 61
8.1.5. Análisis de importancia de variables 62
CAPITULO IV 63
IX. ANÁLISIS Y RESULTADOS 63
X. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 78
CAPITULO V 78
XI. CONCLUSIONES 78
XII. RECOMENDACIONES 79
CAPITULO VI 79
XIII. BIBLIOGRAFÍA 79
CAPITULO VII 94
XIV. ANEXOS 94

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de método a utilizar en la investigación..... 19
Ilustración 2. Estructura del algoritmo de Random Forest 28
Ilustración 3. Sistema jerárquico de los gorgojos de corteza 44
Ilustración 4. Esquema de proceso metodológico 51
Ilustración 5. Mapa de Bosque de Conífera en Honduras. 53
Ilustración 6. Mapa de División Administrativa de Honduras. 54
Ilustración 7. Mapa de puntos de entrenamiento 55

Ilustración 8. Mapa de Tipología de Bosques en Honduras. 56
Ilustración 9. Interfaz de modelo construido en GEE 64
Ilustración 10. Puntos de entrenamiento y capas generadas con el modelo 65
Ilustración 11. Capas de susceptibilidad a plaga del gorgojo descortezador del pino..... 65
Ilustración 12. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2015..... 70
Ilustración 13. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2016..... 71
Ilustración 14. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2017..... 72
Ilustración 15. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2018..... 73
Ilustración 16. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2019..... 74
Ilustración 17. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2020..... 75
Ilustración 18. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2021..... 76
Ilustración 19. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2022..... 77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Regiones Forestales de ICF 41
Tabla 2. Resumen de control de plaga realizado por ICF en el 2017 43
Tabla 3. Descripción de información secundaria utilizada 58

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Importancia de variable del modelo de predicción de plaga del gorgojo. 66
Gráfico 2. Área promedio anual (ha) en susceptibilidad baja. 67
Gráfico 3. Área promedio anual (ha) en susceptibilidad media..... 68
Gráfico 4. Área anual (ha) en susceptibilidad alta..... 69

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad. La emisión de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y del agua son algunas de las principales causas del calentamiento global, que a su vez provoca el cambio climático. Los cambios en la temperatura tienen efectos importantes en los sistemas de producción y en la sociedad en general. Estos impactos intervienen en la calidad del suelo y del agua, lo cual tiene consecuencias en la salud humana y en la sostenibilidad de las actividades productivas.

Durante las últimas décadas, el cambio climático ha generado un impacto considerable a nivel global, dando lugar a fenómenos extremos que afectan a todos los continentes y océanos. En el contexto específico de Honduras, se ha observado una preocupante intensificación de las manifestaciones extremas de sequía en los últimos años. En combinación con el fenómeno del Niño en los años 2014-2015, el país ha experimentado registros sin precedentes en cuanto a sequías prolongadas y altas temperaturas.

Según el informe del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), estos eventos climáticos extremos han tenido un impacto significativo en los ecosistemas de conífera, aumentando la vulnerabilidad de los bosques a la plaga del gorgojo. (ICF & FAO, 2018, pág. 9)

En los ecosistemas de conífera, los patrones de crecimiento de los árboles se ven afectados por el cambio climático y aumentan la susceptibilidad de los bosques a la plaga del gorgojo y reducir la calidad de la madera. Estos cambios de temperatura, provocan estados de estrés en la cobertura forestal. Las condiciones de estrés hídrico en los ecosistemas de conífera han favorecido la propagación de la plaga del gorgojo descortezador a gran escala.

La plaga del gorgojo es un problema importante en los bosques de coníferas en América Latina. El gorgojo es un insecto que se alimenta del tejido meristemático secundario o Cambium de los árboles de pino, lo que interrumpe el flujo de nutrientes y agua y puede causar la muerte de los árboles. Esta plaga ha afectado gravemente las plantaciones de pino y abeto en México, Estados Unidos, Canadá y Centroamérica, causando pérdidas económicas importantes para la industria maderera y forestal.

En Honduras, la plaga del gorgojo descortezador (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) es una de las principales amenazas para los bosques de coníferas. Esta plaga es capaz de causar daños significativos en los ecosistemas de coníferas, lo que puede tener graves consecuencias económicas y ambientales. En los años 1962-1965, 1982 y 1999-2003 se registraron en

Honduras episodios de afectación de *Dendroctonus frontalis Zimmermann* e importantes afectaciones en los ecosistemas de coníferas.

En este contexto, el monitoreo de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque del gorgojo es fundamental para tomar medidas preventivas oportunas. Las afectaciones de la plaga pueden ser monitoreadas a través del uso de Sistemas de Información Geográficas (SIG). Como herramientas que permiten el análisis de variables climáticas, biofísicas, geográficas y cobertura forestal para el monitoreo del recurso forestal, así como el establecimiento de alertas tempranas del ataque de la plaga.

Los SIG son herramientas poderosas para el análisis y gestión de recursos naturales, permiten la integración de diferentes tipos de datos, como imágenes satelitales, datos climáticos y datos de campo, lo que facilita la identificación de zonas de alto riesgo y la toma de decisiones informadas. El uso de los SIG en el monitoreo de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque del gorgojo puede ayudar a prevenir daños significativos en los bosques de coníferas.

El monitoreo de los ecosistemas es una de las aplicaciones más importantes de los SIG, ya que permite entender mejor los procesos que ocurren en los ecosistemas y desarrollar estrategias de adaptación y mitigación a través de la integración de datos climáticos que ayudan a entender mejor los patrones y tendencias climáticas.

En este sentido el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el uso de los SIG para evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque del gorgojo en Honduras, analizando información desde los años 2015 a 2022.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Preguntas de investigación

1. ¿Qué datos sobre la cobertura de los ecosistemas de conífera existen o están disponibles en Honduras?
2. ¿Cómo los factores climáticos, biofísicos y geográficos permiten la construcción de un modelo probabilístico para estimar la susceptibilidad a la plaga del gorgojo *Dendroctonus frontalis Zimmermann*?
3. ¿Qué áreas político-administrativa tiene mayor susceptibilidad a la plaga del gorgojo *Dendroctonus frontalis Zimmermann*?

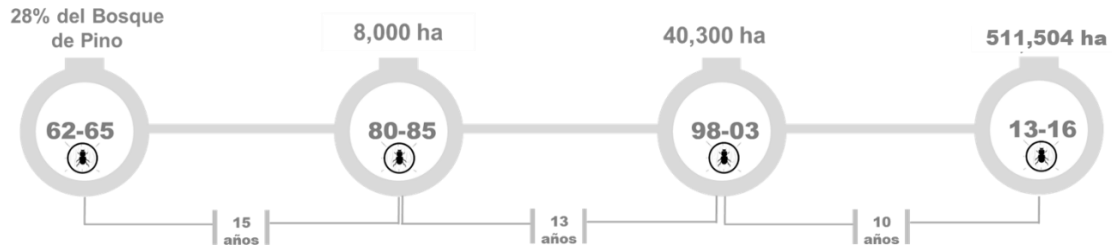
2.2. Planteamiento del problema

El 56% del territorio nacional está cubierto de bosque, lo que representa en extensión territorial un total de 6,315,400 ha. El 17% del territorio está cubierto de bosque de conífera, esto representa un total de 1,947,560 ha. (ICF & FAO, 2019, pág. 12)

Los bosques de conífera en Honduras son afectados por la plaga de gorgojo descortezador del pino de manera significativa, afectando de manera importante en términos económica, ambiental y social.

Los impactos del gorgojo descortezador del pino incluyen afectación directa de los recursos naturales como la cobertura forestal, el agua y suelo y estos impactan de manera negativa. En el informe sobre el último episodio de la plaga, se estiman afectadas 511,504 ha de bosque, causando la muerte del bosque de conífera de estas áreas (ICF, 2017, pág. 4).

La siguiente figura muestra la periodicidad de los episodios de la plaga en Honduras:



Fuente: ICF, 2017

El ataque del gorgojo descortezador del pino tiene otro efecto importante en los bosques de las áreas productoras de agua. Este impacto es posiblemente el más relevante y preocupante, ya que afecta directamente a los derechos humanos fundamentales, como el derecho al agua y saneamiento. Esta situación afecta tanto a las personas que viven en los bosques o cerca de las áreas afectadas, como a aquellos que residen en zonas más distantes, es decir, a toda la población. (CONADEH, 2016, pág. 20)

En el recurso hídrico se afectaron 265 (33%) de las 797 microcuencas declaradas, la mayor cantidad de estas en el departamento de Olancho (109), en Yoro (34) y en Francisco Morazán (27). En total se han afectado 41,299.17 ha de microcuencas. (ICF, 2017, pág. 38)

Además, la plaga del gorgojo descortezador del pino afecta los recursos de vida de habitantes de las comunidades que, por medio de contratos de manejo forestal comunitario, ya se han organizado para acceder a los bosques nacionales.

De acuerdo con los registros de ICF, 33 sitios asignados a grupos organizados o cooperativas agroforestales fueron afectados por el último episodio de la plaga. Se afectaron un total de 46,736.75 hectáreas que representa el 44.36% de la superficie total asignada a estos grupos. (CONADEH, 2016, pág. 19)

La pérdida de capital natural para el país debido a la plaga del gorgojo se encuentra en el rango de 13,810.62-20,786.83 millones de Lempiras (USD 614.62-925.09 millones), únicamente en lo correspondiente a madera como principal producto forestal. Además de esto se ha valorado el CO_2, resina y leña, que añadirían pérdidas potenciales de entre 1,087.1-8,672.4 millones de Lempiras (USD 48.4-385.9 millones). (ICF & FAO, 2018, pág. 8)

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General:

Establecer un sistema para el monitoreo de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) en Honduras, analizando información desde los años 2015-2022.

3.2. Objetivos Específicos:

1. Realizar un análisis exploratorio sobre la ubicación de los ecosistemas de conífera en Honduras para definir la distribución espacial del ecosistema de interés.
2. Determinar los factores climáticos, biofísicos y geográficos que permitan la construcción de un modelo probabilístico basado en el algoritmo de Random Forest de la plataforma de GEE.
3. Identificar departamentos y municipios con mayor susceptibilidad al ataque de la plaga del gorgojo descortezador del pino en el periodo analizado.

IV. JUSTIFICACIÓN

La importancia de los bosques en la biodiversidad y en la calidad del aire es incalculable. Los bosques son el hogar de una gran cantidad de especies animales y vegetales, muchas de las cuales son endémicas de Honduras y no se encuentran en ningún otro lugar del mundo. Además, los bosques son cruciales para la regulación del clima, ya que absorben dióxido de carbono y producen oxígeno, lo que contribuye a reducir el efecto invernadero y mejorar la calidad del aire.

En Honduras, la actividad forestal es una de las principales fuentes de ingreso de la economía nacional y una fuente vital de recursos para la población. Los bosques proporcionan madera, leña, frutas, plantas medicinales y otros productos forestales no maderables que son esenciales para la subsistencia de las comunidades locales. Además, los bosques son fundamentales para la conservación del suelo y el agua, ya que protegen contra la erosión y mantienen los ciclos hidrológicos.

Sin embargo, en los últimos años, Honduras ha experimentado desafíos significativos que han comprometido la salud de sus bosques. El cambio climático ha inducido sequías más prolongadas y temperaturas extremas, lo que ha intensificado la frecuencia e impacto de incendios y plagas forestales, resultando en una notable reducción de la cobertura forestal (Broadbent et al., 2008; Imbach et al., 2017). Paralelamente, la expansión de la frontera

agrícola ha llevado a la tala y quema de áreas forestales para dar paso a la agricultura y ganadería, exacerbando la deforestación y la degradación del suelo (Kaimowitz & Smith, 2001; Redo et al., 2012).

La plaga del gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) representa un desafío significativo para los ecosistemas de conífera debido a su impacto ambiental, social y económico (Billings, 2011). Originaria de América del Norte, esta plaga ha trascendido fronteras, propagándose a otros continentes a través del comercio internacional de madera y productos forestales (Evans et al., 2016). En países como México y Estados Unidos, el gorgojo descortezador ha ocasionado pérdidas económicas considerables en la industria maderera, además de tener repercusiones negativas en la biodiversidad y la calidad del aire. (Fettig et al., 2007; Six & Bracewell, 2015)

Es capaz de causar grandes daños en los bosques de pino y puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y la economía de los países afectados. Por esta razón, es necesario realizar monitoreo constante de los factores que influyen en su desarrollo. Uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado el país es el ataque del gorgojo, una plaga que ha causado graves daños en los ecosistemas de coníferas.

El gorgojo se alimenta del tejido meristemático secundario o Cambium de los árboles, lo que debilita su estructura y los hace más susceptibles a enfermedades y otros agentes externos. La plaga ha sido responsable de la muerte de millones de árboles en todo el país, lo que ha generado una serie de consecuencias negativas para el medio ambiente y la economía del país.

En Honduras, según el informe sobre el último episodio de la plaga (2013-2016), se estiman afectadas 511,504 ha de bosque, causando la muerte del bosque de conífera de estas áreas (ICF, 2017, pág. 4)

La detección temprana y la gestión adecuada son clave para prevenir la propagación de esta plaga y minimizar sus efectos negativos en el medio ambiente y la economía. La implementación de prácticas forestales sostenibles, como la diversificación de especies y la promoción de la regeneración natural, puede reducir la vulnerabilidad de los bosques a esta plaga y aumentar su resiliencia frente a otros impactos ambientales.

La gestión de riesgos es importante en la detección de plaga desde la prevención, monitoreo, evaluación de riesgos hasta la coordinación. En prevención, la gestión de riesgos permite la identificación temprana de áreas de alto riesgo y la implementación de medidas preventivas para evitar la propagación de la plaga. En el monitoreo, también implica la implementación de programas de monitoreo para detectar la presencia de la plaga en áreas vulnerables. Esto

puede incluir la colocación de trampas para capturar insectos adultos y la inspección visual de árboles afectados.

La evaluación de riesgos también implica la evaluación de los posibles impactos de la plaga en los bosques y las comunidades locales. Esto puede incluir la evaluación de los riesgos económicos, ambientales y sociales asociados con la presencia de la plaga. En la coordinación, la gestión de riesgos también implica la coordinación entre diferentes agencias y grupos interesados en el control de la plaga. Esto puede incluir la colaboración entre las autoridades forestales, las empresas de manejo forestal, los propietarios de tierras y las comunidades locales.

La gestión de riesgos es fundamental en la detección y control del gorgojo descortezador del pino. Al implementar medidas preventivas, programas de monitoreo y evaluaciones de riesgos, se pueden minimizar los impactos económicos, ambientales y sociales de esta plaga forestal.

En Centroamérica, específicamente, no se ha desarrollado un programa de investigación que permita entender la relación entre los factores que influyen en la ocurrencia de plagas del *Dendroctonus. frontalis Zimmermann*. Esto incluye factores climatológicos, biológicos, geográficos y ecosistémicos. El análisis de estos factores puede ayudar a predecir eventos de gran magnitud y enfocar acciones que permitan reducir los impactos en los ecosistemas de conífera del país. (Rivera, et al., 2010, pág. 71)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés) son un sistema integrado que permiten la recopilación, almacenamiento, análisis y visualización de datos geográficos y espaciales. Estos sistemas permiten integrar datos de diferentes fuentes, como mapas, fotografías aéreas, imágenes satelitales, y datos de sensores remotos, así como información de diferentes disciplinas, como geografía, cartografía, topografía, estadística y análisis espacial.

El surgimiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitó el análisis de grandes volúmenes de datos y posibilitó su estudio de forma espaciotemporal. Por otro lado, las características de las imágenes satelitales que tienen diferentes resoluciones, debido a la discriminación de la luz captada por los sensores aerotransportados en plataformas satelitales, en distinta temporalidad permitieron observar la superficie terrestre en forma periódica para complementar los estudios sobre el medio ambiente. (Ferrelli & Solange, 2015, pág. 242)

El uso de los SIG también ayuda a mejorar la eficiencia y la efectividad de las operaciones de manejo y conservación de los bosques. Por ejemplo, los expertos pueden utilizar los SIG para identificar las áreas más susceptibles al ataque del gorgojo y para planificar las operaciones de monitoreo y control de la plaga. De esta forma, se pueden reducir los costos

y maximizar la eficiencia de las operaciones, lo que ayuda a proteger los bosques y a garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Son un sistema integrado muy útil para la implementación de sistemas de monitoreo en diferentes ámbitos. Los SIG permiten integrar datos de diferentes fuentes y visualizarlos en un mismo mapa, lo que facilita el análisis y la interpretación de la información.

En el ámbito de la gestión de riesgos, los SIG pueden utilizarse para el monitoreo de eventos climáticos extremos, como sequías, inundaciones, incendios forestales, y deslizamientos de tierra. Los mapas y modelos generados por los SIG pueden ser utilizados para identificar áreas vulnerables y para la planificación de medidas de prevención y respuesta ante estos eventos.

En este contexto, la utilización de imágenes satelitales, sistemas de información geográfica y plataformas libres como GEE (Google Earth Engine) es una herramienta clave para realizar análisis, procesamiento y monitoreo del bosque de conífera del país y las variables que influyen en este proceso. Estas herramientas permiten generar mapas temáticos, análisis de cambio en el tiempo, análisis de la distribución de la plaga, entre otros.

Además, la utilización de técnicas de teledetección y SIG pueden ayudar a identificar las áreas más vulnerables a la propagación de la plaga, lo que permite enfocar los esfuerzos de monitoreo y control en las áreas más críticas. Asimismo, estas técnicas pueden ayudar a evaluar la efectividad de las estrategias de control implementadas.

El uso de los SIG también permite mejorar la comunicación y coordinación entre los diferentes actores involucrados en la conservación de los bosques. Los SIG permiten compartir información geoespacial de manera fácil y rápida, lo que ayuda a los expertos a tomar decisiones más informadas y a coordinar sus operaciones de manera más efectiva.

En conclusión, a través del monitoreo constante de los factores ecosistémicos, climatológicos, biofísicos y geográfico que influyen en el desarrollo de la plaga del gorgojo descortezador del pino, la investigación propone una metodología consistente, coherente, transparente y clara para que las instituciones responsables de los bosques y medio ambiente puedan adoptar como una herramienta complementaria para la mejora en la toma de decisiones como lo es el tema de gestión de riesgos por plaga.

V. HIPÓTESIS

A través de los factores ecosistémicos, climatológicos, biofísicos y geográfico es posible evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera a la plaga del *Dendroctonus frontalis Zimmermann,* haciendo uso de los sistemas de información geográficas.

CAPITULO II

VI. MARCO REFERENCIAL

6.1. Método

El bosque de conífera es afectado por la plaga del gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) que es una plaga agresiva que afecta su importancia económica, ambiental y social. A nivel mundial se han registrado diferentes episodios o ataques severos de esta plaga. En los años 1962-1965, 1982 y 1999-2003 se registraron en Honduras episodios de afectación de *D. frontalis Zimm.* e importantes afectaciones en los ecosistemas de conífera. Entre los años 2014 y 2016 se presentó el último episodio severo de ataque de plaga en el país, el cual se estima destruyó más de medio millón de hectáreas de bosque.

Se está desarrollando investigación que tiene un alcance a nivel nacional y específicamente en los sitios que están cubiertos por el ecosistema de conífera, que son los que presentan mayor susceptibilidad al ataque de la plaga del gorgojo del pino. La investigación lleva el nombre: "Los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para monitoreo de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) en Honduras, desde los años 2015-2022", por lo que se describe como se desarrolló esta investigación.

El método para utilizar en la investigación es el hipotético deductivo que es *"*un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ellas conclusiones que deben confrontarse con los hechos*"* (Bernal, 2010, pág. 60).

En la siguiente ilustración se esquematiza la definición del método a utilizar en la investigación:

Ilustración 1. Esquema de método a utilizar en la investigación

La aplicación de este método se realizará utilizando las variables climáticas como temperatura y precipitación, junto a variables geográficas, ecosistémicas y biológicas para determinar la posible existencia de plaga en los ecosistemas de conífera y así monitorear la susceptibilidad ante el ataque del gorgojo que permita proteger la cobertura forestal en Honduras, utilizando SIG que analizan las condiciones biológicas, climáticas, geográficas y ecosistémicas. Se considera que, en el último episodio severo de plaga en el país, uno de los factores que más influyó en la propagación fueron las condiciones climáticas, se presentó un periodo con pocas lluvias y elevadas temperaturas; esto aunado a las condiciones de poco manejo del bosque y a la afectación y debilitamiento de los árboles que causan los incendios forestales en los ecosistemas de conífera de todo el país.

En el abordaje, es necesario hacer uso de una serie de enfoques que permite explicar cómo se va a realizar la investigación. Esta es cuantitativa, aplicada, transversal, descriptiva y explicativa.

Es cuantitativa porque se realizará la recolección de datos sobre los ataques históricos de la plaga y las condiciones climatológicas, biológicas, geográficas y ecosistémicas en esos momentos y para esos sitios. Según Monje, la investigación cuantitativa, “parte de cuerpos teóricos aceptados por la comunidad científica con base en los cuales formula hipótesis sobre relaciones esperadas entre las variables que hacen parte del problema que se estudia.” (2011, pág. 13).

Es aplicada, porque busca resolver un problema en particular que afecta a la sociedad como lo es la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera al ataque de la plaga del gorgojo y con ello la muerte de miles de hectáreas de bosque a nivel nacional, por lo que, como

investigación, cuenta con la relevancia e impacto a nivel social y científico. Según Banegas, la investigación aplicada, "busca resolver problemas que aquejan a una sociedad en particular, por lo que su justificación como investigación será siempre por la relevancia social que presenta, es propia en ella las investigaciones realizadas por todas las especialidades de la ingeniería, mercadólogos, financistas, psicólogos, trabajadores sociales, comunicadores sociales, pedagogos" (2019, pág. 80).

Es transversal porque contemplará la información generada del último brote de severo de plaga en el país, el cual tuvo lugar a partir del año 2014 hasta el 2016; además, se considerará información relevante de eventos de plaga sucedidos en menor escala desde el 2016 hasta el 2019. Müggenburg y Pérez, describen que con este enfoque "se recolectan datos en un sólo momento, en un tiempo único y su propósito se centra en describir variables y analizar su comportamiento en un momento dado". (2007, pág. 3).

Se realizará la descripción y explicación de cada una de las variables que se analicen y los fenómenos que tienen relación con la incidencia de plaga de gorgojo en el ecosistema de conífera, asimismo, se pretende medir y explicar el grado de relación existente entre las variables que contempla la investigación y los efectos de estos en cuanto a la plaga. Hernández y otros, mencionan que una tesis es descriptiva y explicativa cuando, "en el primero de los casos los estudios miden de manera más bien independiente los conceptos o variables con los que tienen que ver, en el segundo de los casos, van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales" (1991, pág. 71-74).

La investigación se enmarca en la línea de investigación definida por la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) como "Evaluación de vulnerabilidad" ya que lo que se determinará es la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo de pino (*Dendroctonus forntalis*).

Como parte del proceso metodológico, es necesario hacer uso de diferentes técnicas que permiten explicar cómo se va a realizar la recolección y análisis de la información y/o datos, como ser revisión de bases de datos o análisis de contenido y el uso de información proveniente de sensores remotos.

Para la recolección de información se hará uso de bases de datos, archivos con información e informes oficiales que maneja el Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) sobre el último episodio de plaga en el país. Según Banegas, la recolección de los datos no es más que un: "conjunto de herramientas que desde las ciencias idiográficas y nomotéticas han diseñado redes metodológicas para poder captar la información que el investigador necesita para lograr aprendizajes y nuevos conocimientos" (2019, pág. 141). Los datos de las variables considerados serán procesadas y analizadas con

el uso de Sistemas de Información Geográficas y específicamente en la plataforma Google Earth Engine (GEE).

6.2. Fuentes y recursos

La fuente de la información es de tipo secundaria, la cual será de la Oficina Especializada en Plagas del ICF. Esta información está consolidada en archivos formato Excel y bases de datos digitales e informes oficiales sobre el episodio de plagas en el país. Asimismo, se hará uso de la información proveniente de los sensores remotos en diferentes servidores (Satelital, NASA y CHIRPS); y que miden diferentes variables climáticas, físicas, biológica y ecosistémicas, entre ellas las que considera esta investigación. Tanto la información proveniente del ICF como de la NASA, son datos oficiales y de uso libre por lo que es posible el acceso a la misma.

Para esta investigación los recursos están valorados como Financieros y Materiales. Se consideran los recursos como: "conjunto de elementos disponibles para resolver una necesidad o llevar a cabo una empresa. Recursos naturales, hidráulicos, forestales, económicos, humanos" (García & López, 2014, pág. 4).

Los recursos financieros para la investigación están calculados alrededor de Lps. 112,000.00 distribuidos en asesoría en temas de programación para la elaboración de la herramienta, depreciación y/o compra de equipo a utilizar y papelería.

Mientras que los recursos materiales contemplan el uso de la plataforma de GEE, imágenes satelitales, programas de procesamiento de datos digitales y computadoras de alta capacidad.

Para la creación de esta herramienta, no se utilizará una muestra ya que lo que se busca es el uso de sistemas de información geográfica para evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera en todo el país ante el ataque de la plaga del gorgojo descortezador. A pesar de que se utilizará información de sitios puntales y que será facilitada a través del ICF, esta permitirá inferir la información y generar datos a nivel nacional.

6.3. Análisis

El proceso para la elaboración de este sistema de monitoreo se comenzó con la identificación del problema y de la necesidad de construir una herramienta que genere información para prevenir y controlar el ataque de la plaga del gorgojo descortezador.

El territorio nacional está cubierto en gran medida de bosque (56%), dentro de lo que se contabiliza que el ecosistema de conífera representa gran parte de esta totalidad (30%). El ecosistema de conífera es afectado por la plaga del gorgojo descortezador de pino

(*Dendroctonus frontalis Zimmermann*) que afecta su importancia económica, ambiental y social.

Los impactos negativos del gorgojo descortezador del pino incluyen la afectación directa de los recursos naturales como la cobertura forestal, el agua, suelo y con ello los nutrientes. En el último episodio de la plaga en el país (2013-2016), las afectaciones en el ecosistema de conífera del país superan el medio millón de hectáreas de bosque.

Otro impacto importante del ataque del gorgojo descortezador del pino es sobre los bosques en las áreas de las zonas productoras de agua. Este quizá sea el impacto más significativo y alarmante, ya que afecta el derecho al agua y saneamiento, tanto de los pobladores que habitan dentro o cerca de los bosques afectados, como de los habitantes de zonas más retiradas, es decir a toda la población de forma directa e indirectamente.

