

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



UANL

INGENIERO CIVIL

TESIS DE LICENCIATURA

"Diseño de un modelo multicriterio con base SIG para mapeo de riesgo por incendios forestales en la Sierra Madre Oriental"

Presenta

Tomás Eduardo Navarro González

Directora de tesis

Dra. Fabiola D. Yépez Rincón

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, a 17 de abril de 2023.

Dedicatoria

A Francisca González y Cenovio Navarro, mis padres. Muchas gracias por siempre apoyarme a superarme, por los valores que me inculcaron, hacer de mi casa un hogar y nunca dudar de mí.

A mi hermana Denis, que siempre me escucha y hace más amenos aquellos momentos oscuros, y que aún sin saberlo es un gran pilar en mi vida.

Agradecimientos

Para mi familia que siempre estuvieron conmigo en mis altas y mis bajas, pero siempre dispuestos a escucharme aún sin comprender lo que les platicaba.

Al equipo de Geomática, que poco a poco se convirtieron en una pequeña familia y estar para responder mis preguntas por más extrañas que fueran, al Dr. Roberto Huerta, la Maestra Diana, la Ingeniera Andrea, mis compañeros y hoy amigos.

A la Doctora Fabiola Yépez, que adoptó en el departamento a un joven con interés por aprender y apoyó durante este camino.

Para Julio y Salvador, gracias por todo su apoyo moral, por mantenerme lo más cuerdo posible, todas esas noches de videojuego y las reuniones con grandes pláticas, que sepan que son gran parte en esta tesis y mis grandes amigos.

Gracias a mis amigos Rodrigo Valdez, Katia y Andrea Alanís que siempre preguntaban acerca de mi tesis y me alentaban a seguir adelante.

Y a todas aquellas personas que siempre de alguna manera me alentaron a seguir adelante y de alguna manera me ayudaron en este proceso.

Índice

Contenido

1	Introducción	11
1.1	Justificación	14
1.2	Objetivo general.....	14
1.3	Objetivos particulares	14
1.4	Hipótesis.....	15
2	Antecedentes.....	16
2.1	Los incendios en la región	19
3	Marco teórico	21
3.1	Teledetección	21
3.2	Sensores remotos	22
3.3	Modelaje con los Sistemas de Información Geográfica.....	23
4	Experimentación	28
4.1	Zona de estudio	28
4.2	Equipo y software	29
4.3	Landsat 8.....	29
4.4	Computadora	30
4.5	Google Earth Engine.....	30
4.6	Construcción del modelo SIG.	31
4.7	Procedimiento.....	33
4.7.1	Generación de base de datos incendios históricos	35
4.7.2	FIRMS	35
4.7.3	Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF).	36
4.7.4	Validación polígonos generados	37
4.7.5	Periodo de tiempo seleccionado de estudio.....	38
4.7.6	Obtención de ráster/ post proceso	38
4.7.7	Topográficos.....	39
4.7.8	Ambientales.....	45
4.7.9	Severidad	45
4.7.10	Vegetación.....	51
4.7.11	Climatológicos	53
4.7.12	Antrópicos.....	58
4.8	Mapa de amenaza o peligro.....	64
4.9	Vulnerabilidad	65

4.10	Mapa de riesgo.....	71
5	Resultados.....	73
5.1	Incremento de incendios forestales.....	73
5.2	La severidad de los nuevos incendios.....	74
5.3	Orientación de las laderas	75
5.4	Vegetación.....	76
5.5	Agrícola	77
5.6	Mapa de amenaza	77
5.7	Ubicación de poblados	79
5.8	Modelo multicriterio.	81
6	Discusión	82
6.1	Portales de datos abiertos y la obtención de datos base.....	82
6.2	Imágenes satelitales Landsat 8.....	82
6.3	Google Earth Engine.....	82
6.4	Modelo multicriterio.....	83
6.5	Resolución de información.....	84
7	Recomendaciones	85
8	Conclusión.....	86
9	Referencias bibliográficas	87
10	Anexos	93

Lista de figuras.