Además, la plaga del gorgojo descortezador del pino afecta los medios de vida de los habitantes de las comunidades que, por medio de contratos de manejo forestal comunitario, se han organizado para acceder a los bosques nacionales.

En Honduras solo se ha desarrollado una investigación que permita entender la relación entre los factores que influyen en la ocurrencia de plagas del *D. frontalis Zimm* (estudio realizado por Valdez, et al. 2020). Estos factores incluyen tanto la cobertura forestal como aspectos climáticos, biológicos, y geográficos. Analizarlos puede ayudar a predecir eventos de gran magnitud y enfocar acciones que permitan reducir los impactos en los ecosistemas del país.

Asimismo, a través de la utilización de imágenes satelitales, sistemas de información geográfica y plataforma libre como GEE es posible realizar análisis y monitoreo del ecosistema de conífera del país y las variables que influyen en este proceso.

A través de esta plataforma se establecerá un sistema de monitoreo forestal para el monitoreo de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo que permitirá proteger la cobertura forestal en Honduras.

El sistema de monitoreo forestal realizará la combinación de la información de diferentes variables en un modelo desarrollado en lenguaje de programación (JavaScript) para recrear las condiciones que fueron identificadas en los momentos de ataque de plaga, a través de la información del evento severo de plaga en el país (muestras de entrenamiento), de esta manera, el modelo generará la alerta de los sitios que cuentan con las condiciones idóneas para que se produzca un ataque.

Para el establecimiento de esta herramienta se analizará la relación existente entre diferentes variables para crear las condiciones propias que, según la literatura y las experiencias en el

país, son las necesarias para que la población de gorgojo se proyecte y se convierta en una plaga. Estas variables están agrupadas en variables ecosistémicas, climatológicas, biofísicas y geográficas.

Cada una de estas variables será analizada a través de la información existente en las bases de datos del último ataque severo de plaga en el país y la información de las variables que serán tomadas de los diferentes sensores remotos que se utilizan a nivel mundial para monitorear estas condiciones.

Esta información será recolectada y procesada a través de diferentes métodos como ser: Análisis de contenido, Experimentos y Técnicas proyectivas. El análisis de contenido será aplicado en la revisión y clasificación de la información contenida en las bases de datos de los sensores que miden cada una de las variables, así como en la revisión de los informes o documentos sobre las plagas y los episodios recientes en el país.

En la formulación del modelo que hará funcionar el sistema, se utilizará la técnica de experimento ya que se realizarán diferentes pruebas y entrenamientos con la información de las variables para recrear las condiciones en que se dieron los ataques de plaga. Además, se realizarán técnicas proyectivas utilizando el modelo probabilístico de Random Forest que consiste en un gran número de árboles de decisión que permiten alcanzar una mejor precisión y estabilidad del modelo.

Breiman (2001), el creador del algoritmo Random Forest, describe esta técnica de la siguiente manera: "Random Forest construye una colección de árboles de decisión en forma aleatoria, utilizando diferentes subconjuntos de datos de entrenamiento y atributos seleccionados aleatoriamente. La clasificación final se determina por votación o promedio de las predicciones individuales de los árboles de decisión. Además, el algoritmo proporciona una medida interna de la precisión de las predicciones mediante una forma de validación cruzada, lo que permite evaluar su rendimiento y ajustar los parámetros adecuadamente".

Esta característica de Random Forest, donde se utilizan múltiples árboles de decisión entrenados con subconjuntos aleatorios de casos, permite mejorar la precisión y robustez de las clasificaciones en imágenes de teledetección (Belgiu & Drăguţ, 2016). Además, como mencionado por Cutler et al. (2007), "la validación cruzada interna de Random Forest ayuda a evitar el sobreajuste y proporciona una estimación confiable de la precisión del modelo".

Este análisis permitirá la evaluación de la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera en Honduras ya que, según estudios realizados, el gorgojo descortezador del pino es considerado de las plagas forestales más importantes en los ecosistemas de conífera y los ataques masivos de estos insectos provocan la muerte del bosque, afectando la industria maderera y a las personas que viven directamente de este recurso.

Todo el proceso se realizará en la plataforma de GEE que, es una plataforma tecnológica de seguimiento en línea y libre, que ha puesto a disposición del público colecciones numerosas de imágenes satelitales actuales e históricas a nivel mundial, así como diferentes índices sobre variables climáticas, geográficas, ecosistémicas y biofísicas. Las mismas provienen de diferentes sensores (Modis, Landsat, Sentinel y otros datos de imágenes) y son de variada resolución espacial.

La motivación para desarrollar un sistema que permita reducir el riesgo de ataques de plagas y minimizar su impacto en los ecosistemas, surge de la necesidad de contar con un sistema que permita detectar, monitorear y prevenir la aparición de plagas y que puede ayudar a minimizar su impacto y promover un manejo sostenible de los recursos naturales.

Desde hace muchos años, los países realizan esfuerzos por monitorear los recursos con los que cuentan y el estado sanitario de estos. En los últimos años se ha mejorado la planificación y gestión para la toma de decisiones técnicas y políticas enmarcadas en el uso de la tierra a nivel nacional, regional y local para alcanzar el manejo forestal sostenible dadas las mejoras en la representación gráfica y monitoreo de la cobertura y de los ecosistemas.

Algunas de las herramientas para este monitoreo están basadas en la información recolectada en campo a través de Inventarios Forestales y la que proporcionan los Sensores Remotos a través de imágenes satelitales que a su vez sirven de base para la elaboración o construcción de mapas temáticos.

Sin embargo, en el país hacen falta investigaciones y herramientas que permitan el monitoreo de agentes que puedan causar daños a los recursos forestales y específicamente a la plaga de *D. frontalis Zimmermann* que ataca directamente al ecosistema de conífera.

La susceptibilidad de los ecosistemas de conífera y de las organizaciones del país para enfrentar un desastre de este tipo, se vio puesta a prueba con el episodio de plaga que se dio en el país entre el 2013 al 2016, donde se estima que las pérdidas económicas fueron altas, pero también lo fue el impacto en el recurso bosque, agua, suelo y en los sectores de la sociedad que viven directamente de productos forestales.

El objetivo de usar un sistema de información geográfico, alojado la plataforma de Google Earth Engine (GEE) para evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera ante el ataque de la plaga del gorgojo en Honduras, analizando información desde los años 2015-2022, es que permita mejorar la planificación y gestión del riesgo en temas de ataques de plaga del gorgojo descortezador del pino y proponer un análisis completo que permita una mejora en la toma de decisiones.

Asimismo, hacer uso de las tecnologías vanguardistas y de la información de acceso libre que nos permiten realizar procesos automatizados, con resultados aceptables y de acuerdo con nuestras necesidades.

No obstante, una de las razones de mayor peso es la generación de información que estará a disponibilidad de los tomadores de decisión y les permitirá estar preparados para responder en tiempo y forma adecuada a un escenario de riesgo. Esto permitirá el fortalecimiento de las organizaciones y el uso eficiente de los recursos con los que se cuentan para mantener los bosques en estado sanitario adecuado.

6.4. Técnicas para recolección de información

Para identificar la variabilidad espacial de la susceptibilidad del bosque de conífera al ataque de *Dendroctonus frontalis*, la metodología diseñada sigue tres pasos principales: (1) Recopilación y procesamiento de datos primarios, (2) análisis exploratorio de variables y modelado y (3) validación espacial.

6.4.1. Análisis de Contenido: Recopilación y procesamiento de datos

Revisión, clasificación y análisis de bases de datos para diferentes variables y fuentes. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) mantienen una base de datos que vincula datos espaciales con información descriptiva de las diferentes variables.

Se recopilan diferentes tipos de conjuntos de datos: datos de sensores remotos para derivar las variables de condición de la vegetación, datos de temperatura y precipitación, datos del estado biofísico y un modelo de elevación digital para derivar factores geográficos.

Los datos de reflectancia de superficie derivados del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), a bordo del satélite Terra, cada 8 días serán adquiridos para el período comprendido entre 2015 y 2022 (Justice et al., 1998). Es esencial mencionar que los datos de reflectancia superficial de MODIS necesitan un proceso de corrección para eliminar las perturbaciones causadas por las nubes, lo que es crucial para estimar de manera precisa el Normalized Difference Moisture Index (NDMI) durante cada mes de la estación seca, específicamente de enero a mayo (Savtchenko et al., 2004; Vermote et al., 2009). El NMDI combina los canales NIR y SWIR y, por lo tanto, mejora la sensibilidad para detectar sequías y es muy adecuado para estimar la humedad del suelo y la vegetación.

El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) se encontró que es un factor importante en para evaluar las condiciones de humedad del combustible vivo. Los valores de NDMI y NDVI se promedian para todo el año durante 2015 al 2022.

Para representar las condiciones climáticas, se utiliza la precipitación mensual promedio durante la estación seca de CHIRPS. La Precipitación InfraRoja del Grupo de Amenazas Climáticas, CHIRPS por sus siglas en inglés (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Atation data) es una base de datos pluviométrica casi global de más de 30 años, comenzando en el 1981.

Para derivar la variable geográfica, se utiliza el Modelo de Elevación Digital (DEM) generado por la NASA/JPL (SRTM), el cual tiene una resolución espacial de 30 metros, para derivar elevación (msnm) y pendiente (grados) usando las herramientas de superficie en ArcGIS.

Los conjuntos de datos para la variable ecosistémicas fueron adquiridos del Sistema Nacional de Información Territorial de Honduras (SINIT). Recolectadas las capas de SIG con tipos de climas. Los datos de cobertura forestal son extraídos del Geo portal (Plataforma cartográfica del ICF).

6.4.2. Experimentos: análisis exploratorio de variables

Como se menciona en un estudio realizado por Liaw y Wiener (2002), "el promedio de muchas predicciones realizadas por árboles de decisión independientes reduce la variabilidad y el sesgo inherentes a cada árbol individual, mejorando así la precisión general del modelo. Al promediar las predicciones de múltiples árboles, se mitigará la incertidumbre y se obtendrá una estimación más robusta".

Esta característica del algoritmo ha sido respaldada por investigaciones adicionales. Según Cutler et al. (2007), "Random Forest ha demostrado tener un rendimiento superior en términos de precisión de predicción en comparación con los métodos basados en árboles individuales, ya que el promedio de las predicciones de múltiples árboles reduce la variabilidad y el sesgo, superando así el problema de la incertidumbre inherente a los árboles individuales".

La idea principal de RF es combinar muchos árboles de decisión utilizando una serie de muestras de arranque y eligiendo algunas variables explicativas en cada nodo.

El algoritmo de RF tiene dos etapas, una es la creación de un bosque al azar, y el otro es hacer una predicción del modelo de bosque aleatorio creado en la primera etapa. En la primera etapa, el RF funciona seleccionando varios árboles de decisión utilizando muestras de bootstrap y eligiendo algunas variables explicativas en cada nodo.

El método bootstrap, introducido por Bradley Efron en 1979, es una técnica estadística que estima la variabilidad de una estadística mediante el muestreo repetido con reemplazo de un

conjunto de datos. Esta metodología es particularmente valiosa cuando se trata de muestras pequeñas o cuando la distribución subyacente de los datos es desconocida. Al generar múltiples muestras a partir de los datos originales y recalculando la estadística en cuestión, el bootstrap proporciona una representación robusta de la incertidumbre asociada, permitiendo la construcción de intervalos de confianza, cálculo de errores estándar y otros análisis inferenciales (Efron, 1979; Efron & Tibshirani, 1994).

Una cierta cantidad de las observaciones originales que se obtienen de las bases de datos del reciente episodio de plaga en el país y que se encuentran en el ICF, se incluyen al menos una vez como la muestra. y las observaciones que quedan fuera se llaman muestra de no ocurrencia a plagas (Muestras de plaga y Muestras de No plaga).

Los árboles de clasificación o regresión se ajustan individualmente a la muestra y, en los nodos, solo se utiliza un subconjunto aleatorio de variables. La segunda etapa es la predicción, que se basa en los resultados mayoritarios de todos los árboles.

El algoritmo de Random Forest también incorpora una medición de la importancia de la variable, que muestra los factores más relevantes que contribuyen a la susceptibilidad del ecosistema de conífera ante el ataque del gorgojo. Específicamente, la importancia de la variable se mide por la disminución media en la precisión de la permutación y el aumento medio en la pureza del nodo.

En Google Earth Engine (GEE), el algoritmo de RF se ejecuta a través de la siguiente función, (ee.Classifier.randomForest) además, el algoritmo se puede configurar de tres maneras (ee.ClassifiersetOutputMode), basado en modo clasificación (mapas de tipos de clases), modo regresión (mapas con valores continuos predichos) y modo probabilidad (mapa con valores reescalados entre 0 y 1).

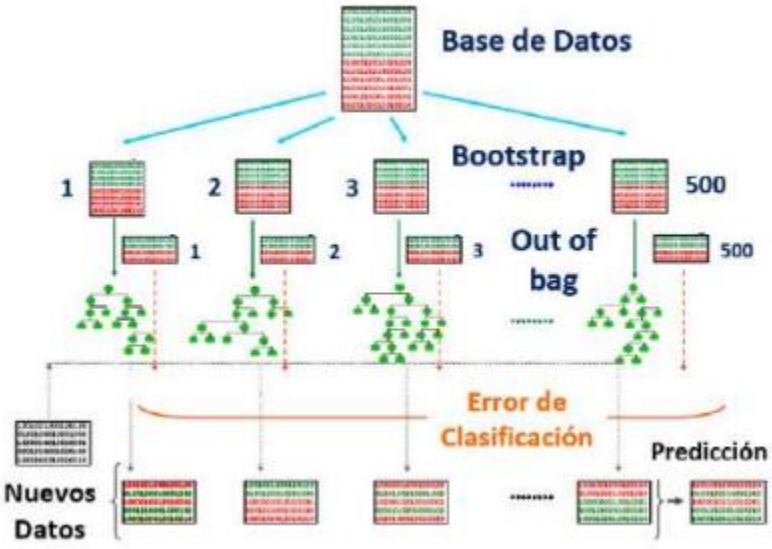


Ilustración 2. Estructura del algoritmo de Random Forest

Fuente: Muñoz, M. y Paltán, M. (2021).

El editor de código es un entorno de desarrollo integrado o entorno de desarrollo interactivo (IDE por sus siglas en inglés) basado en web para escribir y ejecutar scripts. También es un IDE basada en la web que nos ayuda a desarrollar de una manera amigable scripts o aplicaciones mediante el motor JavaScript. El Editor de código está diseñado para que los flujos de trabajo geoespaciales en desarrollo complejos sean más rápidos y fáciles. El Editor de código de GEE contiene un conjunto de elementos que pueden ser utilizados para facilitar el flujo de trabajo. Este editor de código es muy amigable y fácil de utilizar sin necesidad de ser un programador experimentado.

6.4.3. Técnicas proyectivas: modelado y validación espacial

Para la utilización del modelo de Random Forest, se ejecuta el modelo utilizando 6 variables con 12 categorías de variables explicativas no correlacionadas. Realizando ajustes con las variables más relevantes y, una vez que se ha ajustado el modelo, se realiza la predicción de la susceptibilidad del ecosistema de conífera al ataque del gorgojo en todo el sitio de estudio. Después de la predicción, se validan lo resultados utilizando la validación interna utilizada por el Random Forest. La base de datos de ataque del gorgojo en el anterior episodio (2013-2016), es utilizada para entrenar el modelo y generar los ataques dados en el 2016-2022.

Considerando esta información como entrenamiento, el sistema es programado para encontrar las áreas que muestren la combinación de variables que permiten el ataque de plaga y la ubicación geográfica del ecosistema de conífera que es susceptible en ese momento, generando una alerta que permite a las autoridades realizar acciones para el control del brote de plaga de forma rápida y oportuna.

El Error Cuadrático Medio (RMSE) es una métrica esencial en la evaluación de modelos predictivos, ofreciendo una medida cuantitativa de la discrepancia entre las predicciones del modelo y los valores observados. En el contexto de modelos probabilísticos que emplean el algoritmo Random Forest dentro de Google Earth Engine (GEE) para estudios de susceptibilidad de plagas, el RMSE no solo permite una evaluación y comparación precisa del rendimiento del modelo, sino que también facilita la identificación de áreas o condiciones donde el modelo puede tener deficiencias (Breiman, 2001; Cutler *et al*, 2007).

Además, la integración de este algoritmo con GEE, una plataforma de análisis geoespacial a gran escala, potencia la capacidad de realizar análisis detallados y precisos en estudios ecológicos y geoespaciales. (Gorelick *et al*, 2017)

6.5. Estudios relevantes sobre la plaga del gorgojo descortezador del pino en Honduras

Probabilidad de ocurrencia de ataques de escarabajos descortezadores en bosques de coníferas en Honduras bajo escenarios normales y de cambio climático.

Los bosques de coníferas cubren aproximadamente el 27% de Honduras (*3 millones de ha), y han sido tradicionalmente afectados por brotes de escarabajo descortezador (*Dendroctonus frontalis*). Estos brotes afectan la salud del ecosistema y predisponen a más ataques. Se desarrolló un modelo logístico para evaluar la susceptibilidad de los bosques a un ataque de escarabajos.

Los modelos se ajustaron utilizando variables climáticas, topográficas y de teledetección. Se muestra un método para generar una distribución al azar de puntos basado en un índice de humedad multitemporal. El umbral optimizado para convertir el continuo de probabilidades en 0 y 1 valor fue 0,65. La precisión general fue del 68,7 %. También desarrollamos modelos que integran escenarios de cambio climático.

Las predicciones señalan un aumento en la susceptibilidad general a un ataque cuando se incluyen escenarios de cambio climático. Hasta donde se sabe, este es el primer esfuerzo para desarrollar un modelo espacialmente explícito de la probabilidad de brotes de escarabajos en un país centroamericano. (Hernández, et al., 2012)

Caracterización de patrones espaciales de brotes de escarabajos descortezadores de pino durante la estación seca y lluviosa en Honduras con la ayuda de sistemas de información geográfica y datos de teledetección:

En esta investigación se destacó que es fundamental identificar aquellas áreas que tienen una alta susceptibilidad a un brote de Escarabajo descortezador del pino (PBB) durante las estaciones seca y lluviosa. Para ello, se asoció los puntos históricos de brote de PBB (2017-2019), con una serie de variables ambientales y antropogénicas que, según la revisión de la literatura, han afectado el inicio y la propagación de los brotes de PBB.

Para evaluar las variables climáticas actuales se utilizaron los datos de teledetección subdivididos en datos MODIS y datos de elevación del terreno de resolución múltiple global (GMTED). Utilizamos cuatro productos MODIS diferentes: datos de reflectancia superficial (MOD09A3) con una resolución de 500 m y resolución temporal de 8 días, el MODIS temperatura de la superficie terrestre (LST), (MOD13A2) con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 8 días, el índice de área foliar MODIS/producto FPAR (MOD15A2H). Los datos de WorldClim son una versión mejorada y los adquirimos y

promediamos la estación seca y la estación lluviosa. Estos datos tienen una resolución espacial de 1 km, fue proyectado a UTM y remuestreado a 500 m.

Para evaluar el vigor de la vegetación, se utilizó el índice de humedad de sequía normalizado estimado a partir del producto de reflectancia superficial MODIS (MOD09A3). Para darnos una idea de la densidad del bosque, se compararon dos productos, el índice de área foliar MODIS (LAI-MOD15A2H) y los campos continuos de vegetación MODIS (VFC-MOD44B). Se incluyó la elevación, el aspecto y la pendiente como variables y se adquirieron estos datos de elevación del terreno de resolución múltiple global del GMTED a una resolución espacial de 500 m. Finalmente, se utilizaron datos de sistemas de información geográfica para derivar la proximidad a diferentes tipos de carreteras como datos antropogénicos y densidad de incendios forestales.

Se realizó un análisis preliminar de las variables y se eliminó las que muestran menor importancia. Además, se integraron las variables más relevantes identificadas con los puntos de PBB utilizando el algoritmo Random Forest (RF) para ajustar el modelo y luego se predijo la susceptibilidad actual al brote de PBB para la estación seca y lluviosa.

Los resultados indicaron que las variables climáticas pesan mucho en la determinación de áreas de alta susceptibilidad. Los resultados de predicción muestran una susceptibilidad alta y muy alta en las partes nororiental y central del país, especialmente. Los resultados obtenidos pueden conducir a mejores medidas preventivas y de control para reducir los efectos ecológicos negativos que causan los brotes de PBB. Los resultados obtenidos pueden conducir a mejores medidas preventivas y de control para reducir los efectos ecológicos negativos que causan los brotes de PBB. (Valdez, et al., 2020)

VII. MARCO CONCEPTUAL

7.1. Gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis Zimmermann*)

Las áreas montañosas de América del Norte, Europa y China están mayormente cubiertas por ecosistemas de coníferas, que también se encuentran en partes más limitadas en los trópicos y América Central (Farjon, 2008). Estos bosques se extienden desde México hasta el centro-oeste de Nicaragua e incluyen áreas con una combinación de coníferas y otros tipos de árboles (Perry, 1991). El género más común en estos bosques es el Pinus (Richardson, 1998). Estas especies están presentes tanto en los bosques nubosos de hoja ancha en las áreas montañosas más altas y húmedas (Bruijnzeel *et al*., 2011), como en los bosques tropicales húmedos de las tierras bajas, donde predominan las especies de hojas anchas (Gentry, 1988). Una gran parte de los bosques de pino-roble del centro y oeste de Honduras contiene especies

predominantes de *Pinus oocarpa* y *Quercus spp*. en las elevaciones más bajas, y *Pinus pseudostrobus* y *Liquidambar styraciflua* en las elevaciones más altas. (Styles, 1993)

En áreas donde las lluvias están distribuidas durante la temporada de verano, los árboles de hoja caducifolia suelen ser dominantes en comparación con las coníferas de clima templado. No obstante, las coníferas tienen la capacidad de establecer y alcanzar un dominio temporal (Landsberg y Gower, 1997) citado en (Waring, 2002).

El esosistema de coníferas en Honduras es un valioso recurso natural y una fuente importante de desarrollo. Sin embargo, a lo largo del tiempo, este ecosistema ha experimentado perturbaciones ecológicas y ha sufrido una disminución en su extensión, principalmente debido a los incendios forestales y a plagas como el gorgojo descortezador *Dendroctonus frontalis Zimmermann*. Morales y otros (2018), indican que el *D. frontalis Zimm.* es reconocida como una plaga forestal de gran importancia en los ecosistemas de coníferas, dado que sus ataques masivos ocasionan la muerte de los árboles, potenciando tanto a la industria maderera como al medio ambiente. (pág. 2)

Uno de los peligros con los que se encuentra el bosque de coníferas son los escarabajos descortezadores del pino del género *Dendroctonus* (Coleoptera: Scolytidae), que son las plagas forestales más destructivas en la región donde se encuentran los bosques de pinos nativos (Billings, et al., 2004). Esta especie de escarabajo es endémica del ecosistema de las coníferas, cuyos ataques se restringen generalmente a los pinos que están enfermos, debilitados por la explotación severa mediante la extracción de resina o que se encuentran en zonas de alta pendiente (falta de nutrientes).

Las epidemias se generan cuando se combinan temporadas de altas temperaturas extremas y escasa precipitación, lo cual crea condiciones propicias para un rápido crecimiento de las poblaciones de escarabajos. Esto les permite invadir y superar los árboles sanos y vigorosos mediante ataques masivos en un lapso de pocos días o semanas. Esto conduce a una severa mortalidad de los árboles, expandiéndose a un ritmo de hasta 15 m por día hasta que la falta de hospederos, las temperaturas extremas, el control directo u otros factores intervienen (Coulson y Klepzig 2011; Billings, 2011) citados en (Gomez & Hulcr, 2019, pág 4).

Entre las especies de pinos que se encuentran en Centroamérica, *Pinus oocarpa* y *Pinus caribaea* son los más susceptibles al ataque de gorgojos de la corteza. La reaparición de estos brotes suele ser cíclica, teniendo lugar generalmente con una periodicidad de 10-20 años con una duración de 2-5 años. Durante los periodos de brotes, si no se aplica ningún tipo de control, los escarabajos descortezadores pueden atacar incluso a los bosques sanos una vez que sus poblaciones alcanzan niveles elevados (Texas Forest Service, 2005).

Las temperaturas promedio del ambiente en el mes de junio, las disminuciones en la precipitación promedio de junio y julio, las variaciones climáticas en los meses cálidos han mostrado una correlación con la aparición y magnitud de los brotes del escarabajo del pino desde 1982 (Rivera, et al., 2010, pág. 70). Las diferencias climáticas entre regiones podrían influir en la comunidad del *D. frontalis* para amortiguar o exacerbar la dinámica cíclica de los brotes (Lombardero, Ayres, Hofstetter, Moser, & Lepzig, 2003, pág.450). Debido a la magnitud del impacto, la gestión y el control de *D. frontalis* son cruciales.

El gorgojo descortezador del pino *D. frontalis Zimm.*, pertenece al Orden Coleóptera, familia Scolytidae. Se considera una plaga de gran impacto debido a que ataca y causa la muerte de los árboles de forma individual, en grupos pequeños (brotes) o en infestaciones que abarcan extensas áreas. (López, et al., 2008, pág. 1).

Los adultos son escarabajos pequeños (miden 3 mm hasta 4 mm de largo, como la mitad de un grano de arroz). Inician sus ataques en pinos debilitados por rayos, fuegos, alta densidad de rodal u otras causas. Una vez que tengan más de 30-50 pinos infestados, los brotes son capaces de crecer o avanzar rápidamente si no se aplica ningún control. Bajo estas condiciones de plaga, los gorgojos pueden matar hasta pinos sanos en bosques ralos. (Ramos, 2016, pág. 7).

Los ataques causados por esta especie suelen tener su origen en áreas forestales con una gestión de manejo deficiente o en rodales con una densidad excesiva de árboles. Una vez que comienza el ataque, puede prolongarse durante varios años. En el país, son muy pocas las áreas boscosas que se someten a un manejo forestal adecuado, reduciendo las densidades de árboles y afecta negativamente su estado sanitario.