Figura 1 Sensores activos y pasivos.....	22
Figura 2 Espectro electromagnético visible para las personas de los rangos de onda.....	22
Figura 3 Satélite Landsat 8 en órbita.....	23
Figura 4 Representación de una suma de distintas capas de rasters.....	24
Figura 5. Ubicación de la zona de estudio.....	28
Figura 6. Fuente para obtener datos de las características del viento en la zona de estudio.	33
Figura 7. Metodología aplicada para el modelo.....	34
Figura 8. Obtención de puntos de calor mediante FIRMS.....	35
Figura 9. Plataforma de Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales.....	36
Figura 10. Datos obtenidos de comparar bases de datos FIRMS y SPPIF.....	37
Figura 11. Polígonos antes y después de corrección manual.....	38
Figura 12. Continuo de elevaciones mexicano para la zona de estudio.....	39
Figura 13. Insumo de elevación.....	41
Figura 14. Ráster de pendiente sin reclasificar.....	42
Figura 15. Insumo de pendiente.....	43
Figura 16. Ráster de aspecto sin reclasificar.....	44
Figura 17. Insumo de aspecto reclasificado.....	45
Figura 18. A) Imagen antes de aplicar el filtro de nubes. B) Misma imagen con filtro de nubes.....	46
Figura 19. Presencia de severidad en zonas destinadas a la agricultura en imágenes y ráster referente a 2016.....	48
Figura 20. Comparación de resolución en severidad Sentinel 2 y Landsat 8.....	48
Figura 21. Presencia de sequía en el periodo correspondiente a 2021.....	49
Figura 22. Ráster de NDVI sin clasificar.....	50
Figura 23. Insumo de NDVI.....	51
Figura 24. Tipo de vegetación sin clasificar.....	52
Figura 25. Insumo de vegetación.....	53
Figura 26. Ráster precipitación interpolado con estaciones.....	54
Figura 27. Insumo de precipitación.....	55
Figura 28. Insumo de temperatura.....	56
Figura 29. Ráster de velocidad de viento sin clasificar.....	57
Figura 30. Insumo de velocidad de viento.....	58
Figura 31. Ráster de cercanía a caminos sin clasificar.....	59
Figura 32. Insumo de distancia a caminos.....	60
Figura 33. Ráster de cercanía a zona agrícola sin clasificar.....	61
Figura 34. Insumo de distancia a zona agrícola.....	62
Figura 35. Ráster de cercanía a poblados sin clasificar.....	63
Figura 36. Insumo de distancia a poblados.....	64
Figura 37. Área de estudio.....	65
Figura 38. Validación de buffer poblados.....	66
Figura 39. Ubicación de poblados respecto a caminos.....	68
Figura 40. Densidad poblacional.....	69
Figura 41. Vulnerabilidad sumada en zona de estudio.....	69
Figura 42. Resiliencia sumada en zona de estudio.....	71

Figura 43. Mapa de riesgo.	72
Figura 44. Aumento de incendios forestales dentro de la SMO.	73
Figura 45. Área afectada periodo 2015-2022.	74
Figura 46. Aumento de la severidad en los incendios forestales a partir del 2015.	74
Figura 47. Orientación de las laderas respecto a incendios pasados.	75
Figura 48. Comparación vegetación quemada años más severos.	77
Figura 49. Modelo multicriterio de peligro.	78
Figura 50. Áreas en peligro.	79
Figura 51. Poblados en zonas de peligro A.	80
Figura 52. Poblados en zonas de peligro B.	80
Figura 53. Acercamiento a las poblaciones en riesgo.	81

Lista de tablas.