El ataque del *D. frontalis Zimm.* comienza cuando la hembra pone huevos a lo largo de las galerías en forma de “S” construidas entre la corteza y el tronco del árbol. Las larvas se alimentan de la corteza interior y pupan en cámaras próximas a la superficie de la corteza. Terminando su desarrollo, los insectos adultos se abren paso a través de la corteza y las hembras vuelan en busca de nuevos árboles para atacarlos. Aunque los gorgojos no barrenen la madera, introducen en ella el hongo de la mancha azul que penetra en el tronco, reduciendo drásticamente el valor comercial de los árboles. (Billings, et al., 2004, pág. 16)

Una vez que se produce el ataque en el tronco de un árbol, los insectos liberan feromonas que atraen tanto a machos como a hembras. Muchos gorgojos adultos pueden detectar estas feromonas y olores de resina y su concentrado ataque puede superar las defensas naturales del árbol.

La detección y reconocimiento del ataque causado por *D. frontalis Zimm.* en los árboles de pino es gracias a los grumos de resina que se acumulan en los orificios de entrada, por los

desprendimientos de corteza, la cual presenta túneles y galerías en forma de serpentina (forma de S). Además, es posible observar presencia de aserrín fino de color rojizo que se acumula alrededor de la base del árbol en hojas de la vegetación del sotobosque, en telarañas y hasta en los mismos grumos de resina. Otros signos del ataque de estos insectos son la presencia de follaje amarillento y rojizo que comienza desde el ápice y continúa de forma descendente y finalmente el desprendimiento de acículas causándole la muerte. (Billings & Espino, 2005, pág. 4).

Es posible identificar tres fases en un bosque atacado por *D. frontalis Zimm.*, la fase uno se caracteriza porque sus árboles están aparentemente sanos ya que sus acículas aún son de color verde, pero es posible encontrar grumos de resina o aserrín en su tronco. En la fase dos, las acículas son de color amarillo y hay mayor presencia de grumos en el tronco del árbol, mientras que en la fase tres, las acículas son color rojo o café, el árbol está muerto y en su tronco se encuentran agujeros de salida, lo que indica que el gorgojo ya emigró a otro árbol. (Aguilera, 2019, pág. 22)

La temperatura del ambiente puede determinar la sobrevivencia de los gorgojos, se ha encontrado que aumentos en la temperatura promedio, anomalías climáticas de meses calurosos y afectación anual por incendios forestales influyen sobre la ocurrencia y extensión de plagas del *D. frontalis* (Rivera, et al., 2010, pág. 70). Según Gagne y otros (1982), a temperaturas entre 12.5 y 30 °C la supervivencia del gorgojo fue de 90% en condiciones de laboratorio, pero por encima de 30°C la supervivencia cayó, así como por debajo de los 12.5 °C. Citado por (USDA, 2011, pág. 16)

Otro de los factores que influye en la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera al ataque del gorgojo descortezador, son los daños causados por los incendios forestales. Cada año se registra la ocurrencia de incendios en el país y se contabilizan en una base de datos para estimar el área afectada y los sitios con mayor ocurrencia. Asimismo, a través de sensores remotos es posible obtener imágenes e información que permita determinar el área quemada para establecer áreas de susceptibilidad en este ecosistema.

El seguimiento de la vulnerabilidad, incidencia y manejo de la plaga *Dendroctonus sp*.es un proceso complicado que involucra la recopilación de datos sobre variaciones inusuales de temperatura, así como la ocurrencia y distribución de las precipitaciones (mediante análisis climático). También se requiere el análisis de la distribución espacial a través de la modelización, la predicción del clima, así como el estudio de propiedades geográficas, como el ángulo y la curvatura de la pendiente, la altitud y la profundidad del suelo. Además, se deben considerar factores biológicos, entomológicos, y ecológicos para comprender el comportamiento de este organismo. (Klein, Oppelt, & Kuenzer, 2021)

Las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las técnicas de teledetección ofrecen nuevas perspectivas y herramientas para llevar a cabo un análisis espacial de alta calidad en el monitoreo de la susceptibilidad. Estas tecnologías nos permiten utilizar variables climáticas disponibles en diferentes periodos de tiempo y crear capas temáticas que facilitan la comprensión y el análisis de la información. Con la ayuda de estas herramientas, podemos examinar y evaluar la incidencia de la plaga *Dendroctonus sp*. y su manejo de manera más precisa y detallada en el contexto espacial. (Psomiadis, Charizopoulos, Efthimiou, Soulis, & Charalampopoulos, 2020)

La variabilidad temporal de las temperaturas mínimas anuales es de gran importancia desde el punto de vista ecológico, estimándose que un aumento de 3°C en la temperatura mínima anual podría ampliar los límites de distribución en 170 km del *D. frontalis*; por tanto, esta variabilidad permitiría atenuar aún más las restricciones climáticas en los límites de esta especie (Ungerer, Ayres, & Lombardero, 1999). Realizar el mapeo y monitoreo de los hábitats de *D. frontalis*, así como predecir los brotes, resulta fundamental para reducir el impacto negativo en el ecosistema y evitar la necesidad de recurrir a medidas de control directo de la plaga.

7.2. Factores Ecosistémicos

El término “ecosistema” fue acuñado por Tansley en 1935 como el “complejo de organismos junto con los factores físicos de su medio ambiente” en un lugar determinado, y propuesto además como una de las unidades básica de la naturaleza. (Armenteras, et al., 2015, pág. 83)

7.2.1. Cobertura forestal

Se puede denominar cobertura forestal a la “cobertura física y biológica de la superficie de la tierra, incluyendo superficies artificiales, agricultura, bosques (semi) naturales, tierras húmedas y cuerpos de agua”. (ICF & Programa Regional REDD/CCAD-GIZ, 2014, pág. 6)

La cobertura forestal está relacionada con la tipología de bosques, la cual indica los lugares debido a sus características físicas y climáticas, idealmente debe haber bosques que han sido alterados a causas naturales o humanas. Tanto para la cobertura forestal como para la tipología de bosques, es esencial establecer procedimientos de monitoreo que permitan identificar y ubicar espacialmente estos recursos.

La representación gráfica de la cobertura y los ecosistemas se logra mediante la creación de mapas y otras visualizaciones que muestran la distribución y composición de la vegetación y los ecosistemas en un área determinada. Estos mapas requieren una representación clara y comprensible de la información espacial, lo que facilita la comunicación y el análisis de los recursos forestales. (ICF & MiAmbiente+, 2017, pág. 6)

En Honduras hasta la fecha se han elaborado varios mapas temáticos de ecosistemas (FAO, 1965, OEA, 1985, AFE-COHDEFOR, 1995, COHEP, 2001, PARA, 2003, ESNACIFOR, 2009, ICF, 2014 e ICF, 2018) los cuales han servido de base para la planificación ambiental en muchas áreas de país. La información cartográfica y los datos de cobertura a nivel nacional han mostrado ser un insumo y una herramienta fundamental para la toma de decisiones a nivel de proyectos nacionales, regionales y locales.

7.2.2. Condición sanitaria del bosque

La sanidad y vitalidad de los ecosistemas forestales a nivel mundial pueden verse afectados por diversos agentes naturales, como plagas, sequías e incendios. Estos trastornos son componentes naturales de los procesos forestales, pero pueden representar desafíos significativos para lograr los objetivos de gestión forestal. (FAO, 2012, pág. 1)

Anteriormente las organizaciones han prestado más atención a las plagas en los cultivos agrícolas que a las plagas forestales. Sin embargo, en los últimos años, ha habido un creciente reconocimiento de la importancia de abordar las plagas forestales por los impactos significativos en estos ecosistemas.

Parte de la condición sanitaria de un bosque lo define el estado de la cobertura vegetal y del suelo. Díaz (2011), recomienda que, es esencial realizar procesos de recuperación de la cobertura vegetal del suelo y aplicar medidas de control y mitigación de la erosión de manera que sean lo más naturales posibles y no generen impactos ambientales adicionales. (pág. 80)

La condición de salud de los bosques es muy importante en todas las etapas de desarrollo, especialmente en la producción de madera. El estado sanitario de los árboles y los bosques afecta la calidad y productividad de la madera, así como la salud en general del ecosistema forestal, por lo que algunos países incluso tienen sus reglamentos para hacer exportación o importación de madera.

Según la FAO (2012), la evaluación del riesgo asociado a la importación de madera puede variar según varios factores como ser la zona de origen de la madera, las especies y el tamaño de los árboles, la presencia o ausencia de corteza y si la plaga en cuestión está presente y distribuida en el país de origen. (pág. 6)

El monitoreo de la plaga puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos, como la inspección visual, el uso de trampas o sistemas de captura que permite obtener información precisa sobre el comportamiento de las plagas, como su ciclo de vida, sus patrones de reproducción y sus hábitos de alimentación.

7.3. Factores Climatológicos

Según Rubí y Carla (2010), "el clima de un territorio es resultado de la combinación de diversos factores y elementos. Estos factores o elementos son aquellos que tienen influencia en las condiciones climáticas de un país. Algunos de esos factores son la Temperatura y la Precipitación". (pág. 31)

En las últimas décadas, el cambio climático ha incrementado las probabilidades de ataques de gorgojo descortezador del pino, especialmente cuando hay manifestaciones extremas del fenómeno El Niño. Esto conduce a variaciones en el clima que se prevé que afecten significativamente la frecuencia de los ataques de ataques de gorgojo descortezador del pino dejando el bosque más expuesto. (Valdez, et al.,2020, pág. 2)

7.3.1. Temperatura

Para Ordoñez (2011), la temperatura es "la cantidad de energía solar retenida por el aire en un momento dado" y puede ser estudiada tanto en el aire como en el suelo, influyendo en la selección de la fecha de siembra y el crecimiento de las plantas y los microorganismos. (pág. 11).

Actualmente, uno de los aspectos que más preocupan a la sociedad es el aumento de la temperatura, ya que a nivel mundial se ha sentido este cambio y se ha comenzado a sufrir sus efectos. Según Useros (2012), se ha producido un aumento generalizado de la temperatura a nivel global en las últimas décadas. Este incremento se ha registrado en diversas regiones del mundo, principalmente en las zonas septentrionales y sobre todo en la región Ártica. Importante es el valor del aumento, pero aún más es su ritmo de crecimiento en los últimos años. (pág. 82)

Otro aspecto que preocupa a la población mundial es la combinación de la temperatura con la precipitación, ya que pueden tener impactos significativos tanto en el estilo de vida de las personas como en la adaptación y crecimiento de las especies de flora y fauna. Bradley y otros (2004), mencionan que, "en aquellas zonas donde las temperaturas aumentan y las precipitaciones disminuyen, las respuestas del ecosistema pueden ser complejas. Los cambios influyen directamente en la planificación de reservas de biosfera que están diseñados para la conservación de especies". (pág. 3)

Es así como algunos de estos cambios o variaciones en la temperatura pueden afectar directamente en las poblaciones de insectos, favoreciendo algunas condiciones para que se conviertan en plaga. Morales y otros (2018), describen que, el aumento de las temperaturas asociado al cambio climático y la humedad del ambiente, pueden tener efectos en los bosques

de pino e influir en el desarrollo de plagas como los descortezadores, así como limitarlo en ocasiones. (pág. 3)

7.3.2. Precipitación

La precipitación constituye la variable de entrada primaria para la mayoría de los sistemas hidrológicos, Musy (2001) menciona que la precipitación es "toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida, sólida y las precipitaciones ocultas". Citado por (Ordoñez, 2011, pág. 9)

La precipitación es uno de los principales ingresos de agua al balance hídrico de una región o sistema natural. La variabilidad en la precipitación puede ocasionar inundaciones o sequías severas que pueden afectar a la población, sus actividades económicas, el acceso al agua potable y las coberturas del suelo, así como el desarrollo de plagas. (Ferrelli & Solange, 2015)

La precipitación es un factor clave que dispara el crecimiento de la vegetación. Cuando ocurre lluvia, al agua penetra en el suelo, reponiendo la humedad y requiere un recurso esencial para el desarrollo de las plantas, ya que, según estudios desarrollados, existe una correlación directa entre la precipitación y el índice de vegetación. (De la Casa, & Ovando, 2006, pág. 77)

7.4. Factores Biofísicos

Los factores biofísicos, según Zambrana (2008), son "el conjunto de condiciones biológicas compuestas por diferentes elementos: suelo, agua, vegetación, flora, fauna, subsuelos y clima; complejo por las interrelaciones e interacciones que dichos elementos mantienen en el dinámico equilibrio de la naturaleza". (pág. 5)

7.4.1. Sanidad de la vegetación

Para Lamprecht, (1990), la vegetación es "el resultado de la acción de los factores ambientales sobre el conjunto interactuante de especies que habitan en un espacio continuo y es reflejo del clima, la naturaleza del suelo, disponibilidad de agua y de los nutrientes, así, como, los factores antropogénicos y bióticos". Citado por (González & Narváez, 2005, pág. 10)

La vegetación desempaña un papel esencial en la protección del suelo al reducir la erosión, regular el flujo de agua y retener nutrientes. Estos servicios ecosistémicos son vitales para mantener la salud de los ecosistemas, la productividad agrícola y la calidad del agua. Según Novo (2001), el término de salud vegetal surge como necesidad de agrupar un conjunto de conocimientos relacionados con entidades biológicas o no, que causan daño a las plantas

cultivadas por el hombre con una finalidad alimentaria, industrial, medicinal u otras. (pág. 37)

El cambio climático tiene un impacto significativo en la vegetación, amenazando la sanidad de las plantas ya que modifica las condiciones en que se desarrollan, favoreciendo de esta manera la aparición o ataque de plagas que amenazan con reducir la cantidad y calidad de la vegetación y los rendimientos que pueden producir. La FAO (2020a) afirma que, el cambio climático y las actividades humanas han alterado los ecosistemas, reduciendo así la biodiversidad y creando nuevos nichos donde las plagas pueden proliferar. (pág. 2)

Los brotes de plagas pueden contribuir directa o indirectamente a pérdidas económicas y medioambientales. Para Ruíz y Flores (2007), las plagas y enfermedades pueden tener efectos negativos sobre el crecimiento y la supervivencia de los árboles, el rendimiento y la calidad de la madera y de los productos no madereros, el hábitat de la fauna silvestre y los valores recreativos, estéticos y culturales. (pág. 14)

La mejor manera de atacar las plagas forestales es el manejo integrado de plagas que puede establecerse a través de una combinación de medidas de prevención, observación y supresión que pueden ser eficientes tanto ecológica como económicamente y aceptables socialmente, para mantener las poblaciones de plagas a un nivel adecuado. (FAO, 2012, pág. 20)

7.4.2. Humedad

No importa el tipo de cultivo o vegetación, la humedad del suelo y la humedad ambiental son factores que pueden condicionar el momento de la siembra como el desarrollo y la sanidad de la planta. Algunos de los sistemas de agricultura dependen directamente de la lluvia, todos los procesos de siembra, crecimiento, desarrollo, sanidad y hasta cosecha de las plantas tienen como uno de los principales factores limitativos a la disponibilidad de humedad en el suelo, donde la fuente de abastecimiento de agua es la lluvia.

La temperatura juega un papel importante en la pérdida de humedad en el suelo ya que las altas temperaturas aceleran los procesos de evaporación y transpiración, lo que puede resultar en una rápida pérdida de humedad en el suelo, generando así complicaciones como ser las plagas para los cultivos o vegetación de estos sitios.

La modificación de las temperaturas y la humedad puede favorecer el crecimiento de hongos e insectos, alterando la interacción del triángulo de la enfermedad (hospedero - patógeno – ambiente) y por tanto reducciones en la producción de estos. (Grageda, et al., 2014)

7.4.3. Perturbación

Perturbación es el daño ocasionado por cualquier factor (biótico o abiótico) que afecta de manera adversa el vigor y la productividad del bosque y que no es resultado directo de las actividades humanas. (FAO, 2020 b, pág. 20)

Existen diferentes fuentes de perturbaciones y pueden variar según la legislación o la región forestal. En Honduras, es posible considerar como algunas fuentes de perturbaciones a la tala selectiva, extracción de leña, productos forestales no maderables y daños por incendios y plagas forestales.

Sin embargo, la FAO (2020c), considera que las perturbaciones pueden ser naturales (por ejemplo: incendios, tormentas, sequías, plagas y enfermedades) o causadas por el hombre (por ejemplo: la tala insostenible, especies exóticas invasoras no autóctonas, construcción de carreteras, minería, cultivos itinerantes, caza y pastoreo), o por una combinación de perturbaciones naturales y provocadas por el hombre. (pág.1)

7.5. Factores Geográficos

Los factores geográficos están conformados por el relieve del terreno o morfología de este que determina sus características (Fondo Social Europeo, 2011, pág. 2). Estas características también condicionan el tipo y desarrollo de la vegetación existente en estas áreas, así como la dinámica de estos ecosistemas y su susceptibilidad a las plagas.

7.5.1. Altitud

La elevación es considerada como la distancia vertical de un nivel, punto u objeto considerado como un punto medido desde el nivel medio del mar (World Meteorological Organization, 2015, pág. 9).

León (2019), describe que, en plantas de origen natural o trasplantadas al sitio, la altitud es uno de los factores que influye en el crecimiento, sobrevivencia de las plantas. Independiente de la altitud de origen donde se colecten las plántulas, la tasa de crecimiento disminuye a medida que la elevación aumenta (pág. 28). Las bajas temperaturas asociadas con la altitud a menudo han representado un obstáculo para esas las plagas y enfermedades y las temperaturas más cálidas incrementarán las enfermedades que afectan a las plantas. (Garrett, et al., s.f.)

7.5.2. Pendiente

La pendiente, en sentido estricto, es la inclinación de un terreno respecto a un plano horizontal. Se relaciona con la morfología y dinámica de todas las formas del relieve;

prácticamente todas ellas tienen un umbral límite que las clasifica o jerarquiza de acuerdo con su geometría; es decir, la pendiente constituye un factor que favorece la delimitación de los procesos y los tipos de formas que se encuentran en el terreno. (Orozco, 2010, pág. 26)

La pendiente del suelo es un factor crucial que influye en la calidad y desarrollo de la vegetación, así como en la capacidad de drenaje del suelo. La pendiente determina la velocidad a la que el agua se mueve a través del suelo y la accesibilidad que puede representar para las plantas.

En las zonas de fuertes pendientes, generalmente ocupadas por plantaciones forestales, el control de la erosión del suelo es esencial. En las zonas de pendientes elevadas, las actividades de manejo de la plantación pueden causar mayor erosión, específicamente cuando se utiliza maquinaria pesada para realizar las tareas. (Edeso, et al.,1998, pág. 106)

7.6. Susceptibilidad de bosques

La susceptibilidad es la probabilidad de ocurrencia de un evento, su intensidad, magnitud y localización. Son condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de amenazas. (Jaramillo, 2019, pág. 41). Es así como la susceptibilidad del bosque está determinada por la probabilidad de ser atacado por una amenaza como lo es la plaga del gorgojo y que está influenciada por factores climáticos, biofísicos y geográficos.

7.6.1. Factor de riesgo

El riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsidencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiente) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad. (ONU/EIRD, 2009, pág. 29)

Convencionalmente el riesgo es interpretado como el resultado de las amenazas más la vulnerabilidad, es decir, Riesgo= amenazas * vulnerabilidad.

Un factor de riesgo es cualquier característica o circunstancia detectable de un ecosistema que se asocia con un aumento en la probabilidad de padecer, desarrollar o estar expuesto a un proceso mórbido. Estos factores de riesgo (biológicos, ambientales, de comportamiento, socioculturales, económicos, etc.) en asocio unos con otros, pueden aumentar el efecto aislado de cada uno de ellos produciendo un fenómeno de interacción. (Fernández, et al., 2002, pág. 1)

La determinación de factores de riesgos como los incendios forestales, la degradación de los bosques y las plagas forestales ayudaran a la evaluación y determinación de los indicadores de riesgos y evaluar o monitorear para alcanzar un panorama real sobre estas problemáticas que afectan la cobertura vegetal.

7.7. Región

La región es una unidad de división administrativa de un territorio. Los territorios que la componen poseen diferencias en varios aspectos: físico, ambiental, ecológico, económico, demográfico, entre otros (Cuervo & Morales, 2009, pág. 366). Esta división administrativa se desarrolla por cada país, considerando los intereses o actividades a desarrollar en el territorio.

7.7.1. Regiones forestales

El Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF), es el ente designado para el manejo y monitoreo del recurso forestal en el país. Según el Gobierno de la República de Honduras en el Reglamento General de la Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (2010), para cumplir con su mandato de presencia a nivel nacional y con los postulados de desconcentración geográfica, el ICF debe crear Oficinas Regionales y Locales. (pág. 16)

Es así como cada Región Forestal del ICF cuenta con una oficina regional que es la encargada de la administración del recurso forestal y áreas protegidas localizadas en el territorio correspondiente a esta. Considerando la extensión territorial, algunas oficinas regionales cuentan con oficinas locales como unidades mínimas de administración.

La división administrativa de cada Región Forestal está compuesta por uno o varios departamentos del país y las oficinas locales por municipios. A nivel nacional existen doce regiones forestales y están distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 1. Regiones Forestales de ICF

Región Forestal	**Departamentos**
Atlántida	Atlántida, Colón e Islas de la bahía
Comayagua	Comayagua, La Paz e Intibucá
El Paraíso	El Paraíso
Francisco Morazán	Francisco Morazán
Occidente	Copán, Lempira y Ocotepeque
Olancho	Olancho
Pacífico	Choluteca y Valle
Yoro	Yoro
Nor-este de Olancho	Olancho

Nor-occidente	Santa Bárbara y Cortés
La Mosquitia	Gracias a Dios
Biósfera del Río Plátano	Gracias a Dios y Olancho

7.8. Análisis de la situación actual

7.8.1. Cambio Climático en Honduras

Los eventos climáticos extremos (lluvias torrenciales, sequías persistentes, ciclones, etc) que han causado gran número de daños alrededor del mundo, han sido estudiados también a partir de consideraciones económicas, dadas las pérdidas y daños generados en todas las esferas sociales. (Flores & González, 2014, pág. 37).

Entre los factores ambientales relevantes en el ámbito nacional e internacional se encuentra:

La Organización Meteorológica Mundial (2017) afirma que:

- "El 2016 fue el año más cálido del que se tenga constancia: hubo un aumento sorprendente de 1,1°C por encima de los niveles preindustriales y de 0,06 °C con respecto al récord anterior de 2015" (pág. 3)
- El dióxido de carbono (CO2) alcanzó nuevos niveles máximos de 400,0 ± 0,1 ppm en la atmósfera a fines de 2015 (pág. 3)
  La extensión de los hielos marinos descendió nuevamente hasta llegar a niveles bajos sin precedentes para la época del año en mayo y junio, aunque, debido a un deshielo estival relativamente lento, el nivel mínimo estacional llegó a 4,14 millones de km^2, muy por encima del bajo nivel récord de 2012. En 2016 el nivel mínimo anual fue igual al segundo más bajo jamás registrado en 2007. La congelación de otoño de 2016 fue excepcionalmente lenta. (pág. 10)
- La FAO (2016) describe que: "En el período 2000-2010, se registró una pérdida neta de bosques de 7 millones de hectáreas anuales en los países tropicales y un aumento neto de los terrenos agrícolas de 6 millones de hectáreas al año" (pág. 8).
- La deforestación bruta promedio anual de Honduras durante el periodo 2000-2016 es de 23,303 ha, lo que equivale a una pérdida total del periodo de 372,856 ha. Las emisiones de CO^2 asociadas a la deforestación bruta promedio anual ascienden a 6,552,746 toneladas de CO^2 equivalente. (Instituto Nacional de Conservación, Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre, 2017)

El futuro no da escenarios que sean muy optimistas ante los cambios en la variabilidad climática, ya que, según Argeñal (2010), la precipitación entre los meses de junio a agosto puede ser menor hasta en un 25% en la mayor parte del territorio nacional y del centro de Olancho hacia la Mosquitia. Para este período el mayor cambio que según los escenarios se

podría presentar es durante los meses de julio y agosto ya que la disminución en las lluvias podría ser desde un 14% y en la Mosquitia hasta un 38%. (pág. 29).

7.8.2. Incidencia de Plagas Forestal en Honduras

La plaga del gorgojo descortezador de pino ocurrido en Honduras durante el período 2013-2016 es el más devastador en los últimos 50 años. Esta plaga se dio debido a la sinergia de diversos y complejos factores, incluyendo entre otros, el impacto del clima, abundantes áreas de bosque de pino susceptibles debido a inadecuado manejo del bosque, cambios en la legislación forestal, carencia de recursos financieros y técnicos experimentados que incidieron fuertemente para enfrentar la emergencia con retraso. (Instituto Nacional De Conservación, Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre, 2017b, pág. 30.)

Según ICF (2017), se realizaron controles de ataque de plagas a finales de marzo hasta finales de junio del 2017, estos se realizaron por diferentes agentes casuales: *Dendroctonus frontalis, Dendroctonus valens, Dendroctonus approximatus e Ips sp*. En comparación a los años 2015 y 2016, se han encontrado brotes muy pequeños y con un avance de propagación lento. Estos ataques han tenido la incidencia de forma combinada entre *Dendroctonus valens* con *Dendroctonus approximatus, Dendroctonus valens con Ips sp, Dendroctonus approximatus, D. valens e Ips sp,* algunos ataques de *D. frontalis con Ips* y ataques de forma individual de *Dendroctonus forntalis e Ips*. (pág. 9.)

Tabla 2. Resumen de control de plaga realizado por ICF en el 2017

Resumen Control de Plaga por Departamento		
Departamento	**Número Brotes**	**Área Plagada (ha)**
Comayagua	3	73.07
Copán	19	4.42
Francisco Morazán	32	51.88
Intibucá	22	12.06
La Paz	19	32.89
Lempira	13	2.67
Ocotepeque	12	6.94
Total	**120**	**183.93**

Fuente. Instituto Nacional de Conservación, Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre, 2017.

7.8.3. Caracterización de especies de plagas

Existen dos grupos de gorgojos importantes con capacidad de arrasar con grandes cantidades de pinares en Honduras. Los dos grupos son muy distintos el uno del otro y se pueden

distinguir fácilmente con una lupa. Estas especies en el género *Dendroctonus* e *Ips* pertenecen a la misma subfamilia de gorgojos (Scolytinae), el gorgojo de corteza. La subfamilia Scolytinae contiene más de 1,200 especies en América del Norte y Central (todas con distintas apariencias y biología). (Thunes, Midtgaard, Kirkendall, Leverón & Espino, s.f, pág. 3)

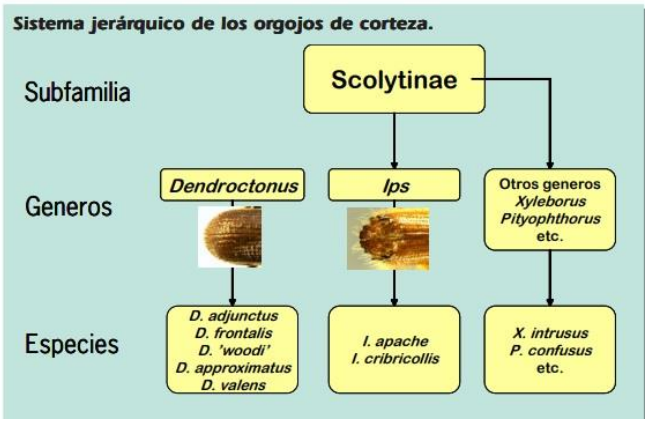


Ilustración 3. Sistema jerárquico de los gorgojos de corteza

7.8.3.1. Biología del *Dendroctonus frontalis*

El Servicio Forestal de Texas (2005), definen el *D. frontalis* como: un escarabajo pequeño, cuyo adulto mide apenas 4 mm de largo, siempre son de forma cilíndrica, con la parte posterior convexa (llamada declive) sin pinchos, tubérculos o estriaciones obviamente visibles. Puede completar hasta 10 generaciones al año en Centroamérica, los adultos no maduros recientemente emergidos de todos los gorgojos de corteza pueden ser de un color amarillo claro. Para cumplir cada generación, el escarabajo pasa por cuarto estados de vida (huevecillo, larva, pupa y adulto).

Al emerger, los adultos nuevos vuelan en la búsqueda de nuevos hospederos durante todos los días del año, siempre y cuando las temperaturas excedan los 15 °C. La distancia que vuelan estos insectos varía con la estación del año y la presencia de atrayentes en la vecindad. Si no hay atrayentes presentes, los adultos son capaces de volar hasta 2 km (o más con la ayuda del viento) durante ciertas estaciones del año, con el fin de iniciar brotes nuevos. (Thunes, Midtgaard, Kirkendall, Leverón & Espino, s.f., pág. 10.)

La ecología de los escarabajos descortezadores es compleja y dinámica y en los últimos años se han buscado alternativas de prevención y manejo. Algunos estudios se han enfocado en determinar la influencia de los parámetros climatológicos sobre el incremento de sus poblaciones con el fin de generar sistemas de previsión de situaciones epidémicas, ya que se

ha documentado que las poblaciones de estos descortezadores se regulan, en parte, por las condiciones ambientales. (López, Torres, Reséndiz, Sánchez & Girón, 2017, pag. 2)

7.8.3.2. Método de ataque

Cada parte del árbol puede ser atacada desde la base de grandes árboles hasta las ramas más finas. Sin embargo, en la mayoría de los casos los ataques comienzan alrededor del centro del tronco en árboles de mediano tamaño y continúan ascendentes. Los grumos de resina se forman con el tamaño y la apariencia de maíz tostado en la superficie de la corteza. El color de estos indica si el ataque fue exitoso o no. El árbol comienza a tornarse de color amarillo y muere en aproximadamente una o dos semanas, luego de que los individuos han realizado el ataque. Los ataques por lo general inician en la parte más alta del árbol. (Thunes, Midtgaard, Kirkendall, Leverón & Espino, s.f., pág. 10.)

7.8.3.3. Métodos de control

- Método físico mecánico:

La Comisión Nacional Forestal, (2015, pág.7), describe tres tipos de métodos de control físico mecánico, los cuales son:

- ✓ Derribo, troceo y descortezado: En este método se hace lo siguiente: derribo, seccionado o troceo del fuste, descortezado total de trozas, tocón y de ramas, control de residuos con la quema o entierro de toda la corteza y ramas infestadas.
- ✓ Derribo y extracción inmediata del arbolado: El fuste infestado debe ser extraído de los terrenos forestales y ser llevado fuera, a otro tipo de vegetación.
- ✓ Derribo y abandono: Consiste en derribo y abandono del arbolado. El cual consiste en realizar el corte de árboles infestados y dejarlos en el sitio.

- Método químico:

Según el Servicio Forestal de Texas, (Texas Forest Service, 1996, pág. 6), el método químico implica lo siguiente:

- ✓ Identificar y marcar todos los árboles plagados en fase 1 y 2.
- ✓ Los árboles que contengan crías en estado avanzado (larvas maduras, pupas y nuevos adultos) deben ser tratados en primer lugar.
- ✓ Los árboles infestados deben ser cortados, desramados y reducidos a tamaños manejables.

- ✓ Deben utilizarse aspersores de baja presión: hidráulicos para lugares grandes y accesibles, de jardín o de mochila para brotes pequeños e inaccesibles.
- ✓ La superficie de la corteza debe ser rociada a fondo hasta el punto de goteo. Para conseguirlo, el aspersor debe ajustarse de manera que el chorro tenga el mismo tamaño que el diámetro de los árboles tratados cuando se mantiene a 30 cm de la superficie de la corteza.
- ✓ Los árboles no deben ser rociados cuando la corteza esté húmeda.

7.9. Análisis de las Metodologías

7.9.1. Los SIG aplicados en el sector ambiental

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten coordinar y gestionar grandes volúmenes de datos espaciales y no espaciales relacionados con el uso y el cambio del suelo, las variables climáticas y otros factores diversos de los fenómenos naturales extremos. También han surgido como una herramienta analítica esencial para una gran variedad de actividades humanas, como la agricultura, la antropología, la biología, la economía, la geología, la planificación y el transporte (Kuby, Tierney, Roberts, & Upchurch, 2005, pág. 2).

Cualquier variable que pueda encontrarse espacialmente, y de forma progresiva o transitoria, puede referenciarse empleando un SIG. Los responsables de la toma de decisiones han adaptado los SIG para evaluar los impactos ambientales y modelar la distribución geográfica, lo que ha dado lugar a sistemas de gestión de la información que son competentes.

La unificación de los datos adquiridos o recolectados en diferente tiempo y en diferentes áreas que proporciona el SIG histórico, ha cambiado la forma de trabajar con los datos existentes, revelando relaciones que son indistinguibles cuando los recursos textuales o gráficos se analizan de forma independiente (Audisio, Nigrelli & Lollino 2009, Alhasanat, et al. 2012) citado en (Ogle, 2012, pág. 2).

Según Chuvieco (2008) las ventajas que se pueden destacar sobre la teledetección desde satélite son: Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre, perspectiva panorámica, observación multiescala y no destructiva, información sobre regiones no visibles del espectro, cobertura repetitiva y transmisión inmediata.

Asimismo, el sensoramiento remoto es el proceso de grabar información por medio de sensores ubicados en un avión o en satélites. La técnica es aplicable al manejo de riesgos naturales ya que casi todos los fenómenos geológicos, hidrológicos y atmosféricos son eventos o procesos recurrentes que dejan huellas de los episodios anteriores. Al revelar la ubicación de previos eventos y/o distinguir las condiciones en las que hay posibilidad de que

éstos ocurran, el sensoramiento remoto permite identificar áreas que puedan ser expuestas a eventos naturales, de manera que se pueden incluir dentro del proceso de planificación las medidas necesarias para reducir el impacto social y económico de los desastres. (Organización de los Estados Americanos, 1991)

7.9.2. Los SIG aplicados a los análisis del riesgo

El análisis de riesgo es un proceso complejo cuyo objetivo es evaluar los diferentes aspectos que pueden perturbar o destruir un sistema, proporcionando medios para comprender las causas y consecuencias de esos riesgos. Los enfoques de evaluación de riesgos requieren tener en cuenta todos los aspectos sociales, económicos, culturales y políticos pertinentes, con el fin de definir la vulnerabilidad, la resiliencia y la capacidad de respuesta de un sistema territorial a diferentes amenazas. Los procedimientos para seguir en el análisis de riesgo mediante los SIG son: planificación, mitigación, preparación, respuesta y recuperación (Peggion, Bernardini, & Masera, 2008, pág. 21).

7.9.3. Aplicabilidad de los SIG en la evaluación de los Recursos Naturales

El monitoreo de los ecosistemas forestales a través de los SIG es un componente crítico de muchas agencias gubernamentales de gestión territorial. Los principales factores que contribuyen al estrés hídrico a largo plazo durante la época de verano, como el calentamiento global y los problemas del cambio climático, provocan un aumento de la sequía en las zonas forestales y comprometen la salud y el equilibrio ecológico de los bosques. Cinco aspectos principales (topográficos, meteorológicos, antropológicos, de vegetación e hidrológicos) condicionan los desafíos en las zonas forestales (Ghorbanzadeh, et al., 2019).

El aumento de las temperaturas previsto en el escenario actual de cambio climático considera que las plagas también pueden verse reforzadas; esto sumado a los estresores abióticos daría lugar a especies de plagas con efectos adversos más fuertes en los árboles debilitados (Bentz et al., 2010; Haavik et al., 2015; Kolb et al., 2016) citados en (Aguilera, Mungua, López, Martínez & Ceccarelli, 2019, pág. 10). Estos efectos también alterarían la frecuencia, duración y/o severidad de la sequía y el estrés térmico asociados al cambio climático, modificando fundamentalmente la composición, estructura y biogeografía de los bosques en muchas regiones (Allen, et al., 2010, pág. 670).

7.9.4. Sensores Remotos y disponibilidad de Datos espaciales

El programa de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea Copernicus ha desarrollado el satélite de la misión Sentinel *2* (S-2), cuyo objetivo principal es la observación y el monitoreo de los ecosistemas de la Tierra, principalmente orientado a la producción de imágenes de teledetección de calidad. Los satélites, aerotransportan diversos tipos de

sensores. Al procesar la información recolectada por sensores, uno de los productos son imágenes satelitales, estas imágenes tienes una resolución temporal o periodo de revisita para captar información sobre la zona de estudio de 5 días, sirviendo de entrada para el cálculo de índices radiométricos y biofísicos (ESA, s.f.).

Además, el satélite Landsat ofrece información de cuánta radiación solar es reflejada por la Tierra y captada por sus sensores. Esta información es vital para estudiar la superficie terrestre, especialmente con las bandas infrarrojas del satélite. Estas bandas nos permiten detectar y analizar cambios en áreas como bosques, cuerpos de agua y zonas urbanas. En resumen, Landsat nos ofrece una vista detallada de cómo cambia nuestro planeta con el tiempo (Vermote et al., 2016; Masek et al., 2013; Roy et al., 2014).

Las bandas infrarrojas a bordo del satélite Landsat Surface Reflectance ayudan en el cálculo de los índices de vegetación, que permiten delimitar la distribución de la cobertura vegetal y del suelo, basándose en los patrones de reflectancia característicos de la vegetación verde. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), construido a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo cercano corto (SWIR). El infrarrojo cercano corto (SWIR) es una sección del espectro electromagnético que se sitúa entre el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio, abarcando longitudes de onda de aproximadamente 1.4 a 3.0 micrómetros. Esta banda es esencial en teledetección debido a sus propiedades únicas: permite detectar la humedad en la vegetación y el suelo, diferenciar minerales por sus patrones de reflexión específicos e identificar áreas quemadas o puntos calientes de incendios. Estas capacidades hacen del SWIR y el NIR como parte de la resolución espectral de un sensor, una herramienta valiosa para el análisis y monitoreo de la superficie terrestre (Gao, 1996; Clark & Roush, 1984; Giglio et al., 2003). El NDMI también puede calcularse como una relación entre el NIR y el SWIR, determinando el contenido de agua de la vegetación (USGS, 2019).

Una forma de obtener datos de alta resolución sobre la temperatura de la superficie terrestre (LST) es a través de las imágenes procesadas del Satélite Terra y Aqua de la NASA. MODIS es un instrumento a bordo de estos satélites y contiene modelos óptimos de regresión lineal múltiple para estimar las temperaturas máximas, mínimas y medias del aire; lo que se utiliza para hacer predicciones precisas de las consecuencias ecológicas en relación con el cambio climático sobre la base de algoritmos e índices matemáticos (Yang, Cai, & Yang, 2017, pág. 5).

En cuanto a la ocurrencia de las precipitaciones, se sabe que implica una variabilidad espacial extrema e intrincada; sin embargo, la estimación de las precipitaciones a través de la teledetección ha logrado un avance significativo en la interacción de la meteorología, la hidrología y la estadística (Kumar, Foufoula-Georgiou, 1994; Emmanuel, Andrieu, Leblois, Flahaut, 2012) citado en (Hu, et al., 2019).

El producto de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) puede recuperar datos para regiones donde las estaciones meteorológicas no son frecuentes, lo que se ha convertido en una fuente alternativa de datos de precipitaciones para aplicaciones operativas. En términos de resolución espacial, CHIRPS proporciona datos a una escala de aproximadamente 0.05 grados (~5 km) en la latitud ecuatorial, lo que permite un análisis detallado a nivel regional. En cuanto a la resolución temporal, CHIRPS ofrece datos diarios, lo que facilita el seguimiento de eventos meteorológicos extremos a lo largo del tiempo. En términos de resolución espectral, este producto utiliza datos infrarrojos de satélite para estimar la precipitación, lo que implica una capacidad para detectar patrones de precipitación en condiciones de baja iluminación solar. Esta combinación de resoluciones espacial, temporal y espectral lo convierte en un recurso valioso para la investigación y la toma de decisiones en el ámbito climático. (Paredes, Alves, Lakshmi, Kumar, & de Oliveira, 2020, pág. 11).

7.9.5. Sistemas de alerta temprana ante plagas

Conjuntos de datos de variables climáticas pueden evaluarse mediante Random Forest (RF), que es una herramienta de aprendizaje inteligente que, a través de un clasificador de conjunto de datos satelitales, puede ejecutar eficazmente datos específicos para evaluar la susceptibilidad de un brote de peste y otras evaluaciones de riesgo (Wang, et al., 2015, pág.1132).

El clasificador incluye dos procesos aleatorios que mejoran el poder predictivo de la clasificación. En la construcción de cada parámetro en lo que respecta a los datos, en cada nodo de clasificación del sistema se selecciona aleatoriamente un subconjunto de posibles variables predictoras, lo que reduce la correlación entre los parámetros y da lugar a una menor tasa de error (Horning, 2010), citado en (Mellor, Haywood, Jones, & Wilkes, 2012, pág. 41). Con este fin, el uso de Random Forest permite identificar los patrones que conducen a los eventos extremos de los brotes de plaga de *D. frontalis* con varios meses de antelación a su ocurrencia, garantizando una gestión adecuada y una intervención a un tiempo adecuado (Park, Kim, & Lee, 2019).

7.9.6. Ventajas y desventajas de los SIG en los análisis de riesgos

La utilización de Sistemas de Información Geográfica en el análisis de riesgos presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Los SIG también permiten ver, cuestionar, comprender, visualizar e interpretar los datos de diversas maneras que revelan relaciones, tendencias y patrones, asimismo, ayuda a responder a las preguntas y a resolver los

problemas mediante la observación de los datos de una manera fácil y rápida de compartir (GISTIC, 2021).

- ✓ Puede multiplicar la productividad de un técnico; y dar resultados de mayor calidad que los que se pueden obtener manualmente, independientemente de los costes que conlleva.
- ✓ Puede facilitar la toma de decisiones y mejorar la coordinación entre los organismos cuando la eficacia es primordial (Organización de los Estados Americanos, 1991).
- ✓ Los usos de los SIG tienen ventajas sobre los mapas convencionales, no obstante, la combinación de estos con el conocimiento local es indispensable (Tran, Shaw, Chantry, & Norton, 2009).

También es necesario considerar las desventajas en la utilización de Sistemas de Información Geográfica en el análisis de riesgos:

- ✓ Las capas SIG podrían conducir a algunos errores al momento del análisis e interpretación de los datos.
- ✓ Podría haber fallas al iniciar un proceso de gestión suplementario para implementar completamente el SIG.
- ✓ Puede existir un error geográfico que se incrementará a medida que se vaya ampliando la escala (GISTIC, 2021).

7.10. Instrumentos utilizados

7.10.1. Google Earth Engine

Está construido sobre una colección de tecnologías habilitadoras que están disponibles dentro del entorno del centro de datos de Google, incluido el sistema de gestión de clúster Borg; The Bigtable y Spanner. Asimismo, se distribuyeron bases de datos como la de Colossus; el sucesor del sistema de archivos de Google y el marco FlumeJava para la ejecución paralela de fuentes de información (GIZ, 2018, Pág. 5).

El Editor de código de GEE y las aplicaciones de terceros usan bibliotecas de clientes para enviar consultas interactivas o por lotes al sistema a través de una “API REST”. Las solicitudes sobre la marcha son manejadas por los servidores “front-end” que envían consultas complejas a Compute Masters, que administran la distribución de cómputos entre un conjunto de Compute Server. El sistema por lotes funciona de manera similar, pero usa “FlumeJava” para administrar la distribución. El software de gestión de “Borg cluster” gestiona cada componente del sistema y cada servicio tiene un equilibrio de carga entre varios trabajadores. (Gorelick et al., 2017).

En resumen, GEE es una interfaz de programación de aplicaciones sin fines de lucro, que facilita al usuario el aprovechamiento del poder de la nube de Google para su propio análisis geoespacial en tiempo récord, mediante los lenguajes de programación en Python y JavaScript y una serie de datos espaciales disponibles de diferentes fuentes y diferente naturaleza para el estudio de la tierra.

CAPITULO III

VIII. METODOLOGÍA

El estudio se realizará siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la Ilustración 2, utilizando como base información secundaria del brote de plaga y las variables climáticas, ecosistémicas, biofísicas y geográficas y la plataforma de Google Earth Engine para hacer el procesamiento de la información, modelación y validación de los mapas de susceptibilidad al ataque de plaga del gorgojo descortezador del pino.

Ilustración 4. Esquema de proceso metodológico

8.1. Materiales y Métodos

8.1.1. Área de Estudio

El área de estudio abarca las zonas del país que están cubiertas por cobertura boscosa de pino para lo que fue necesario utilizar la tipología de bosques. El bosque de coníferas está compuesto principalmente por especies del género *Pinus* y se ubica en regiones que presentan precipitaciones promedio menores a los 2,500 mm por año con una estación seca que por lo general inicia en el mes de febrero y culmina en el mes de mayo. Se pueden ubicar en las montañas de Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua y República Dominicana en alturas a partir de los 350 msnm. La especie dominante es el *Pinus oocarpa*, sin embargo, en algunas regiones del Norte de Nicaragua, Guatemala y Honduras, por debajo de los 600 msnm, se encuentran formaciones naturales de bosque de coníferas dominados por la especie *Pinus caribaea*. En alturas por encima de los 1,000 msnm, la especie *Pinus oocarpa* comparte su dominancia con el *Pinus maximinoii*, mientras que en sitios con alturas mayores se puede encontrar otras especies del género *Pinus* y del género *Abies* (Programa REDD-CCAD-GIZ, s.f)

En Honduras se encuentra la mayor cantidad de área cubierta con bosques de pino y mixto de Centro América. ICF, 2018, estima una superficie total de bosque de conífera de 1,947,559 ha, que equivalen al 31% de las áreas con cobertura forestal en el país. Este tipo de bosque se encuentra principalmente en las cordilleras centrales del país, que se caracterizan por tener suelos pedregosos, pendientes accidentadas y poca profundidad. Comprende los departamentos de Olancho y Yoro y algunas áreas dispersas en el centro y sur del país, en los departamentos de Francisco Morazán, Comayagua, Choluteca y Valle.

En Honduras, se han identificado un total de 7 especies de pino distribuidas en todo el país, desde los 60 msnm hasta altitudes mayores a los 2.500 msnm. Estas especies pueden asociarse entre sí dependiendo del piso altitudinal donde se encuentran: *Pinus ayacahuite, Pinus caribaea, Pinus hartwegii, Pinus maximinoii, Pinus oocarpa, Pinus pseudostrobus, Pinus tecunumanii*. (Centro de Estudios Ambientales y Alianza para la Conservación de bosque de Pino y Encino de Mesoamérica, 2010, Pág. 241)

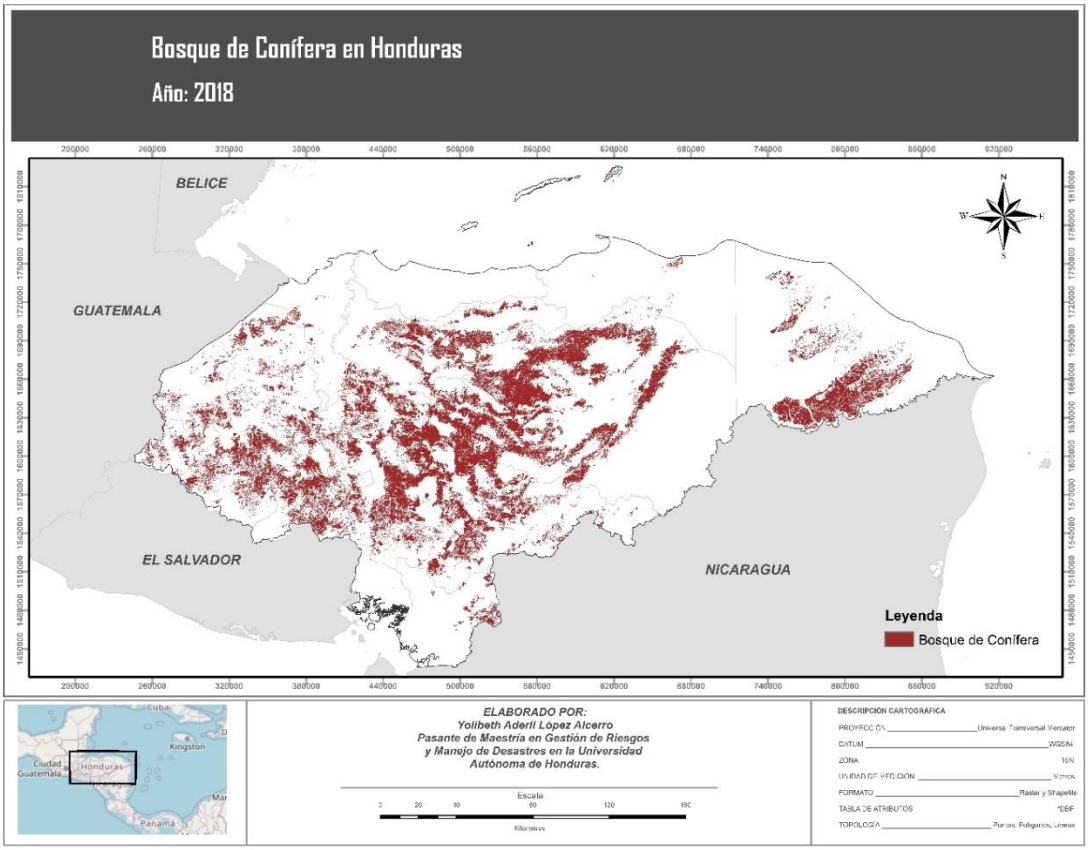


Ilustración 5. Mapa de Bosque de Conífera en Honduras.

Fuente: Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF).

8.1.2. Datos (descripción y fuente)

8.1.2.1. Secundarios

Límite de Honduras

Los límites políticos y administrativos de Honduras fueron tomados del Sistema Nacional de Información Territorial (SINIT), obtenidos desde Geoportal del ICF en formato shapefile.

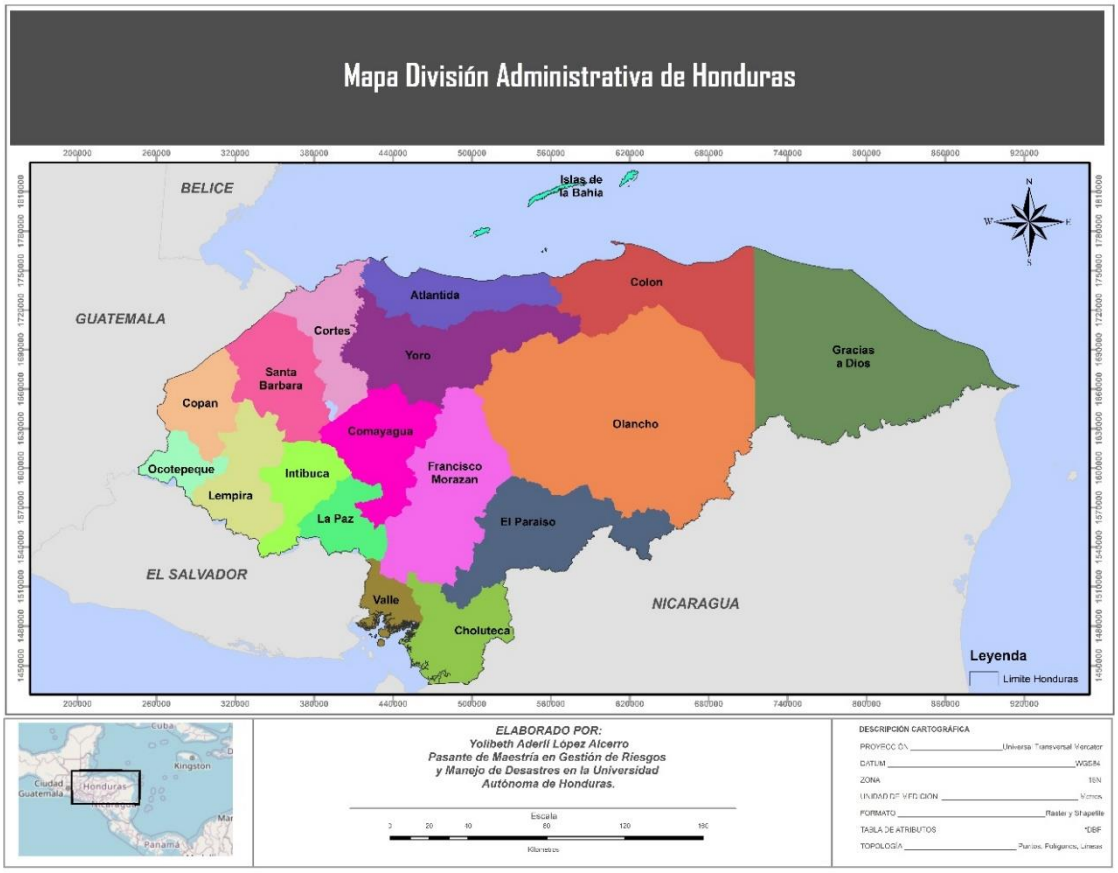


Ilustración 6. Mapa de División Administrativa de Honduras.

Disponible en: Sistema Nacional de Información Territorial (SINIT).

Capa de puntos de plagas

Los puntos de entrenamiento de plagas corresponden a los Planes de Salvamento de plaga realizados por el ICF en el año 2015. Los Planes de Salvamento, son un instrumento de aprovechamiento legal de madera afectada por plagas, incendios u otros. Se utilizaron 564 puntos con presencia de plaga y 458 sin plaga, para un total de puntos utilizados en el análisis de 1,022.