Tabla 1. Estadística de incendios del 2008 al 2021.....	20
Tabla 2. Distribución de las bandas OLI y TIRS.....	29
Tabla 3. Características del equipo portátil.....	30
Tabla 4. Clasificación de cada valor de peligro.....	38
Tabla 5. Valores de riesgo por altitud.....	40
Tabla 6. Valores de riesgo por pendiente.....	42
Tabla 7. Valores de peligro por aspecto.....	44
Tabla 8. Rangos de peligro para la reclasificación NDVI.....	51
Tabla 9. Clase de vegetación y su valor de peligro.....	52
Tabla 10. Clasificación de precipitación, rangos y peligro.....	54
Tabla 11. Clasificación de temperatura, rangos y peligro.....	54
Tabla 12. Clasificación de velocidad de viento, rangos y peligro.....	57
Tabla 13. Clasificación de distancia a caminos, rangos y peligro.....	60
Tabla 14. Clasificación de distancia a zonas agrícolas, rangos y peligro.....	61
Tabla 15. Clasificación de distancia a poblados, rangos y peligro.....	63
Tabla 16. Niveles de vulnerabilidad.....	65
Tabla 17. Criterio de vulnerabilidad por ubicación.....	67
Tabla 18. Clasificación por proximidad a caminos.....	67
Tabla 19. Clasificación de resiliencia.....	70

Nomenclatura

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
dNBR	Índice relativo normalizado de áreas quemadas (Relative difference Normalized Burn Ratio)
FIRMS	Fire Information for Resource Management System
GEE	Google Earth Engine
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MCDM	Toma decisiones por criterio múltiple
NDVI	Índice normalizado de vegetación
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SMO	Sierra Madre Oriental
SPPIF	Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales
VANT	Vehículos aéreos no tripulados

1 Introducción

Los incendios forestales representan un elemento transformador de los ecosistemas. Las condiciones climatológicas existentes, como son la elevada sequedad atmosférica, fuertes vientos terrales, escasa precipitación y elevadas temperaturas durante el periodo estival, unido a la presencia de materiales vegetales con altos índices de inflamabilidad podrían facilitar a la aparición y propagación de incendios forestales.

En México, cada año, se registran más de 7 mil incendios forestales, con una afectación promedio de 600 mil hectáreas (CONAFOR, 2021). Hay épocas en las que no se llega a 100 mil hectáreas afectadas y otras en las que se puede subir hasta 1 millón de hectáreas (UNAM, 2021). Se ha observado como la presencia del fenómeno El Niño, es un agente que unido a las sequías presentadas crea las condiciones adecuadas para la propagación de los incendios forestales y con esto su daño se ve incrementado (Burton, C., et al. 2020).

La aparición de incendios forestales genera un impacto en los ecosistemas arrasando con la biodiversidad y generando un cambio en el ciclo ecológico, esto es la consecuencia de la muerte de distintas especies, la erosión del suelo y el desplazamiento de grupos de especies animales (Carrasco, Y., 2019). Por lo tanto, esto genera un riesgo que ya no va solo para los ecosistemas, si no de igual forma para la sociedad que debido a la urbanización se han visto desplazadas a estas áreas en continuo riesgo.

Martin M., Chuvieco E., & Aguado I. ("La incidencia de los incendios forestales en España", 1998) explican que los incendios forestales están ligados a las actividades humanas, y especifican que tan solo en un periodo de 13 años, un 96% de los incendios forestales registrados fueron causados por actividades humanas, las cuales van desde la ganadería, hasta recreación. Donde los locales resultan los más afectados ante estos eventos.

Al ir creciendo los asentamientos humanos, es cada vez más común que la mancha urbana se extienda hasta zonas antes no pobladas. Anteriormente los daños por incendios forestales eran en su mayoría a zonas libres de presencia humana, sin embargo, hoy en día es común que existan construcciones en lugares con frecuentes

incidencias de incendios. Es por esto por lo que es preciso tomar un control para la seguridad de las personas y sus bienes materiales.

Sabemos que ciertos tipos de construcción conllevan riesgos de incendios inherentes, por lo tanto, en zonas donde se construye con material que es inflamable, las construcciones se convierten en carga combustible unida a la carga combustible vegetal y en base a lo anterior si hay un alto número de viviendas con esta condición, mayor será la capacidad de propagación de los incendios en estas comunidades. De igual forma el almacenar materiales como son maderas, plásticos, cartones, etc. puede aportar a la carga de combustible (Moena, R. et al., 2021). Cuando se llegan a cumplir ciertas condiciones los incendios forestales pueden volverse un riesgo significativo. Por lo tanto, al tener condiciones ambientales desfavorables y una mala condición para el pronto acceso a los elementos de auxilio se obtiene un alto número de personas y hogares en riesgo (Moena, G., et al. 2019).