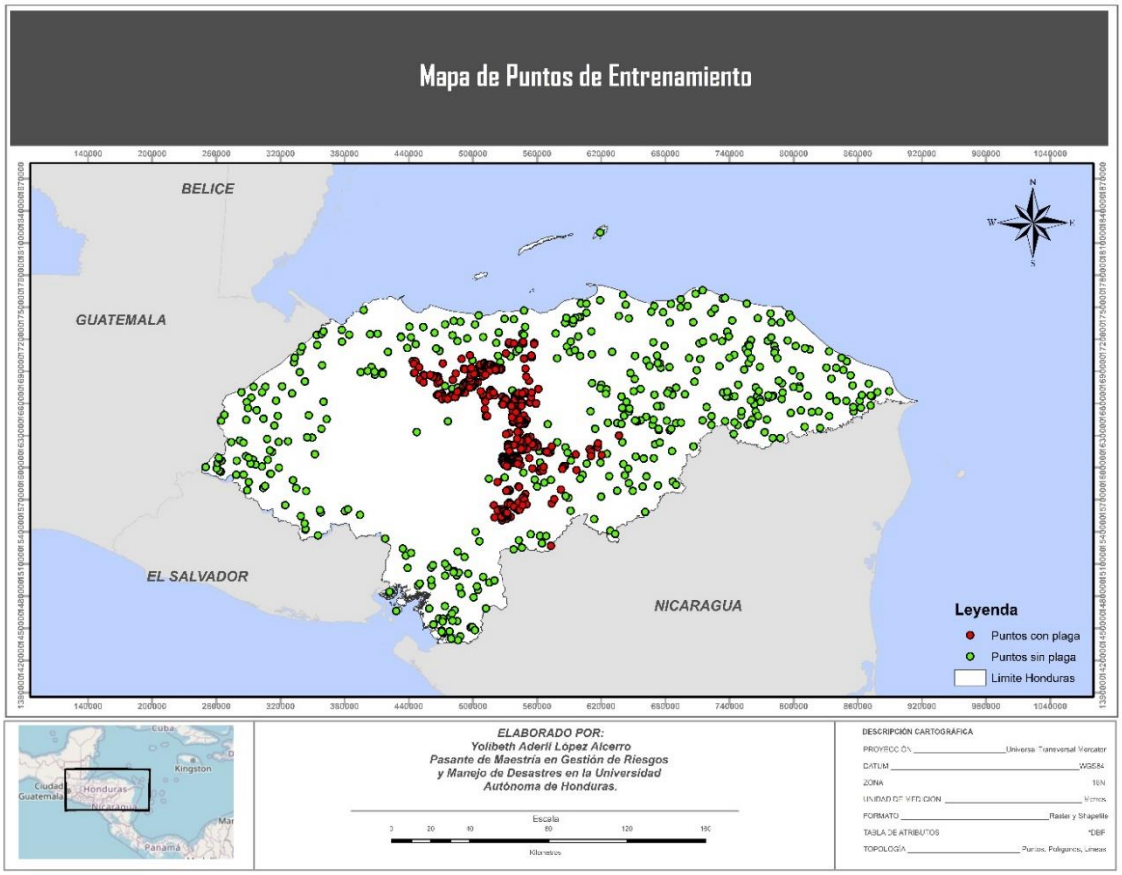


Ilustración 7. Mapa de puntos de entrenamiento

Fuente: Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF).

Tipología de bosque

Una Tipología de Proyecto corresponde a Proyectos Genéricos o Marco asociados a un tipo de recurso específico en el cual, independiente de la propiedad de la tierra, es posible aplicar esquemas silvícolas y de financiamiento común tendiente a compatibilizar objetivos de producción de bienes y servicios tradicionales con la captura de carbono para su comercialización posterior (Costa, et al., 2013). Permite determinar espacialmente las áreas potenciales de bosques a nivel nacional, caracterizarlos y que sean de utilidad durante la planificación de acciones encaminadas en los temas de deforestación y degradación en los bosques de Honduras (ICF & MiAmbiente, 2017)

Para Honduras fue generada por ICF utilizando sensores remotos y fundamentos de teledetección, se encuentra disponible en el Geoportal de ICF y define las siguientes categorías:

- ✓ Bosque Latifoliado Húmedo
- ✓ Bosque Latifoliado Deciduo
- ✓ Bosque de Conífera
- ✓ Bosque de Mangle

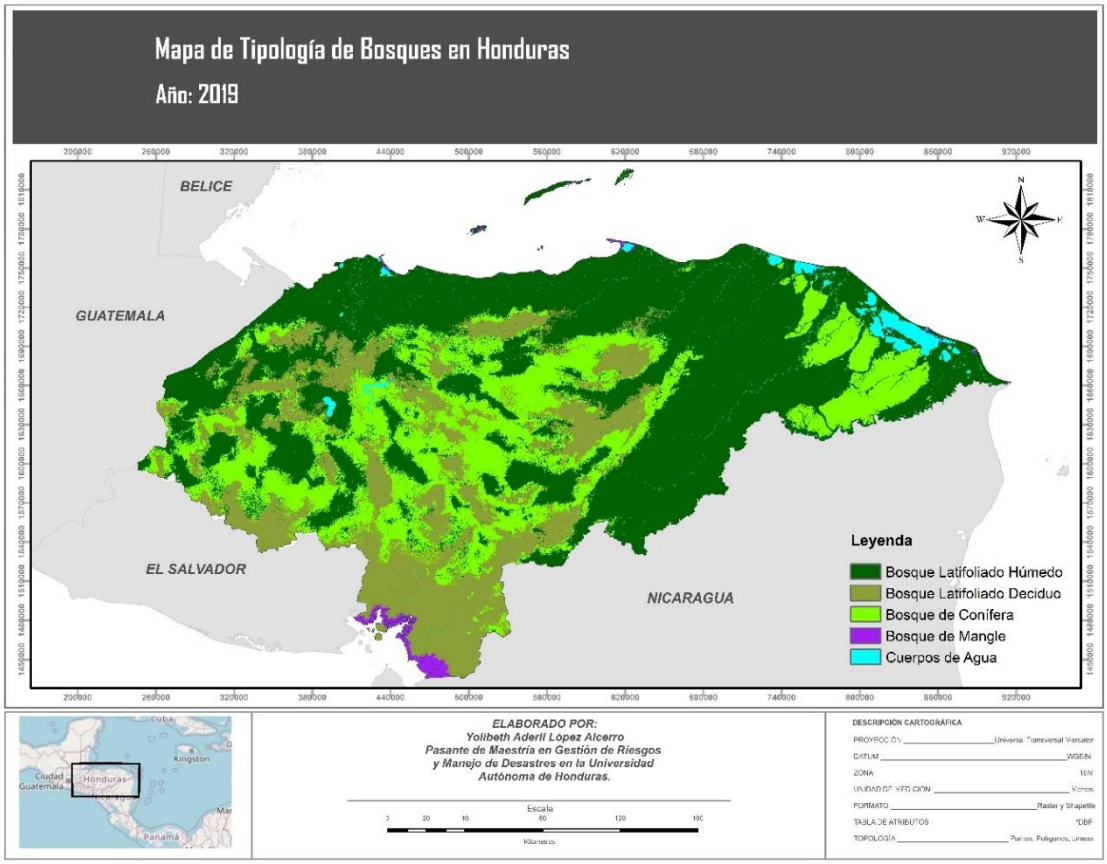


Ilustración 8. Mapa de Tipología de Bosques en Honduras.

Fuente: Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF).

8.1.2.2. Variables

Se utilizaron datos MODIS de reflectancia superficial (MOD09A3) con una resolución de 500 m y resolución temporal de 8 días, el MODIS de temperatura de la superficie terrestre

(LST), (MOD13A2) con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 8 días.

Es importante mencionar que se prefirieron los datos MODIS con una resolución espacial baja (250– 1000 m) a los datos Landsat debido a su amplia variedad de productos y la alta resolución temporal (8 días). Los datos de Landsat tienen una resolución espacial de 30 m pero una resolución temporal de 16 días sin todos los productos que brindan las imágenes MODIS. Además, la diferencia a resaltar es que los productos de MODIS ya se encuentran procesados, ya que igualmente estos productos se pueden derivar de Landsat, pero se deben de calcular.

Para la Temperatura, se utilizará el producto MOD11A1 V6.1 proporciona valores diarios de temperatura de la superficie terrestre (LST) y emisividad en una cuadrícula de 1200 x 1200 kilómetros. El valor de temperatura se deriva del producto de franja MOD11_L2. Por encima de los 30 grados de latitud, algunos píxeles pueden tener múltiples observaciones donde se cumplen los criterios de cielo despejado. Cuando esto ocurre, el valor del píxel es el promedio de todas las observaciones calificadas. Junto con las bandas de temperatura superficial diurna y nocturna y sus capas indicadoras de calidad, se proporcionan las bandas MODIS 31 y 32 y seis capas de observación. (GEE, 2022)

Para la precipitación, se utilizaron datos de la estación (CHIRPS) del Grupo de Riesgos Climáticos que es un conjunto de datos de precipitaciones casi globales de más de 30 años. CHIRPS incorpora imágenes satelitales de resolución de 0,05° con datos de estaciones in situ para crear series de tiempo de lluvia cuadriculadas para análisis de tendencias y monitoreo de sequías estacionales. (GEE, 2022)

Los datos de elevación digitales de la Misión de Topografía de Radar del Transbordador, es un esfuerzo de investigación internacional que obtuvo modelos de elevación digitales a una escala casi global. (GEE, 2022)

A continuación, se detallan:

Tabla 3. Descripción de información secundaria utilizada

Dato	Descripción	Fuente
MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km Temperatura 8d	El producto MOD11A2 V6 proporciona una temperatura de la superficie terrestre (LST) promedio de 8 días en una cuadrícula de 1200 x 1200 kilómetros. Cada valor de píxel en MOD11A2 es un promedio simple de todos los píxeles LST MOD11A1 correspondientes recopilados dentro de ese período de 8 días. Se eligió el período de composición de 8 días porque el doble de ese período es el período exacto de repetición de la trayectoria terrestre de las plataformas Terra y Aqua. En este producto, junto con las bandas de temperatura superficial diurna y nocturna y sus capas indicadoras de calidad (QC), también se encuentran las bandas MODIS 31 y 32 y ocho capas de observación.	Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA
MOD11A1.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km Temperatura 1d	El producto MOD11A1 V6 proporciona valores diarios de temperatura de la superficie terrestre (LST) y emisividad en una cuadrícula de 1200 x 1200 kilómetros. El valor de temperatura se deriva del producto de franja MOD11_L2. Por encima de los 30 grados de latitud, algunos píxeles pueden tener múltiples observaciones donde se cumplen los criterios de cielo despejado. Cuando esto ocurre, el valor del píxel es el promedio de todas las observaciones calificadas. Junto con las bandas de temperatura superficial diurna y nocturna y sus capas indicadoras de calidad, se proporcionan las bandas MODIS 31 y 32 y seis capas de observación.	Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA

MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 500m índice de Vegetación 16d	El producto MOD13A1 V6 proporciona un valor de índice de vegetación (VI) por píxel. Hay dos capas de vegetación primaria. El primero es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se conoce como el índice de continuidad del NDVI derivado del radiómetro avanzado de muy alta resolución (NOAA-AVHRR) existente de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. La segunda capa de vegetación es el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) que minimiza las variaciones de fondo del dosel y mantiene la sensibilidad sobre las condiciones de vegetación densa. El EVI también usa la banda azul para eliminar la contaminación residual de la atmósfera causada por el humo y las nubes de nubes delgadas de subpíxeles. Los productos MODIS NDVI y EVI se calculan a partir de reflectancias superficiales bidireccionales corregidas atmosféricamente que se han enmascarado para agua, nubes, aerosoles pesados y sombras de nubes.	Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA
MODIS Terra Daily NDVI índice de Vegetación 1d	El índice de vegetación de diferencia normalizada se genera a partir de las bandas de infrarrojo cercano y rojo de cada escena como (NIR - rojo) / (NIR + rojo), y su valor oscila entre -1,0 y 1,0. Este producto se genera a partir de los compuestos de reflectancia superficial MODIS/MOD09GA.	Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA

NASA SRTM Digital Elevation 30m Elevación Digital Topográfica	Los datos de elevación digital de la Misión de Topografía de Radar del Transbordador (SRTM, ver Farr et al. 2007) son un esfuerzo de investigación internacional que obtuvo modelos de elevación digital en una escala casi global. Este producto SRTM V3 (SRTM Plus) es proporcionado por NASA JPL a una resolución de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m). Este conjunto de datos se ha sometido a un proceso de relleno de vacíos utilizando datos de fuente abierta (ASTER GDEM2, GMTED2010 y NED), a diferencia de otras versiones que contienen vacíos o se han llenado con fuentes comerciales. Para obtener más información sobre las diferentes versiones, consulte la Guía rápida de SRTM.	JPL: jpl.nasa.gov
MODIS Combined 16-Day BAI MODIS Terra Daily BAI Índice de área quemada (BAI) 16d y 1d	El índice de área de quemado (BAI) se genera a partir de las bandas roja e IR cercano y mide la distancia espectral de cada píxel desde un punto espectral de referencia (la reflectancia medida del carbón). Este índice pretende enfatizar la señal de carbón en las imágenes posteriores al incendio. Este producto se genera a partir de los compuestos de reflectancia superficial MODIS/MCD43A4 y MODIS/MOD09GA.	Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA

Fuente: GEE.

8.1.3. Procesamiento de la información

Para realizar el análisis, se utilizaron filtros de fecha y lugar, la fecha estuvo determinada por el último episodio de plaga en el país y del cuál se pueden obtener datos, 2015-2016 y el lugar está determinado por la ubicación de la cobertura de pino en el país; para lo cual se utilizó una máscara (capa raster) que proporciona la ubicación de esta cobertura de acuerdo con último mapa forestal que se construyó para el país en el año 2018.

Posterior a obtener la información, se construyó una capa multivariable con la información de pino y de plagas. Una capa multivariables consiste en copiar entidades del mismo tipo de dos capas en una única capa y fusionar la información para obtener una sola capa que nos muestre el pino plagado entre 2015 y 2016.

8.1.4. Modelación

El algoritmo de Random forest es un algoritmo que surge como evolución de los árboles de decisión, estos clasifican los datos de un modelo realizando una serie de particiones binarias, permitiendo realizar predicciones futuras en base a esta clasificación. Los Random forest son un caso particular de la técnica de conjuntos de árboles, consiste en promediar los resultados de un conjunto de modelos individuales (árboles de decisión CART) y cada modelo CART se estima partir de un remuestreo de la muestra original y no se consideran un subconjunto de variables elegidos al azar. (León, 2018)

El modelo CART consiste en la construcción de un árbol principal a partir de particiones binarias que se realizan de manera sucesiva en los datos mediante un criterio de particionamiento denominado medida de impureza, este criterio nos permite determinar la calidad de un nodo en la construcción del modelo de árbol de clasificación, y establecerá el grado de homogeneidad existente entre los grupos clasificados respecto a la variable dependiente. (Alarcón, 2017, Pág. 25)

En el entrenamiento de un árbol de regresión simple, las observaciones se van distribuyendo por bifurcaciones (nodos) generando la estructura del árbol hasta alcanzar un nodo terminal. Cuando se quiere predecir una nueva observación, esta recorre el árbol acorde al valor de sus predictores hasta alcanzar uno de los nodos terminales. La predicción del árbol es la media de la variable respuesta de todas las observaciones de entrenamiento que están en este mismo nodo terminal. La predicción de un modelo *Random Forest* es la media de las predicciones de todos los árboles que lo forman. Siguiendo la visión de vecinos cercanos planteada en el apartado anterior, esto equivale a la media ponderada de todas las observaciones, empleando como pesos ww la media de los vectores de pesos de todos los árboles. (Rodrigo, 2020)

8.1.5. Análisis de importancia de variables

El cálculo de la importancia de las variables en modelos basados en Random Forest es una herramienta esencial para interpretar y entender la influencia de cada predictor en la predicción final. En el contexto de Random Forest, la importancia de una variable se determina evaluando cuánto disminuye la precisión del modelo cuando se permutan aleatoriamente los valores de esa variable, manteniendo todas las demás variables constantes.

La importancia de una variable se evalúa mediante la medición de su contribución al proceso de toma de decisiones en cada árbol, y luego se promedia en todos los árboles del bosque. Una de las métricas comúnmente utilizadas para cuantificar la importancia de la variable es la disminución de la precisión cuando se elimina o se permuta la variable en cuestión. Además, existen otras métricas, como la ganancia de Gini y la ganancia de información, que ofrecen perspectivas adicionales sobre la importancia de la variable en la clasificación. (Breiman, 2001)

8.1.5.1. Clasificación del año base y el futuro

La clasificación del año base se refiere a la información de la susceptibilidad de los bosques de pino correspondientes al año 2015. Es construido trasladando la información de las muestras entrenadas e interpolándolas al límite del área de estudio (tipología de bosques de pino).

Para el año futuro, el modelo construye un mosaico multibanda que considera todas las variables de estudio y compara las estadísticas del año futuro con el año base para construir una nueva clasificación con la susceptibilidad para ese año futuro.

Por ejemplo, para el año 2020, el modelo obtendrá estadísticas de precipitación, temperatura, elevación, NDVI, BAI y las comparará con el año base (2015). De encontrarse similitudes en las estadísticas, el modelo construirá el mapa de susceptibilidad de esas zonas geográficas.

8.1.5.2. Enfoque de evaluación

Para entrenar y ajustar el modelo, se seleccionaron aleatoriamente el 70% de las muestras obtenidas del inventario forestal. El 30 % restante se utilizó para probar el rendimiento del modelo. Los valores de píxeles para todas las covariables se extrajeron en cada una de las ubicaciones de muestra y se usaron para preparar una matriz de modelado en la que las filas representan las observaciones y las columnas representan las covariables. Se evaluaron las estructuras de modelos usando validación cruzada. También se estimaron varias métricas

para evaluar el rendimiento del modelo, tales como: el coeficiente de determinación (R2), el error porcentual absoluto medio (MAPE), la desviación absoluta media (MAD), el coeficiente de correlación de concordancia, y la raíz-error cuadrático medio (RMSE).

En el proceso de validación del modelo, se utilizó el error cuadrático medio raíz (RMSE) para evaluar su precisión en términos de predicciones. Según la literatura, cuanto menor sea el RMSE, mejor será el modelo y sus predicciones. Un RMSE más alto indica que hay una gran desviación de la verdad residual a la tierra.

CAPITULO IV

IX. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El Mapa Nacional Forestal que fue elaborado por el ICF en el 2018, es la última actualización que se tiene y la información oficial del país sobre su cobertura boscosa. Según este mapa, Honduras posee 6,301,097 hectáreas de cobertura boscosa que es agrupada en diferentes categorías o tipos de bosques. De toda la cobertura, el Bosque de Conífera tiene un área de 1,947,559 hectáreas.

Se creó un mapa de tipología de bosques basado en ecosistemas que indica el área potencial del país para ser bosque, dividido en 4 categorías según sus características. Según el análisis de tipología, se estimó un área de 2.7 millones de hectáreas que tienen el potencial o características para ser cobertura de pino o conífera. A pesar de que existe un potencial 2.7 millones de hectáreas, el mapa de cobertura de la tierra y uso del suelo registra la existencia de 1.9 millones de hectáreas de bosque de coníferas.

Modelo Probabilístico

El modelo probabilístico se construyó en la plataforma de GEE y está conformado de la siguiente manera:

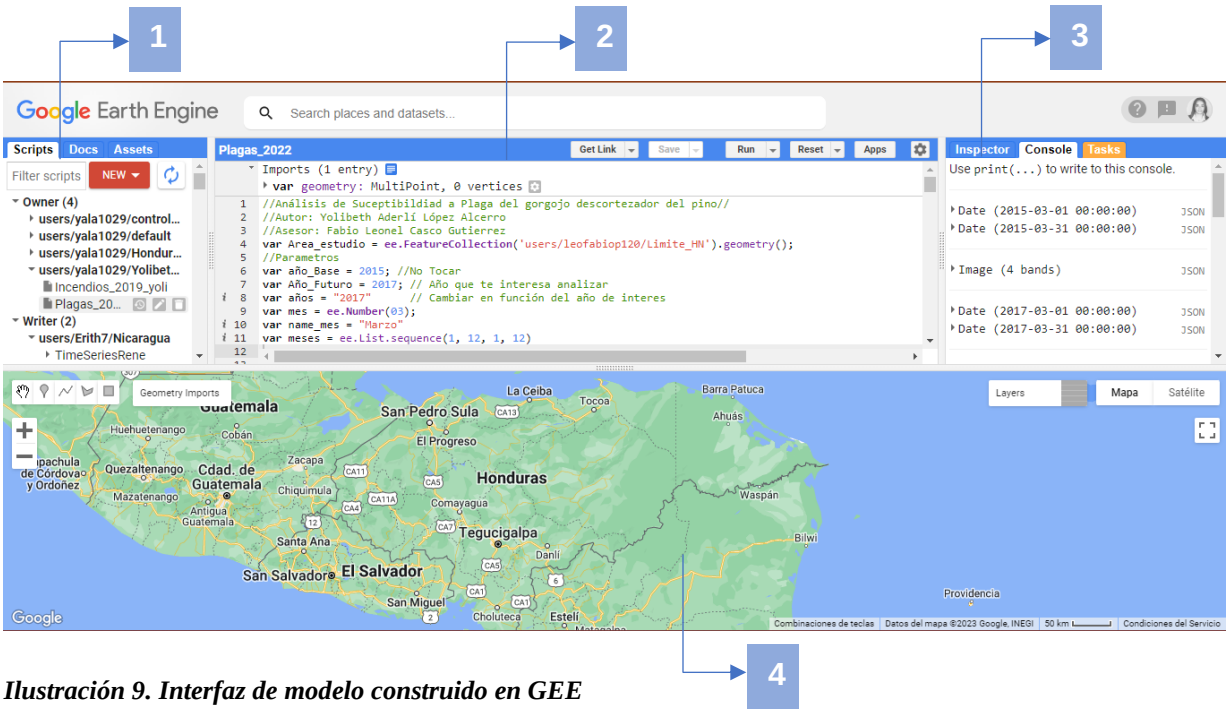


Ilustración 9. Interfaz de modelo construido en GEE

1. **Catálogo**: El catálogo de datos recoge los conjuntos de datos que se pueden ver y analizar en la plataforma Google Earth Engine. Así como los documentos en donde se brinda información sobre productos utilizados en la plataforma. Está compuesta por las pestañas de: Administrador de guiones (Scripts), Documentación (Docs), Activos (Assets).
2. **Editor de código**: GEE tiene un entorno de desarrollo integrado (IDE) llamado Editor de código. El Editor de código tiene varias características para ayudar a hacer más fácil la programación en este entorno que exploraremos en este tutorial.
3. **Inspector**: Brinda información de locación, píxel y otras de cualquier punto en que se haya dado clic sobre el mapa, Consola (Console): Brinda información sobre los datos utilizados en el script, Tareas (Taks): muestra las capas que se han definido en el script para ser descargadas.
4. **Visor de Mapas**: Muestra las capas generadas por el script, en esta sección también es posible ver las capas que está trabajando, las herramientas de geometría y el zoom.

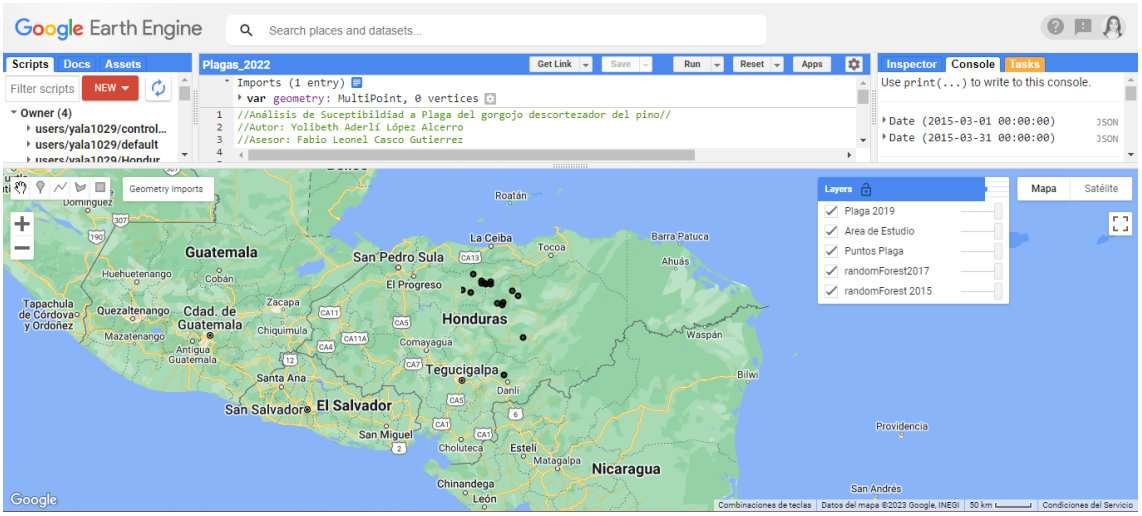


Ilustración 10. Puntos de entrenamiento y capas generadas con el modelo

En la ilustración anterior es posible visualizar algunos de los puntos de entrenamiento utilizados para el modelo que corresponden a los planes de salvamento de ICF.

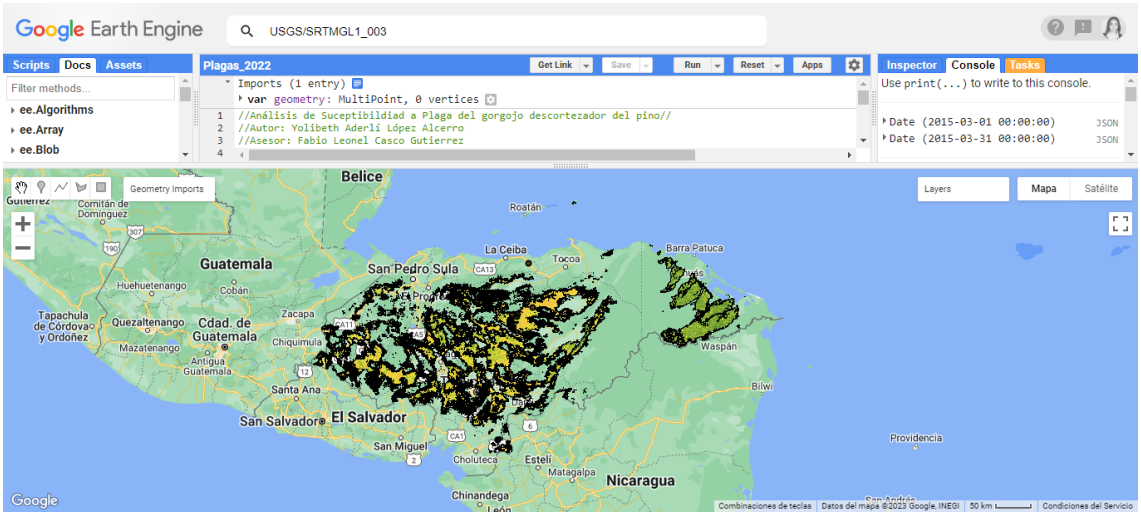


Ilustración 11. Capas de susceptibilidad a plaga del gorgojo descortezador del pino

Una vez escrito el script, se corre el modelo y se genera las diferentes capas, en la ilustración 11 es posible ver la capa de susceptibilidad del pino al ataque del gorgojo descortezador para el año 2017.

Variables predominantes en el modelo

En la validación del modelo, el RMSE resultó ser 0.26741, este valor indica que, en promedio, las predicciones del modelo se desviaron de los valores reales en 0.26741. Considerando que las variables a predecir oscilaban entre 0 y 1, este RMSE es relativamente bajo, lo que sugiere que el modelo ofrece una precisión aceptable.

El siguiente gráfico muestra la importancia de variable del modelo que es generada a través de las métricas establecidas por Random forest, la variable que muestra mayor altura en la barra azul es la que le aporta más al modelo. Como se observa, la pendiente y la precipitación, son las variables que aportaron más al modelo de predicción realizado.

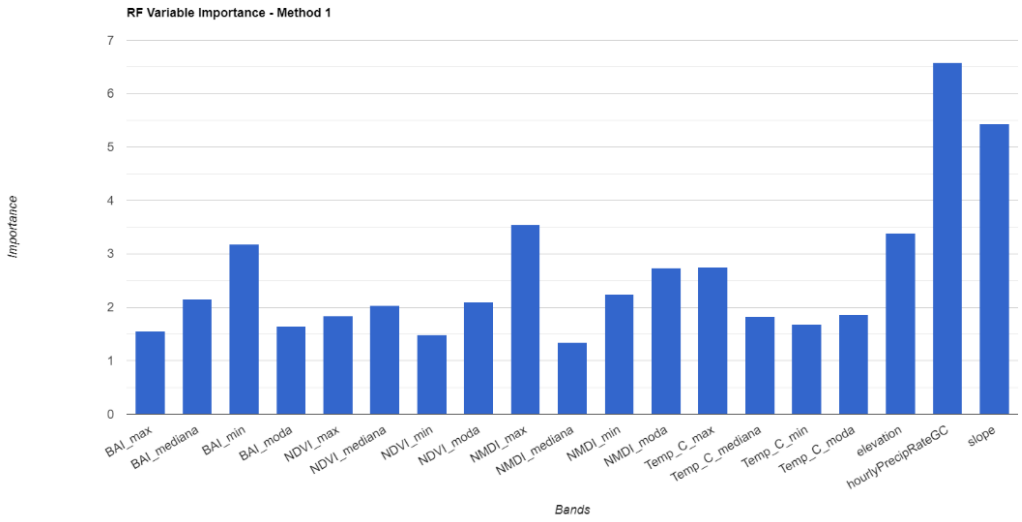


Gráfico 1. Importancia de variable del modelo de predicción de plaga del gorgojo.

Mapas de susceptibilidad de plagas

Un mapa de susceptibilidad a plagas es el análisis estadístico basado en la probabilidad de que se dé un ataque de plaga, son estimados por modelo probabilístico basado en valores entre 0 y 1 que indica susceptibilidad baja y susceptibilidad alta, respectivamente.

Los resultados de la investigación indican las superficies de susceptibilidad de plaga en bosques de pino. A continuación, la discusión de la susceptibilidad baja, media y alta.

El departamento con más superficie de susceptibilidad baja es Gracias a Dios con 492,748 ha. El departamento con menos superficie de susceptibilidad baja es Islas de la Bahía con 77 ha. Los departamentos Yoro, Comayagua, Francisco Morazán y Olancho cuentan con

superficies de susceptibilidad baja entre 102,000 y 301,000 ha. Los departamentos de Colón, Choluteca, Cortés, Ocotepeque, Copán, Intibucá, Santa Bárbara, La Paz, El Paraíso, Lempira presentan superficies de susceptibilidad baja entre 1,500-95,000 ha. Los departamentos de Valle y Atlántida no presentan superficies de susceptibilidad baja ya que, según Mapa Forestal 2018, no se encuentran bosques de pino.

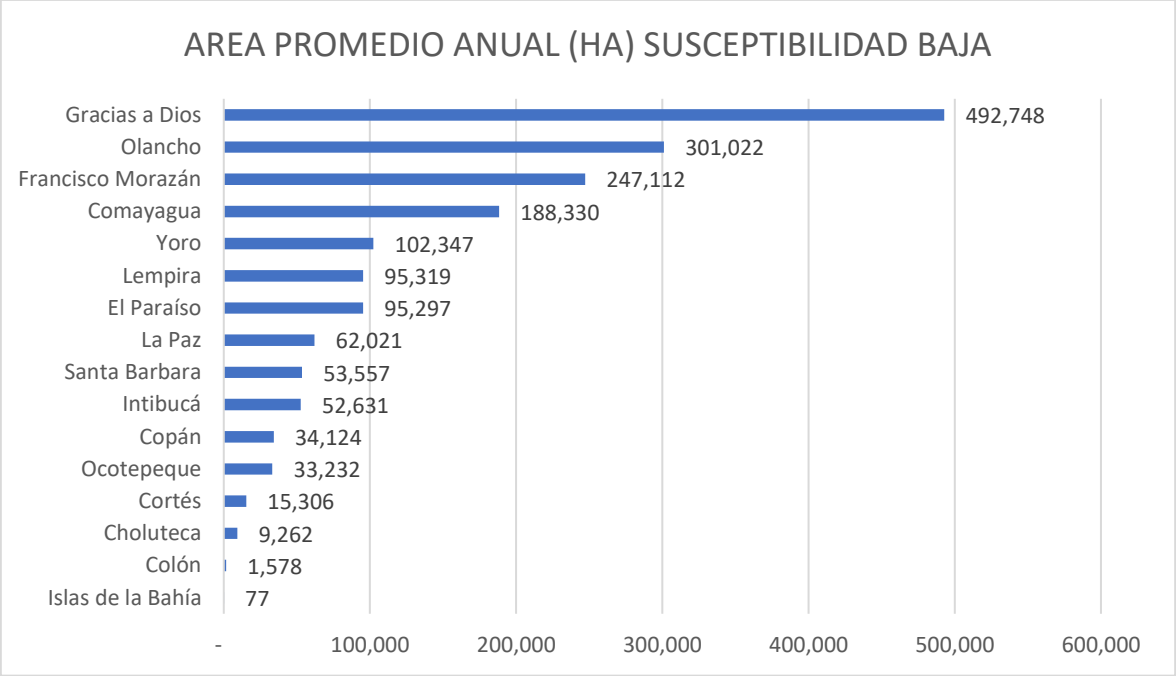


Gráfico 2. Área promedio anual (ha) en susceptibilidad baja.

El departamento con más superficie de susceptibilidad media es Olancho con 310,515 ha, seguido de Francisco Morazán (186,016 ha). El departamento con menos superficie de susceptibilidad baja es Islas de la Bahía con 15 ha, y Gracias a Dios con 160 ha. Los departamentos Intibucá, Lempira, Comayagua, Yoro y El Paraíso cuentan con superficies de susceptibilidad media entre 52,000 y 94,000 ha. Los departamentos de Choluteca, Cortés, Copán, Santa Barbara, Ocotepeque y La Paz presentan superficies de susceptibilidad media entre 4,700-33,500 ha. El departamento de Colón solamente cuenta con bosques con susceptibilidad baja, por lo que no se presentan datos en susceptibilidad media.

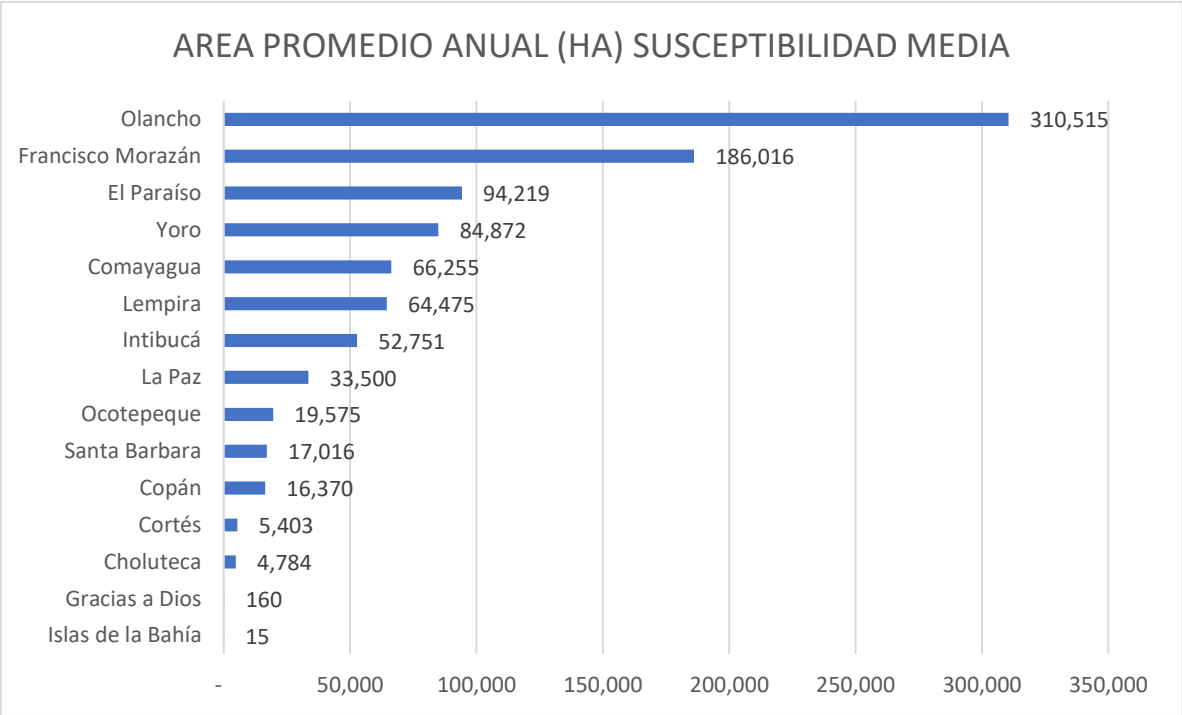


Gráfico 3. Área promedio anual (ha) en susceptibilidad media.

Las superficies con susceptibilidad alta encontradas en los departamentos de análisis disminuyen considerablemente, ya que se encontraron un total de 4421 ha con esta categoría. Existe una superficie estimada de 1791 ha de bosques de pino en el departamento de Olancho con una susceptibilidad alta. El departamento con menor superficie en susceptibilidad alta es Choluteca. Departamentos como Ocotepeque, La Paz, Copán, Santa Barbara, Intibucá, Lempira, Comayagua, Francisco Morazán, Yoro, El Paraíso cuentan con superficies de susceptibilidad alta entre 29 y 697 ha. De los 16 departamentos con bosques de pino en el país, existen 12 departamentos con superficies de bosques con susceptibilidad alta.

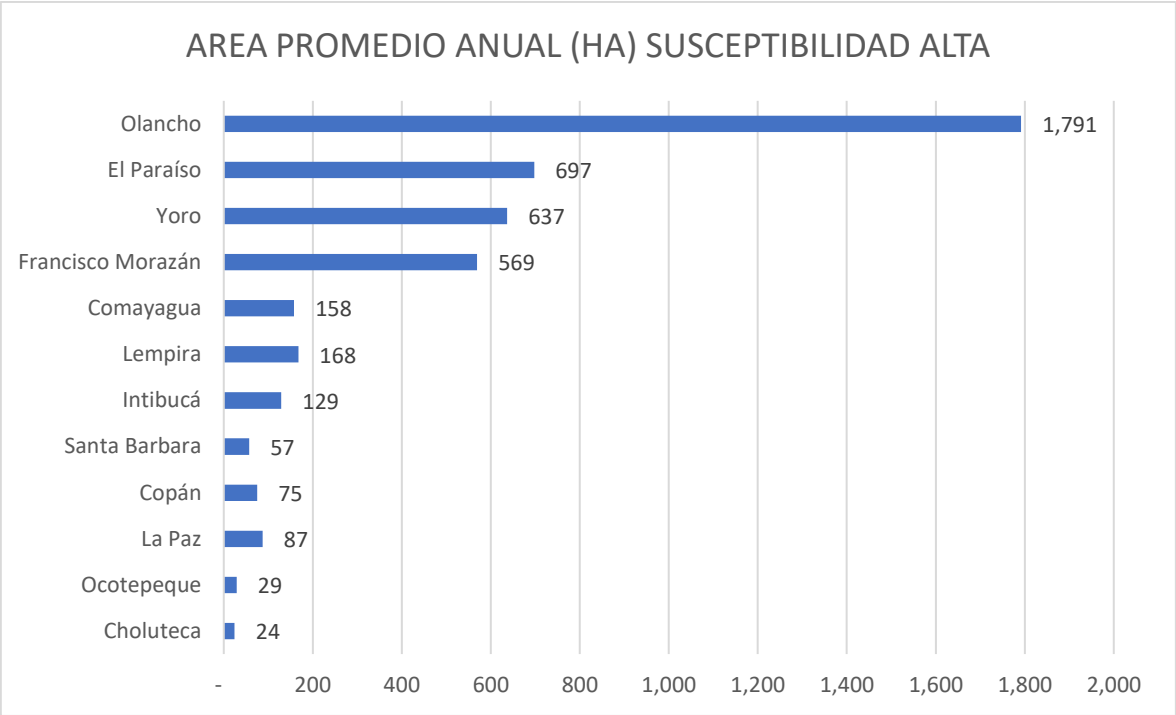


Gráfico 4. Área anual (ha) en susceptibilidad alta.

Para el año 2015, los departamentos con susceptibilidad media y alta según el Mapa de susceptibilidad de la investigación son Olancho, Francisco Morazán, El Paraíso y Yoro, con al menos 677,000 ha. Según reportes del ICF (2017) de áreas afectadas durante el periodo 2015-2016, en los 4 departamentos mencionados se presentaron un total de 432,000 ha de bosque atacado por el gorgojo descortezador del pino.

En cuanto a los resultados obtenidos por municipios (Anexo 2), para el 2015, con un índice bajo se encuentra el departamento de Copán, en el municipio de Dulce Nombre con un área de 1.34 ha, mientras que, Gracias a Dios, con el municipio de Puerto Lempira presenta un área de 333,303.69 ha en riesgo bajo. En riesgo medio, San Antonio Copán es el municipio con menor área (0.88 ha.) y Gualaco en Olancho es el municipio con mayor área (77,025.57 ha); en el riesgo alto, Jacaleapa en El Paraíso es el de menor área con 15.27 ha y La Unión, Olancho es el municipio de mayor área en alto riesgo: 339.39 ha.

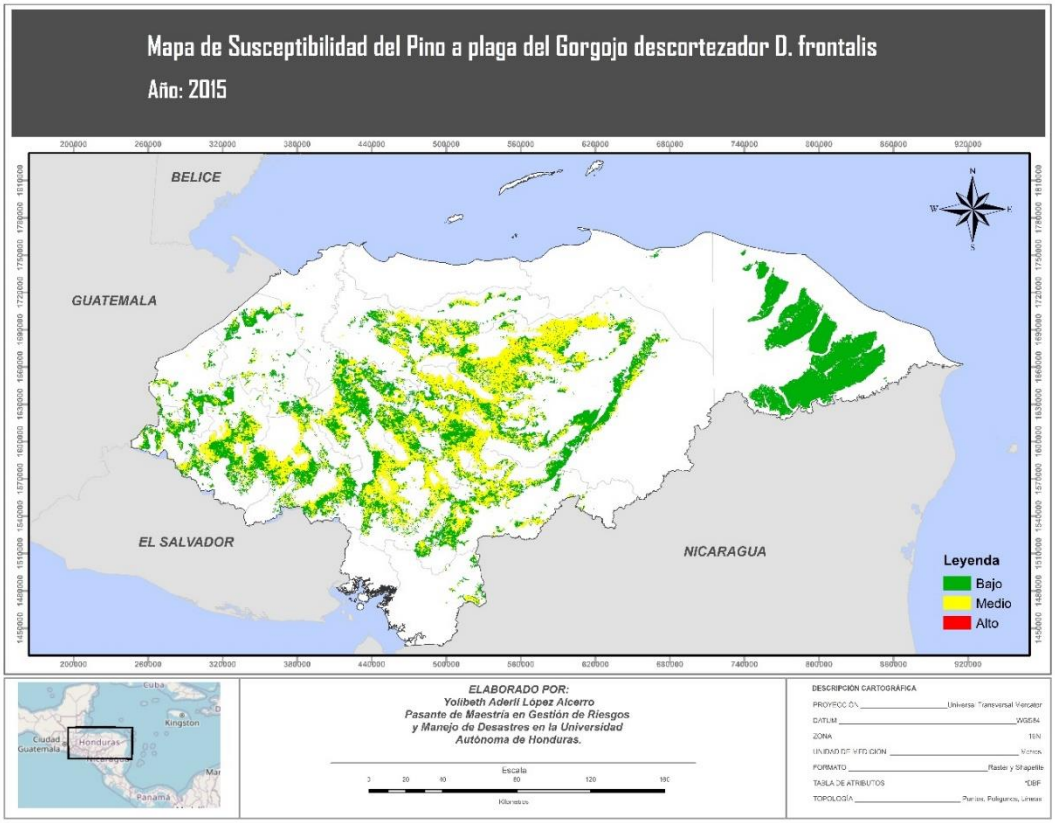


Ilustración 12. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2015.

En el 2016, el municipio con menor área en susceptibilidad baja es Mercedes de Oriente en La Paz (0.99 ha), el de mayor área es Puerto Lempira en Gracias a Dios con 333,419.11 ha. En el rango de susceptibilidad media, con el área más baja está Dulce Nombre Copán (0.24 ha), el de mayor área es Gualaco, Olancho con 57,597.91 ha. Mientras que, en el rango de alta susceptibilidad, el municipio con menor área es Veracruz, Copán (0.10) y el que de mayor área es Yoro, Yoro con 325.63 ha.

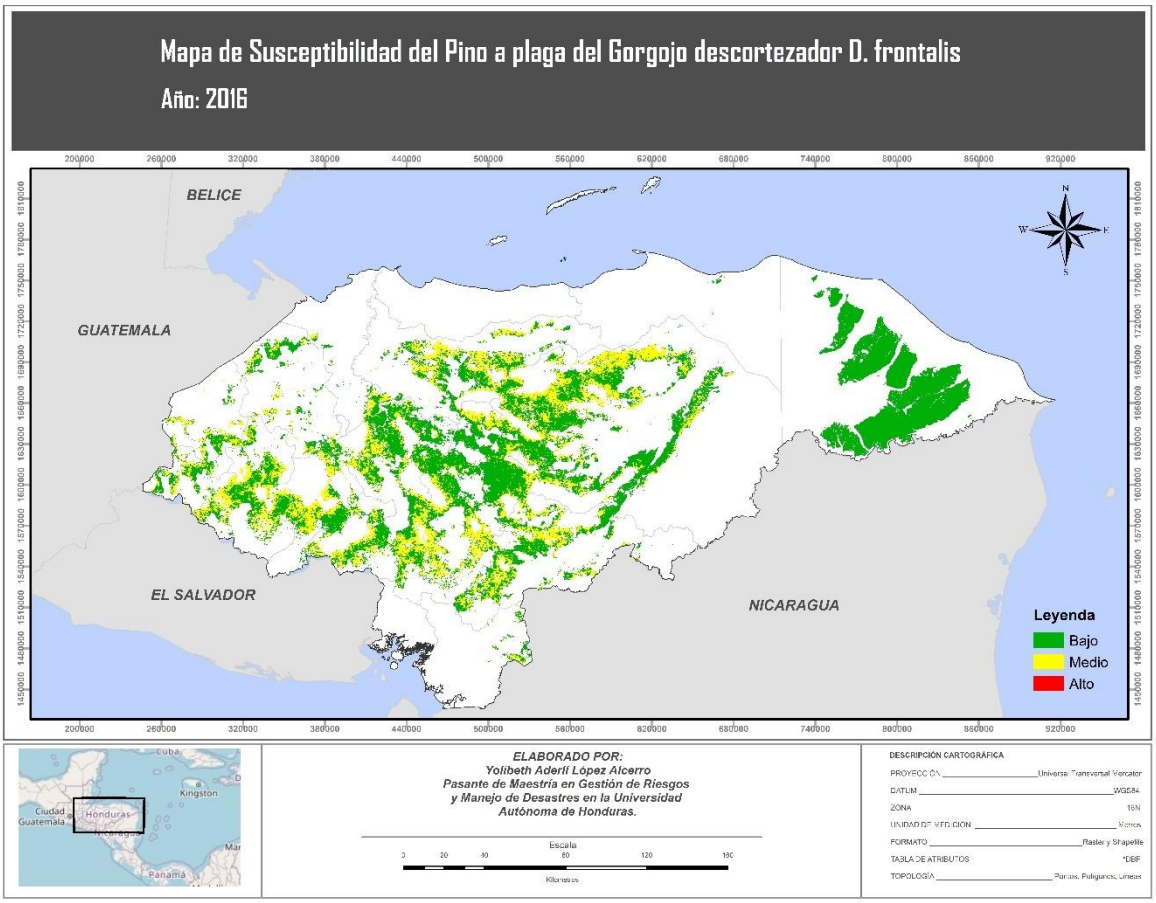


Ilustración 13. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2016.

Al igual que en el 2016, en el 2017 para el nivel bajo de susceptibilidad las cifran varían muy poco por lo que Mercedes en La Paz es el municipio con menor área en susceptibilidad baja con 0.01 ha y el de mayor área es Puerto Lempira en Gracias a Dios con 333,147.58 ha. En el rango medio de susceptibilidad y con la menor área está el municipio de Las Vegas, Santa Bárbara (4.14 ha) y el de mayor área está, al igual que en el 2016, Gualaco en Olancho (86,176.88 ha). En el rango de alta susceptibilidad, con menor área está Dolores, Intibucá (0.03 ha) y el de mayor área es, igual que en el 2016 es Yoro, Yoro (341.02 ha).

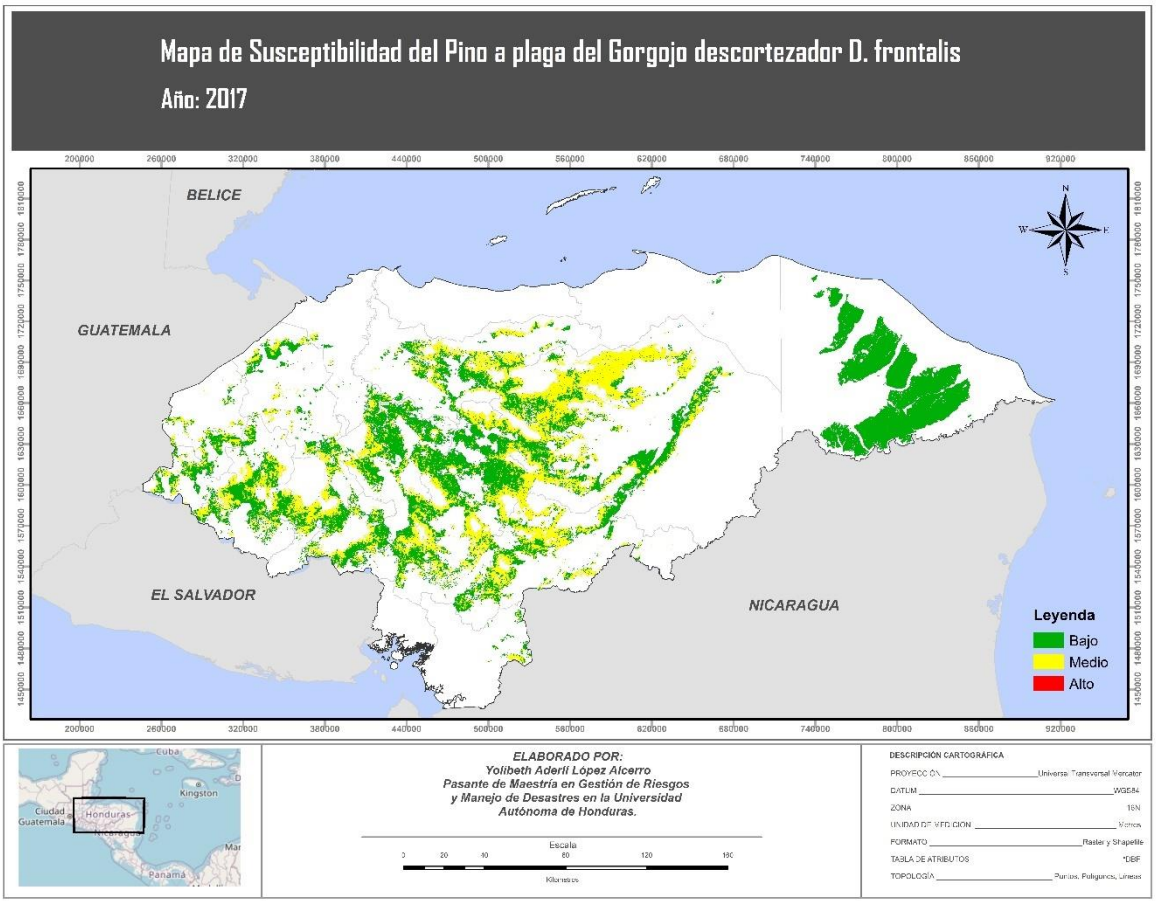


Ilustración 14. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2017.

En el 2018, el municipio de menor área en el rango bajo de susceptibilidad es Dulce Nombre, Copán (0.42 ha) y el de mayor área es Puerto Lempira, Gracias a Dios (333,435.58 ha). En el rango medio, el de menor área es Las Vegas, Santa Bárbara (3.93 ha) y el de mayor área es Gualaco, Olancho (76,734.92 ha), mientras que, en el rango alto, el de menor área es San Esteban, Olancho (15.34 ha) y el de mayor área es Danlí, El Paraíso (201.9 ha).

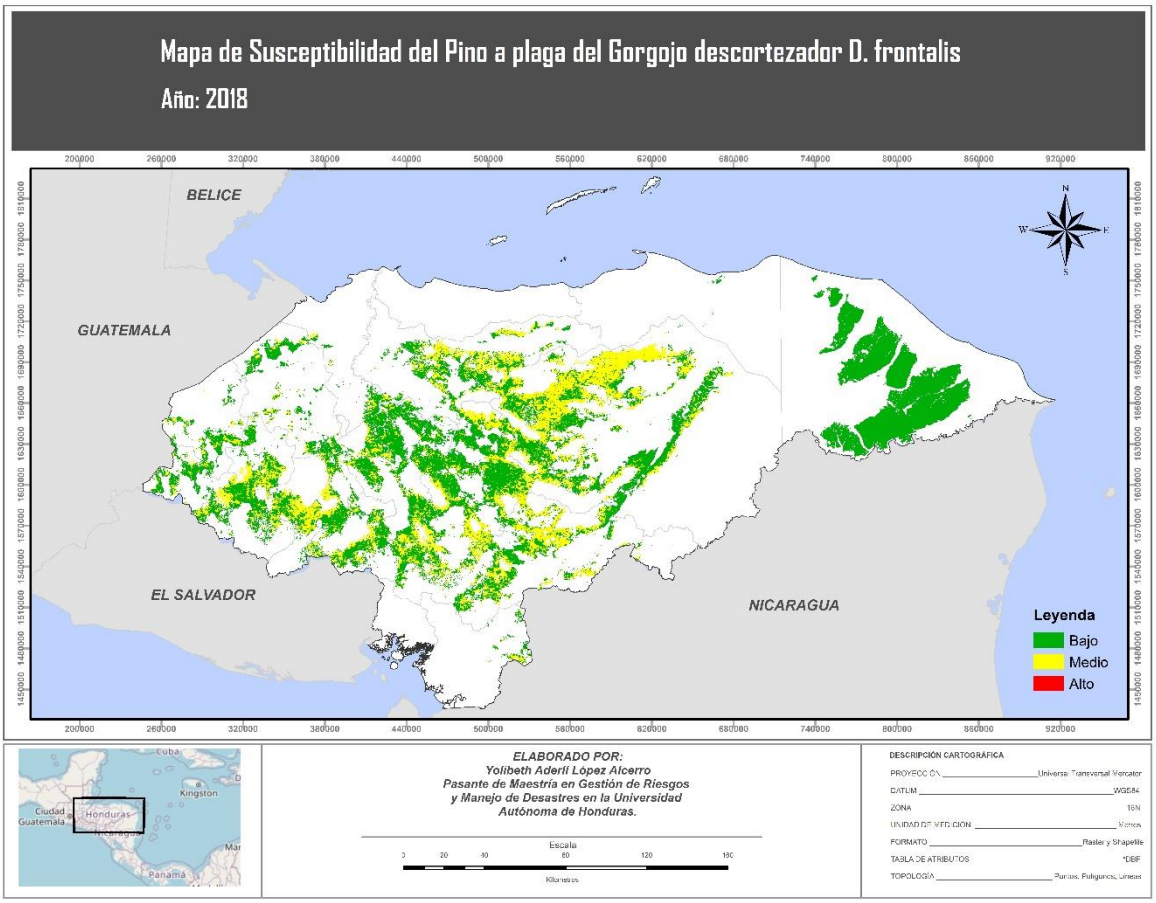


Ilustración 15. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2018.

Igual que en el 2018, en el 2019 el municipio de menor área en el rango bajo de susceptibilidad es Dulce Nombre, Copán (0.24 ha) y el municipio con mayor área es Puerto Lempira, Gracias a Dios (333,377.59 ha). En el rango de susceptibilidad media, el municipio de menor área es Tomalá, Lempira (1.13 ha) y el de mayor área es otra vez, Gualaco en Olancho (63,765.86 ha). En el rango de alta susceptibilidad, el municipio con menor área es Valle de Ángeles, francisco Morazán (0.5 ha) y el de mayor área es, igual que en el 2018, Danlí en El Paraíso (177.94 ha).

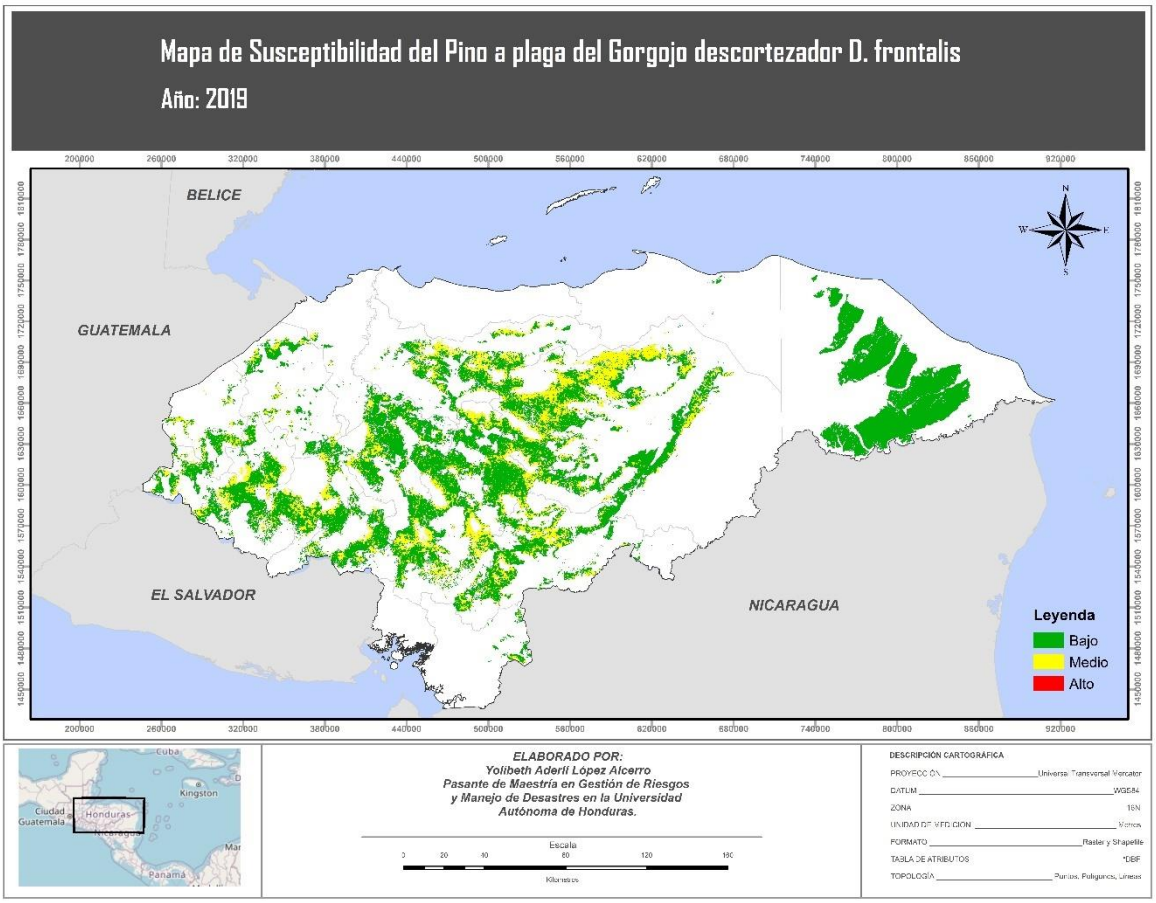


Ilustración 16. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2019.

En el 2020, el municipio de menor área en el rango bajo de susceptibilidad es Dulce Nombre, Copán (0.42 ha) y el de mayor área es Puerto Lempira, Gracias a Dios (333,318.21ha). En el rango de susceptibilidad media, el de menor área es San Juan Guarita, Lempira (0.49 ha) y el de mayor área es Gualaco, Olancho (70,177.79 ha). En susceptibilidad alta, el municipio con menor área es Florida, Copán (15.37 ha) y el de mayor área es Yoro, Yoro (135.15 ha).

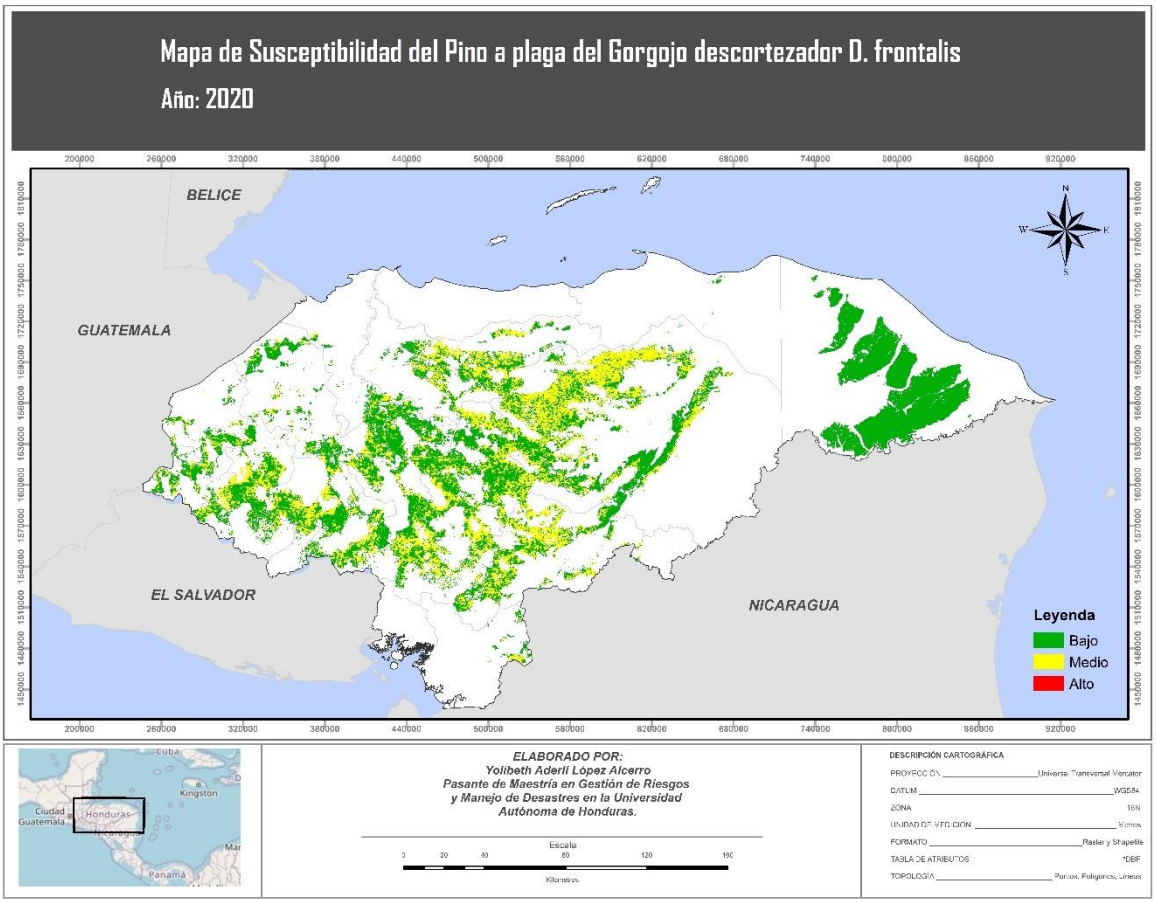


Ilustración 17. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2020.

En el 2021 el municipio de menor área en el rango bajo de susceptibilidad es Dulce Nombre, Copán (0.24 ha) y el de mayor área es Puerto Lempira, Gracias a Dios (333,337.67 ha). En el rango de susceptibilidad media, el de menor área es Las Vegas, Santa Bárbara (5.43 ha) y el de mayor área es Gualaco, Olancho (75,552.5 ha); mientras que, en el rango de susceptibilidad alta, el municipio con menor área es San Ignacio, Francisco Morazán (0.57 ha) y Danlí en el Paraíso es el municipio con mayor área en esta categoría (180.97 ha).

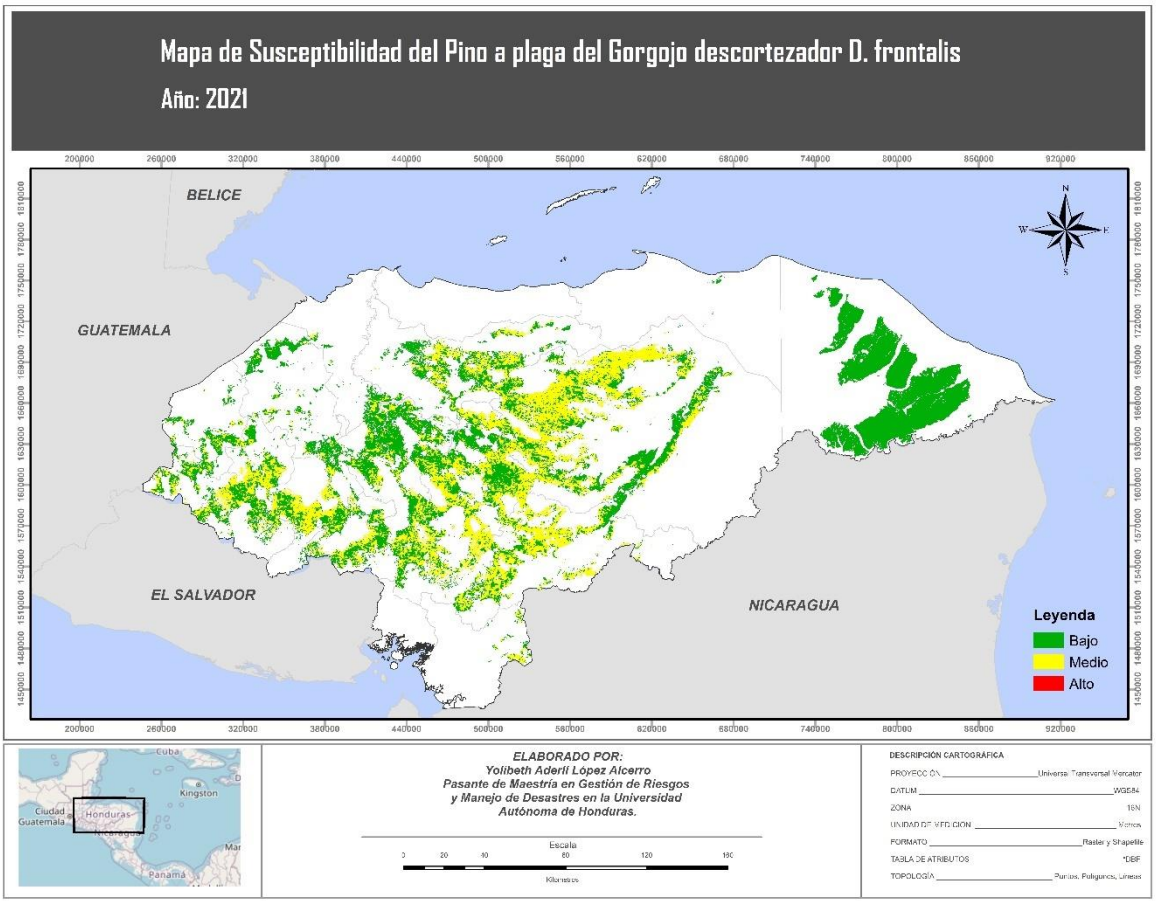


Ilustración 18. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2021.

En el 2022 el municipio de menor área en el rango bajo de susceptibilidad sigue siendo Dulce Nombre, Copán (0.42 ha) y el de mayor área es Puerto Lempira, Gracias a Dios (333274.21 ha). En el rango de susceptibilidad media, el de menor área es Santa Rita, Yoro (6.21 ha) y el de mayor área es nuevamente Gualaco, Olancho (77,812.15 ha). En el rango de susceptibilidad alta, el de menor área es San Juan de Flores, Francisco Morazán (0.36 ha) y el de mayor área es nuevamente Danlí, El Paraíso (498.07 ha).

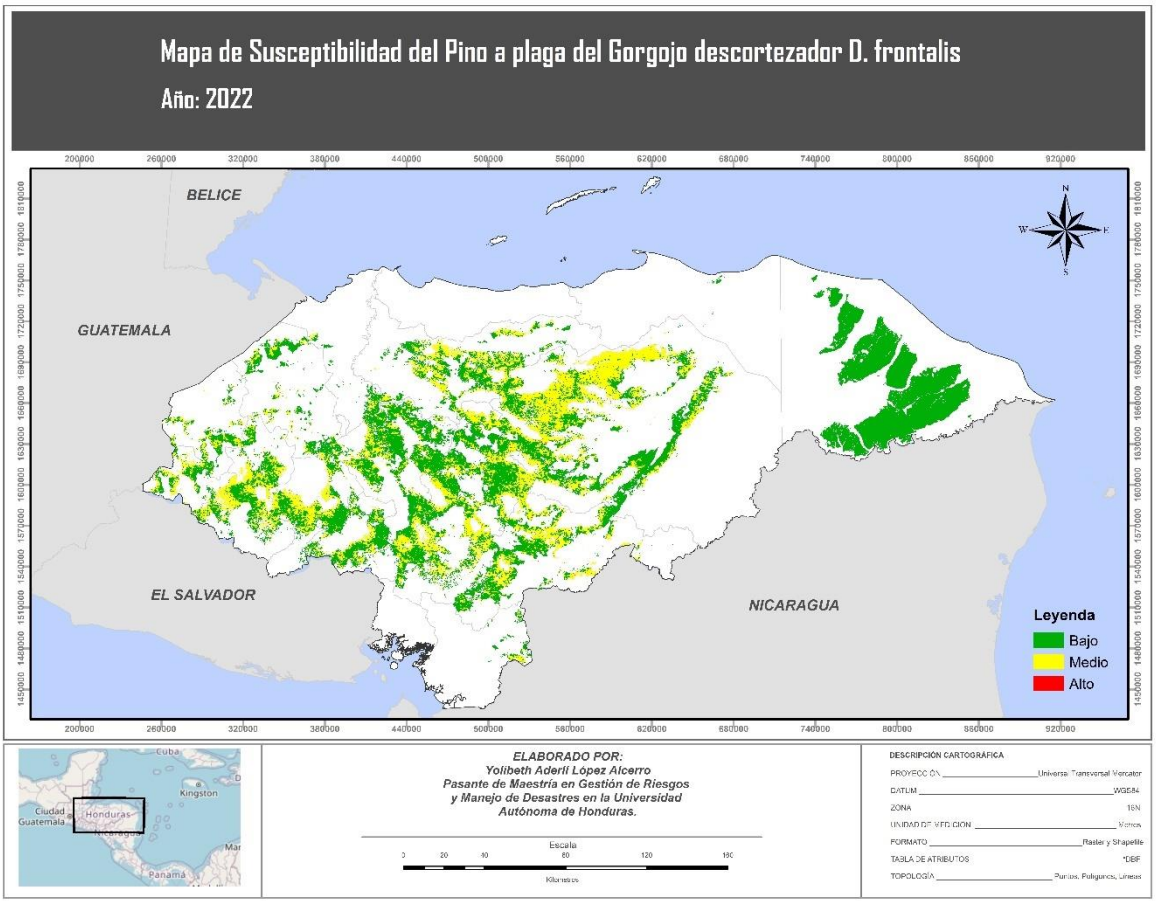


Ilustración 19. Mapa de susceptibilidad del pino a plaga del Gorgojo, 2022.

X. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los análisis exploratorios sobre la información disponible, muestra que Honduras tiene una base de datos que soporta información de cobertura y que permite tener mapeado los recursos del país y realizar análisis encaminados a riesgos y amenazas hacia estos.

La susceptibilidad del bosque está influenciada directamente por las variables climáticas y según los resultados, la precipitación es una de las que mayor efecto e impacto tiene. Del conjunto de variables analizadas, además de la precipitación, la pendiente también tiene un mayor peso en el modelo.

Los resultados encontrados específicamente para el año 2020 sobre las superficies de susceptibilidad media indican un aumento considerable en comparación con los años anteriores. Según reportes de brotes de ataques del gorgojo descortezador del pino para el año 2020, los departamentos de Olancho, El Paraíso, Francisco Morazán y Santa Barbara son los que mayor área afectada reportaron. Lo reportado en el Plan Nacional de Protección contra plagas y enfermedades forestales (CONAPROFOR, 2020) coincide con los resultados de esta investigación dado que los cuatro departamentos mencionados muestran una susceptibilidad baja, media y alta a ataques del gorgojo descortezador del pino.

Según los resultados del estudio, el departamento más susceptible es Olancho y es uno de los departamentos de mayor extensión territorial del país y con mucho recurso bosque por lo que es considerable que sea el de mayor susceptibilidad. El estudio realizado por Valdez y otros en el 2020, mostraron una susceptibilidad alta y muy alta en las partes nororiental y central del país, especialmente.

CAPITULO V

XI. CONCLUSIONES

Honduras cuenta con una base de datos cartográfica con ubicación geográfica que permite realizar investigaciones y monitoreo de los recursos naturales, ya sea a nivel local como a nivel nacional.

Estos resultados respaldan la hipótesis formulada para la investigación de a través de los factores ecosistémicos, climatológicos, biofísicos y geográfico es posible evaluar la susceptibilidad de los ecosistemas de conífera a la plaga del *Dendroctonus frontalis Zimmermann,* haciendo uso de los sistemas de información geográficas y con un nivel considerable de exactitud.

Los resultados de esta investigación revelan que los departamentos con mayor susceptibilidad son Olancho, Yoro, Francisco Morazán, El Paraíso y Comayagua que en todos los años de estudio presentaron mayores áreas en susceptibilidad media y alta. Entre los municipios con susceptibilidad media y alta se encuentran: Danlí (El Paraíso) y Gualaco (Olancho).

XII. RECOMENDACIONES

Para futuros análisis o estudios similares, es recomendable realizar el análisis de importancia de variable utilizando el método del área bajo la curva para obtener datos que pueden ser comparados con el presente estudio.

Se recomienda un constante monitoreo de las poblaciones de gorgojo en los departamentos y municipios con susceptibilidad alta que permita validar el mapa de susceptibilidad y reducir área afectada de bosque.

CAPITULO VI

XIII. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, A. (2019). Evaluación ambiental a las actividades fito-profilácticas y sanitarias prescritas para el control del Dendroctonus e Ips sp en Pinus oocarpa de la reserva natural Tomabú, en el periodo 2016 – 2018. Tesis. Managua, Nicaragua. Disponible en https://core.ac.uk/download/pdf/250146187.pdf

Aguilera, M., Munguía, K., López, E., Martínez, A., & Ceccarelli, F. (2019). Climate change and forest plagues: assessing current and future impacts of diprionid sawflies on the pine forests of north-western Mexico. PeerJ, 7: e7220. doi: https://doi.org/10.7717/peerj.7220

Alarcón, J. (2017). Modelos de minería de datos: random forest y adaboost, para identificar los factores asociados al uso de las TIC (internet, telefonía Fija y televisión de paga) en los hogares del Perú. 2014. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/323350641.pdf

Allen, D., Macalady, 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, 660-684. doi: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Argeñal, J. (2010). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras. Disponible en https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31579495/Variabilidad_Climatica_y_Cambio_Climatico_en_Honduras-libre.pdf?1392479091=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DVariabilidad_Climatica_y_Cambio_Climatic.pdf&Expires=1686287762&Signature=VIubGd55k9sFtHKN7IgAkmcpJ5SulRhA4F8J0uVQ7Ux1OQL1V2hmT9VnIoAHFhrr48JDdVSlogdhFFPf0ifxb8dGH31qY5B7ukv7Zy5y3JvVK3QdZoV~IQTd9y2ZBM2ApTwOPiwAhsiWzearcEJ~UjYGWJeFR5xNQofrAUJmWwl25G2zp0~DGieCBLdetlkWQ-g1XoDFh8L~hfo0Hy3NzSiAryxSVMuVd2Y9eEjZlusdoDNDbh3235DOfazvVQ8IO9FgeOK5VU~6REabCOM18LyGGg49YG4ccgNw1kGfubGbF4NHcL3-QAxjE5bR8tGTxv-vdo6spgrqH-WXcOp5zw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Armenteras, D., González, T., Vergara, L., Luque, F., Rodríguez, N., & Bonilla, M. (2015). Revisión del concepto de ecosistema como “unidad de la naturaleza” 80 años después de su formulación. Ecosistemas, revista científica de ecología y medio ambiente. Vol. 25 (1). pág. 83-89.

Banegas, L. (2019). Métodos y Técnicas de Investigación. Segunda edición. Tegucigalpa, Honduras.

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 24-31.

Bernal, C.A. (2010). Metodología de la investigación, Tercera Edición. Editorial Pearson Educación S.A, Bogotá, Colombia.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45(1), 5-32.

Billings. R., Clarke, S., Espino, V., Cordón, P., Meléndez, B., Campos, J., & Baeza, G. (2004). Gorgojo descortezador e incendios: una combinación devastadora para los pinares de América Central. Unasylva 2017. Vol. 55. pág. 15-21. Disponible en: https://www.barkbeetles.org/centralamerica/y5507s06.pdf

Billings. R., & Espino. V. (2005). El Gorgojo Descortezador del Pino (*Dendroctonus frontalis*) en Centroamérica. Cómo reconocer, prevenir y controlar plagas. Disponible en: https://www.barkbeetles.org/centralamerica/centralamerica.pdf

Billings, R. (2011). Dendroctonus frontalis Zimmermann. In Encyclopedia of Entomology (pp. 1201-1208). Springer, Dordrecht.

Bradley, R., Keimig, F., & Diaz, H. (2004). Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. Eophysical research letters. Vol. 31. Disponible en https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2004GL020229

Bruijnzeel, L. A., Scatena, F. N., & Hamilton, L. S. (Eds.). (2011). Tropical montane cloud forests: science for conservation and management. Cambridge University.

Broadbent, E., Asner, G., Keller, M., Knapp, D., Oliveira, P., & Silva, J. (2008). Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. Biological Conservation, 141(7), 1745-1757.

Centro de Estudios Ambientales y Alianza para la Conservación de bosque de Pino y Encino de Mesoamérica. (2010). Diagnóstico Ecológico y Socioeconómico de la de Ecorregión Bosques Pino-Encino de Centroamérica. Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad/Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.

Champion, C., & Xuan, D. (2010). Information Security. Threats and Attacks. Ohio, United States of America. Obtenido de http://web.cse.ohio-state.edu/~champion.17/4471/4471_lecture_2.pdf

Chuvieco, E. (2008). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Tercera Edición actualizada. Disponible en https://es.scribd.com/document/423846453/Sensores-Remotos-Chuvieco-pdf#

Clark, R., & Roush, T. (1984). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B7), 6329-6340.

Comisión Nacional Forestal. (2015). Manual para la identificación, y manejo de insectos descortezadores del pino. Guía práctica para la identificación y manejo de los descortezadores del pino. Disponible en http://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/09%20Manuales%20t%C3%A9cnicos/Manual%20identificacion%20descortezadores%20del%20pino.pdf

Comisionado Nacional de los Derechos Humanos (CONADEH), (2016). El Gorgojo descortezador del pino y otras graves amenazas ambientales a la vida digna de los hondureños y hondureñas. Disponible en: https://www.conadeh.hn/wp-

content/uploads/2022/06/Informe-Especial-Gorgojo-del-Pino-y-Amenazas-Ambientales.pdf

Costa, L., Rebolledo, I., Urmeneta, C., Mancilla, B., Alvarez, D., & Gomez, R. (2013). Guía conceptual y metodológica para desarrollo de tipologías forestales de captura de carbono. Disponible en: https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1375370889Gu%C3%ADatipolog%C3%ADas.pdf

Cuervo, M.; & Morales, F. (2009). Las teorías del desarrollo y las desigualdades regionales: una revisión bibliográfica. Análisis Económico. Vol. XXIV. No. 55. pág. 365-383. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/413/41311453017.pdf

Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. Ecology, 88(11), 2783-2792.

Damodaran, A. (2007). What is Risk? En A. Damodaran, Strategic Risk Taking: A Framework for Risk Management (págs. 1-9). Pearson. Obtenido de http://people.stern.nyu.edu/adamodar/pdfiles/valrisk/ch1.pdf

Davison, A., & Hinkley, D. (1997). Bootstrap methods and their application. Cambridge University.

De la Casa, A., & Ovando, G. (2006). Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias. Vol. 35. Pág. 67-85. Disponible en https://www.redalyc.org/pdf/864/86435105.pdf

Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. Ingeniería e Investigación. Vol. 31. Pág. 80-90. Disponible en http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a09.pdf

Edeso, J., Merino, A., González, M., & Marauri, P. (1998). Manejo de explotaciones forestales y pérdida de suelo en zonas de elevada pendiente del país vasco. Cuaternario y Geomorfología. pág. 105-116. Disponible en: http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol12_1/cuaternario12(1-2)_09_.pdf

Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. The Annals of Statistics, 7(1), 1-26.

Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1994). An introduction to the bootstrap.

ESA. (s.f.). Sentinel Online. (THE EUROPEAN SPACE AGENCY) Recuperado el 5 de July de 2021, de Sentinel-2: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. (2004). Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Obtenido de https://www.eird.org/gestion-del-riesgo/glosario.pdf

Estrategia Internacional para la Reducción del Riesgo (ONU/EIRD). (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Disponible en: https://eird.org/americas/we/docs/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

Evans, A., Finkral, A., & Hofstetter, R. (2016). The rise of the Medi-plants: International trade, phyto-sanitary regulations, and the spread of forest invasive species. Forestry: An International Journal of Forest Research, 89(3), 324-332.

Farjon, A. (2008). A natural history of conifers. Timber Press.

Fernández, P., Alonso, V., & Montero, C. (2002). Determinación de factores de riesgo. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Disponible en: https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Factor+de+riesgo+&btnG=

Ferrelli, F., & Solange, V. (2015). Variabilidad de las precipitaciones. Reseñas de Tesis, 242-246. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/311621177_Variabilidad_de_las_precipitaciones_y_sus_efectos_sobre_la_respuesta_espacio-temporal_de_cuerpos_de_agua_en_la_Region_Pampeana_Argentina

Fettig, C., Klepzig, K., Billings, R., Munson, A., Nebeker, T., Negrón, J., & Nowak, J. (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.

Fischhoff, B., Watson, S. R., & Chris, H. (1984). Defining Risk. Policy Sciences, 123-139. doi:0032-2678/84

Foden, W., Mace, G., Vie, J. C., Angulo, A., Butchart, S., DeVantier, L., Turak, E. (2008). Species susceptibility to climate change impacts. (J. C. Vié, C. Hilton-Taylor, & S. N. Stuart, Edits.) Switzerland: UICN: Red List.

Fondo Social Europeo. (2011). Glosario de términos utilizados en levantamientos y replanteos. Disponible en http://incual.mecd.es/documents/20195/1873855/EOC274_3+-+A_GL_Documento+publicado/95dee88b-3cf2-4029-81a4-98c7fd36addb

Flores, B, & González, E. (2014). Percepción social de los eventos climáticos extremos: una revisión teórica enfocada en la reducción del riesgo. vol. 16, núm. 39, julio-diciembre, 2014, pp. 36-58. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en https://www.redalyc.org/pdf/607/60731551003.pdf

García, M. & López, I. (2014). Definición, clasificación de la variable recursos financieros docentes para la evaluación institucional. Universidad de Ciencias Pedagógicas "Raúl Gómez García". Volumen 14, No. 47, abr.-jun. Pág. 1-10, Guantánamo, Cuba.

Garrett, K., Forbes, G., Gomez, L., Gonzáles, M., Gray, M., Skelsey, P., & Sparks, A. (s.f.). Cambio climático, enfermedades de las plantas e insectos plaga. Disponible en: https://www.croplifela.org/es/actualidad/articulos/impactos-del-cambio-climatico-en-la-incidencia-de-plagas-y-enfermedades-de-los-cultivos

Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257-266.

Gentry, A. H. (1988). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. Annals of the Missouri Botanical Garden, 1-34.

Ghorbanzadeh, O., Valizadeh Kamran, K., Blaschke, T., Aryal, J., Naboureh, A., Einali, J., & Bian, J. (2019). Spatial Prediction of Wildfire Susceptibility Using Field Survey GPS Data and Machine Learning Approaches. Fire, 2(43). doi: doi:10.3390/fire2030043

Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment, 87(2-3), 273-282.

GISTIC. (12 de July de 2021). GIS Technology. Obtenido de Advantages and Disadvantages: http://www.gistic.org/gis-technology-advantages-and-disadvantages/

Grageda, J., Ruiz, J., Jiménez, A., & Fu, A. (2014). Influencia del cambio climático en el desarrollo de plagas y enfermedades de cultivos en Sonora. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol.5. Texcoco. 2014.

Gobierno de la República de Honduras. (2010). Reglamento General de la Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. Acuerdo Ejecutivo No. 031-2010. pág. 212.

Gomez, D. F., & Hulcr, J. (2019). Southern Pine Beetle, Dendroctonus frontalis (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). ResearhGate. doi:10.32473/edis-in333-2019

González, H., & Narváez, S. (2005). Diagnóstico del bosque de galería de la Hacienda Las Mercedes, Managua. Nicaragua. Disponible en https://repositorio.una.edu.ni/1071/1/tnk10g643d.pdf

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18-27. Disponible en Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone - ScienceDirect

Hernández, A., Saborio, J., Ramsey, R. & Rivera, S. (2012). Probabilidad de ocurrencia de ataques de escarabajos de corteza en bosques de coníferas en Honduras bajo escenarios normales y de cambio climático, Geocarto International, 27:7, 581-592, DOI: 10.1080/10106049.2011.650652

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (1991). Metodología de la investigación. Disponible en https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf

Hu, Q., Li, Z., Wang, L., Huang, Y., Wang, Y., & Li, L. (2019). Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. Water, 11(579). doi:10.3390/w11030579

Imbach, P., Beardsley, M., Bouroncle, C., Medellín, C., Läderach, P., Hidalgo, H., & Alfaro, E. (2017). Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. Climatic Change, 141(1), 1-12.

Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF)., & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra de Honduras. Tegucigalpa, Honduras.

Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF)., & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). Análisis Socioeconómico sobre la Afectación de la Plaga de

Dendroctonus frontalis en el Departamento de Olancho, Honduras, ocurrido durante Agosto 2014 y Julio 2017. Tegucigalpa, Honduras.

Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF)., & Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (MiAmbiente+). (2017). Tipología de Bosques de Honduras. Tegucigalpa. Honduras.

Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF). (2017). Informe de episodio de ataque del gorgojo descortezador del pino Dendroctonus frontalis en Honduras. Tegucigalpa. Honduras. Disponible en https://docplayer.es/86482654-Informe-de-episodio-de-ataque-del-gorgojo-descortezador-del-pino-dendroctonus-frontalis-en-honduras.html

Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF)., & Programa Regional REDD/CCAD-GIZ. (2014). Sistema de clasificación del Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra de Honduras, 2012. Tegucigalpa, Honduras.

Jaramillo, R. (2019). Definición de susceptibilidad por movimientos en masa en suelo urbano escala 1:2000 a partir de modelos determinísticos usando el modelo físico distribuido de análisis de estabilidad tridimensional Scoops3D. Caso de estudio: San José la Cima. Medellín. Colombia. pág. 91. Disponible en https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/16130/Ricardo_JaramilloGonzalez_2019.pdf?sequence=2

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An Introduction to Statistical

Justice, C., Vermote, E., Townshend, J., Defries, R., Roy, D., Hall, D., & Barnsley, M. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4), 1228-1249.

Kaimowitz, D., & Smith, J. (2001). Soybean technology and the loss of natural vegetation in Brazil and Bolivia. In Agricultural technologies and tropical deforestation (pp. 195-211). CABI.

Klein, I., Oppelt, N., & Kuenzer, C. (2021). Application of Remote Sensing Data for Locust Research and Management—A Review. (A. V. Latchininsky, Ed.) Insects, 12(233). doi: https://doi.org/10.3390/insects12030233

Kuby, M., Tierney, S., Roberts, T., & Upchurch, C. (February de 2005). A Comparison of Geographic Information Systems, Complex Networks, and Other Models for Analyzing Transportation Network Topologies. ResearchGate. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/24329691_A_Comparison_of_Geographic_Information_Systems_Complex_Networks_and_Other_Models_for_Analyzing_Transportation_Network_Topologies

León, M. G. (2018). Análisis de sensibilidad mediante Random forest. Obtenido de https://oa.upm.es/53368/1/TFG_MARTA_GARCIA_RUIZ_DE_LEON.pdf

León, R. (2019). Sobrevivencia, crecimiento y herbivoria de Weinmannia bangii Rusby (Cunnoniaceae) en relacion a la altitud en el bosque nuboso de kosñipata – paucartambo – cusco. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú. Disponible en http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/UNSAAC/4690/253T20190652_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R News, 2(3), 18-22.

Lombardero, M. J., Ayres, M. P., Hofstetter, R. W., Moser, J. C., & Lepzig, K. D. (2003). Strong indirect interactions of Tarsonemus mites (Acarina: Tarsonemidae) and Dendroctonus frontalis (Coleoptera: Scolytidae). OIKIS, 102(2), 243-252. doi:10.1034/j.1600-0706.2003.12599.x

López, R., Góngora, F., Guerra, C., & Garguera, M. (2008). Evaluación y mitigación del impacto ocasionado por los descortezadores de los pinos (Ips: Scolytidae: Coleoptera) en Cuba. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/14_t1c1_01.pdf

López, V., Torres, B., Reséndiz, J., Sánchez, G., & Girón, A. (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. Vol.8. No.41. México. Mayo/junio. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322017000300007&script=sci_arttext

Masek, J. G., Hayes, D. J., Hughes, M. J., Healey, S. P., & Turner, D. P. (2013). The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems. Forest Ecology and Management, 289, 10-20.

Mellor, A., Haywood, A., Jones, S., & Wilkes, P. (2012). Forest Classification using Random forests with multisource remote sensing and ancillary GIS data. 16th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference Proceedings. Melbourne: ResearchGate. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/265382341

Monje, C. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa. Guía didáctica. Universidad Surcolombiana, Facultad de ciencias sociales y humanas. Neiva, Huila, Colombia. Obtenido de https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf.

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons.

Morales, A., Cambrón, V., Soto, J., Wallace, R., & Obregón, J. (2018). Efecto de la temperatura en poblaciones de Dendroctonus frontalis Zimmermann y Dendroctonus mexicanus Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) bajo un escenario de cambio climático en la Sierra Gorda queretana. Acta zoológica Mexicana, 12. Obtenido de https://www.redalyc.org/jatsRepo/575/57560238049/index.html

Muñoz, M. y Paltán, M. (2021). Random forest. Un algoritmo de aprendizaje supervisado para identificar los factores demográficos, socioeconómicos y tecnológicos asociados al uso del internet en Ecuador. Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación presentado como requisito previo a la obtención del título de Ingeniería en Estadística. Obtenido de http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/24276/1/UCE-FCE-CEST-PALTAN%20MISHELLE-MU%C3%91OZ%20MARLON.pdf

Müggenburg, M., & Pérez, I. (2007). Tipos de estudio en el enfoque de investigación cuantitativa. Universidad Nacional de México. Los maestros escriben. Vol 4. No. 1. Obtenido en http://revista-enfermeria.unam.mx/ojs/index.php/enfermeriauniversitaria/article/view/469/449

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (19 de July de 2020). Landsat. (L. Jenner, Editor) Obtenido de Landsat Overview: https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html

Novo, R. (2001). Breve sinopsis sobre la historia de la sanidad vegetal en Cuba. Fitosanidad. Vol. 5. Disponible en https://www.redalyc.org/pdf/2091/209118260007.pdf

Redo, D., Grau, H., Aide, T., & Clark, M. (2012). Asymmetric forest transition driven by the interaction of socioeconomic development and environmental heterogeneity in

Central America. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(23), 8839-8844.

Rodrigo, J. (2020). Distributional Regression Forest: Random Forest probabilístico. Disponible en: https://www.cienciadedatos.net/documentos/54_distributional_regresion_forest.html

Ogle, H. M. (2012). Chico Historical Geographic Information System. Obtenido de Academia: https://www.academia.edu/5736586/Chico_Historical_GIS_Interactive_Website

Ordoñez, J. (2011). "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf

Organización de los Estados Americanos. (1991). Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños. Washington D.C. Disponible en: https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea57s/oea57s.pdf

Organization of American States. (1991). Chapter 5 - Geographic information systems in natural hazard management. En OAS, *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning.* Washington, D.C., United States of America: Office of Foreign Disaster Assistance United States Agency for International Development. Obtenido de https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea66e/ch05.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2012). Guía para la aplicación de normas fitosanitarias en el sector forestal. Estudio FAO Montes 164. pág. 131. Disponible en: http://www.fao.org/3/i2080s/i2080s.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020) a. Año Internacional de la Sanidad Vegetal. Disponible en http://www.fao.org/3/ca6992es/ca6992es.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020) b. Términos y Definiciones. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Disponible en http://www.fao.org/3/I8661ES/i8661es.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020) c. Reducción de la degradación forestal. ¿Qué es la degradación forestal?. Disponible en http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/reducing-forest-degradation/basic-knowledge/es/

Organización Meteorológica Mundial. (2017). Declaración sobre el estado del clima mundial en 2016. Disponible en https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=19858

Orozco, O. (2010). Pendiente del terreno. Atlas regional de impactos derivados de las actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. pág. 26-28. Disponible en: http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/download/130/124/455-1?inline=1

Pała´s, W., & Zawadzki, J. (2020). Sentinel-2 Imagery Processing for Tree Logging Observations on the Białowie˙za Forest World Heritage Site. *Forests*(11). doi:10.3390/f11080857

Paredes, F., Alves, H., Lakshmi, V., Kumar, M., & de Oliveira, C. (2020). Assessment of the CHIRPS-Based Satellite Precipitation Estimates. *IntechOpen*. doi:10.5772/intechopen.91472

Park, H., Kim, K., & Lee, k. (2019). Prediction of Severe Drought Area Based on Random Forest: Using Satellite Image and Topography Data. *Water, 11*(705). doi:10.3390/w1104070

Peggion, M., Bernardini, A., & Masera, M. (2008). *Geographic Information Systems and Risk Assessment.* Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Obtenido de https://core.ac.uk/download/pdf/38613171.pdf

Perry, J. (1991). The pines of Mexico and Central America. Timber Press.

Psomiadis, E., Charizopoulos, N., Efthimiou, N., Soulis, X., & Charalampopoulos, I. (2020). Earth Observation and GIS-Based Analysis for Landslide Susceptibility and Risk Assessment. *International Journal of Geo-Information*. doi:10.3390/ijgi9090552

Programa REDD-CCAD-GIZ. (s.f). Marco para iniciativas de Reducción de Emisiones en los bosques de conífera de los países de Guatemala, Honduras, Nicaragua y República Dominicana. Desarrollando acciones de protección del clima a través de un manejo sustentable de los bosques. Implementado por la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ).

Ramos, J. (2016). Identificación de oportunidades de restauración del bosque afectado por el gorgojo descortezador del pino (Dendroctonus frontalis Zimmermann) en el Refugio de Vida Silvestre La Muralla. Universidad Nacional de Agricultura. Olancho, Honduras. Disponible en: http://clifor.hn/wp-content/uploads/2019/02/TESIS-JORGE-RAMOS-UNAG-2016.pdf

Richardson, D. (1998). Ecology and biogeography of Pinus. Cambridge University.

Rivera, M., Locatelli, B., & Billings, R. (2010). Cambio climático y eventos epidémicos del gorgojo descortezador del pino Dendroctonus frontalis en Honduras. Forest Systems, 70-76. Obtenido de http://www.inia.es/gcontrec/pub/070-076_Cambio_1271057271875.pdf

Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., & Poulter, B. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment, 145, 154-172.

Rubí, A., & Carla, S. (2010). Descripción climática, Mapa de temperatura media mensual y anual, precipitación anual, evapotranspiración potencial, mensual y anual, balance hídrico directo anual, índice de aridez de Martone. Atlas climático digital de la República Argentina, 57. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-texto_atlas_climtico_digital_de_la_argentina_110610_2.pdf

Ruíz, T., & Flores, J. (2007). Estudio de la composición florística, sanidad forestal y recomendaciones de manejo para la vegetación arbórea de un sector del Campus Norte de la Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. Disponible en https://repositorio.una.edu.ni/1101/1/tnk10r934e.pdf

Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., & Nickless, D. (2004). Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. Advances in Space Research, 34(4), 710-714.

Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (Mi Ambiente+). (2017). Propuesta de Nivel de Referencia de las Emisiones Forestales por Deforestación en la República de Honduras. Tegucigalpa.

Singh, K., Sharma, M., & Pandey, A. (2017). Biodiversity-Threats and Conservation. *Environ. Sci. & Engg Vol. 2: Biodiversity and Conservation*, 282-316.

Six, D., & Bracewell, R. (2015). Dendroctonus frontalis: Exploiting the enemy from within. In Bark Beetles (pp. 101-128).

Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ). (2018). Introducción a Javascript para Google Earth Engine (GEE). Ficha Técnica #1. Página 5.

Styles, B. T. (1993). The Flora of the Pinus oocarpa forest in the Cordillera Nombre de Dios, Honduras. Kew Bulletin, 48(4), 833-849.

Texas Forest Service. (1996). Los Escarabajos Descortezadores del Pino, con énfasis en Dendroctonus frontalis: Métodos de Control Directo. *Bark and Wood Boring Beetles of the World*. Obtenido de https://www.barkbeetles.org/spb/indicea.html

Texas Forest Service. (2005). The Southern Pine Beetle (Dendroctonus frontalis) in Central America: How to Recognize, Prevent and Control Outbreaks. (R. F. Billings, & J. V. Espino Mendoza, Edits.) *Bark and Wood Boring Beatles of the World, 0605/15000*. Obtenido de https://www.barkbeetles.org/centralamerica/0605e.cfm

Thunes, K., Midtgaard, F., Kirkendall, L., Leverón, O. & Espino, V. (s.f). Los Gorgojos de Pino de Honduras: Descripciones de Especies, asociaciones de hospederos y métodos de monitoreo y control. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Karl-Thunes/publication/297688412_Los_Gorgojos_de_Pino_de_Honduras_Descripciones_de_Especies_Asociaciones_de_Hospederos_y_Metodos_de_Monitoreo_y_Control/links/56e031d608aee77a15fe8db2/Los-Gorgojos-de-Pino-de-Honduras-Descripciones-de-Especies-Asociaciones-de-Hospederos-y-Metodos-de-Monitoreo-y-Control.pdf

Tran, P., Shaw, R., Chantry, G., & Norton, J. (2009). GIS and local knowledge in disaster management: a case study of flood risk mapping in Viet Nam. *Disasters*, *33*(1), 152-169. doi:10.1111/j.0361-3666.2008.01067.x

Ungerer, J., Ayres, P., & Lombardero, J. (1999). Climate and the northern distribution limits of Dendroctonus frontalis Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biogeography*, *6*(26), 1133-1145. doi:10.1046/j.1365-2699.1999.00363.x

USGS. (2019). *Landsat Surface Reflectance-Derived Spectral Indices*. Obtenido de Normalized Difference Moisture Index: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/normalized-difference-moisture-index

United States Department of Agriculture (USDA). (2011). Southern Pine Beetle II. Southern Research Station. General Technical. Report SRS-140. pág. 522. Disponible en: https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_srs140/gtr_srs140.pdf

Useros, J. (2012). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. Consejería de Sanidad de la Junta de Castilla y León, Valladolid. Vol. 50. Disponible en file:///C:/Users/Yolibeth%20Lopez/Downloads/Dialnet-ElCambioClimatico-4817473.pdf

Valdez, M., Chen, C., Yi-Jeang, L., Kuo, Y., Chen, Y., Medina, D. & Díaz, K. (2020). Caracterización de patrones espaciales de brotes de escarabajos descortezadores de pino durante la estación seca y lluviosa en Honduras con la ayuda de sistemas de información geográfica y datos de teledetección. Disponible en: Forest Ecology and Management | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier.

Vermote, E., El Saleous, N., Justice, C., Kaufman, Y., Privette, J., Remer, L., & Tanré, D. (2009). An operational MODIS aerosol retrieval algorithm at the NASA Goddard Space Flight Center. International Journal of Remote Sensing, 29(5), 1295-1308.

Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. Remote Sensing of Environment, 185, 46-56.

Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 1130-1141. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.06.008

Waring, R. H. (2002). Temperate Coniferous Forests. (T. Munn, Ed.) *Encyclopedia of Global Environmental Change. The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change, II*, 560 -565. Obtenido de http://people.forestry.oregonstate.edu/richard-waring/sites/people.forestry.oregonstate.edu.richard-waring/files/publications/TempForestEncyc.pdf

World Meteorological Organization. (2015). Technical Regulations. Geneva. Obtenido de https://www.wmo.int/pages/prog/www/WIS/Publications/49%20(Technical%20Regulations)/49%20-%20Volume%20I/49_III_E.pdf

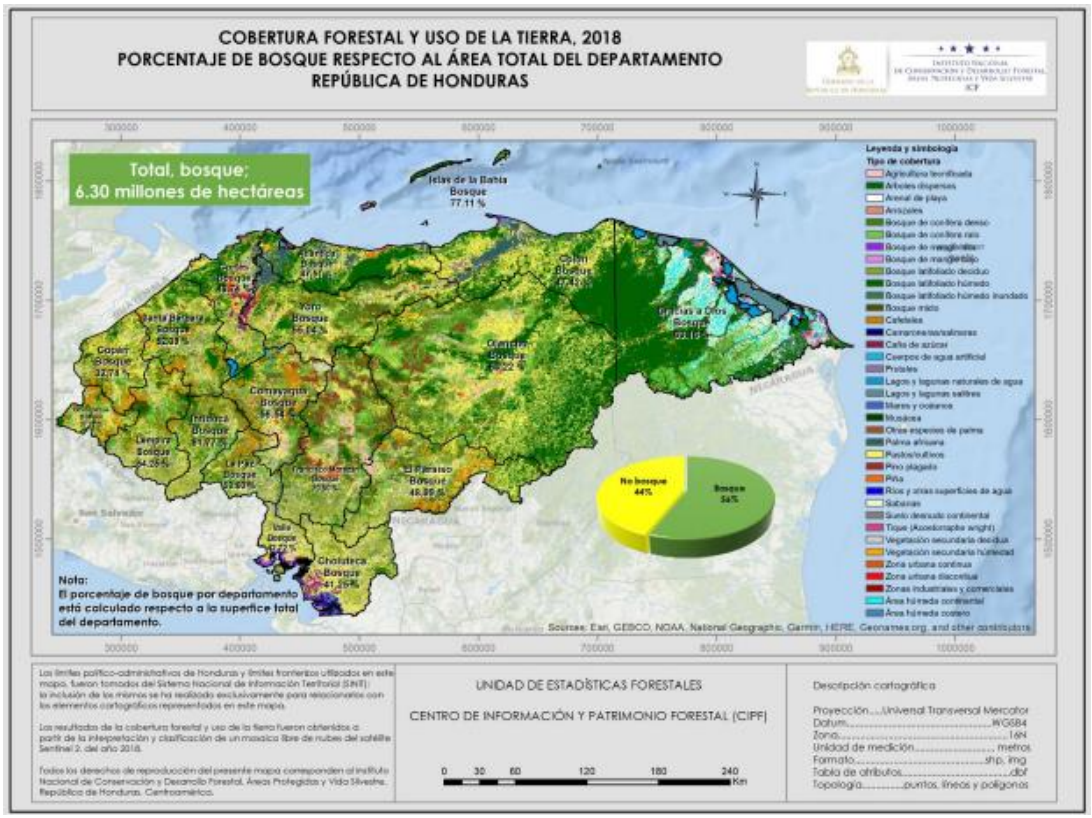
Yang, Y., Cai, W., & Yang, J. (2017). Evaluation of MODIS Land Surface Temperature Data to Estimate Near-Surface Air Temperature in Northeast China. *Remote Sensing*, *9*(410). doi:10.3390/rs9050410

Zambrana, Y. (2008). Plan de manejo y gestión de la subcuenca del río San Francisco, Matagalpa-Nicaragua. Managua, Nicaragua. Disponible en https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnp10z24.pdf

CAPITULO VII

XIV. ANEXOS

1. Mapa de cobertura forestal



Fuente: Anuario Forestal de ICF, 2019.

2. Base de datos en Excel de los resultados de susceptibilidad por categoría (baja, media y alta), por año y por división administrativa, disponible en: https://docs.google.com/spreadsheets/d/159mm_9wDnn2jyzVr9RSO6IqYFmpCINKx/edit?usp=drive_link&ouid=117521435804446593707&rtpof=true&sd=true