En Australia se presentó el “sábado negro” en la ciudad de Victoria, que resultó en la pérdida de alrededor de 2000 casas y 173 vidas. Y aún similar a esto fue en California en el año 2007, que resultó con la evacuación de 300,000 personas y la pérdida de 2223 casas (Penman T.D. et al, 2014).

Este crecimiento en el número de incendios y en su magnitud afecta a nivel mundial y no deja fuera a distintas regiones de México como se vio anteriormente. En recientes años se ha hecho visible el aumento de incendios forestales y sobre todo su daño en la zona noreste del país, esto al ser una zona semiárida con condiciones que fomentan estos eventos (Garay, R., 2021).

En el caso particular, el estado de Nuevo León que se encuentra situado al noreste de México es una zona predominantemente semiárida, con una vegetación diversa (CONABIO, 2019). Particularmente la zona industrial que en su mayoría es la zona metropolitana, se encuentra ubicada entre un grupo de cadenas montañosas denominada Sierra Madre Oriental (SMO), que sirven como pulmón principal de la población. La acelerada expansión de la mancha urbana ha provocado que las personas se asienten en las faldas de la sierra e incluso dentro de la SMO, lo que los coloca en una situación de riesgo constante ante la presencia regular de los incendios. La continua expansión de la actividad humana ha creado un aumento en el número

de incendios forestales, esto combinado con las variables climatológicas que se han presentado en los recientes años nos dan como resultado un mayor número de incendios forestales, de mayor magnitud e impredecibles en algunos casos (Espinoza, A., 2019). Cuando estos eventos se vuelven hacia zonas pobladas, el peligro se vuelve mayor y cobra más importancia el tomar medidas tempranas. Estos eventos pueden llegar a generar daños más allá de lo ambiental, golpeando los factores sociales y económicos al comprometer el patrimonio de los pobladores (Misacango, T., 2022).

Los incendios pueden destruir casas, autos, ganado, etc. Tan solo en 2021 se vieron afectadas 32,794 hectáreas en el territorio nacional (SEMARNAT, 2021) esto se debió a la combinación de variables climáticas que hicieron que fuera complicado el control de los incendios en la región. Las variables de cambio climático, ambientales, topografía, la vegetación y los factores sociales los hacen más comunes y cada vez más intensos, y vuelve el hecho de tratarlos un tema de gran importancia para la sociedad.

El periodo de tiempo donde más incidencia de incendios forestales se registran comúnmente en Nuevo León, son en los meses que van de febrero a mayo (CONAFOR, 2012), sin embargo, se ha observado que la temporada de incendios forestales en el estado se toma desde el mes de enero hasta agosto (Protección Civil de Nuevo León, 2022).

1.1 Justificación

El uso de imágenes satelitales para crear una base de datos enfocado en la actividad humana y la mancha urbana permitirá tener un conocimiento previo de las zonas con mayor índice de riesgo y con esta información proponer modelos de acciones en casos de incendios forestales y/o el uso de acciones de prevención, como estructuras de resistencia al fuego o estaciones de pronta respuesta. Y con la base de datos se podrá desarrollar un modelo de riesgos que sirva para ubicar zonas de especial cuidado.

Al tener una evaluación de la severidad de los daños en incendios previos, y tener el modelo de riesgo se le puede dar un mejor seguimiento a las áreas previamente afectadas y mediante rastreos con el uso de imágenes satelitales ver cómo se han recuperado las zonas tanto de vegetación como de población.

Conociendo estos factores, se puede diseñar un protocolo de construcción en zonas de alto riesgo, que oriente a los constructores en qué manera es más seguro construir teniendo en cuenta los factores ambientales, topográficos y sociales que rodean a la zona de desarrollo urbanístico.

1.2 Objetivo general

- Identificar zonas de riesgo a incendios forestales dentro de la Sierra Madre Oriental que pongan en riesgo a las poblaciones e infraestructura de las zonas urbanas, tomando en cuenta variables topográficas, ambientales y antrópicas, haciendo uso de los sistemas de información geográfica, y analizarlas en un modelo con base SIG para así proponer acciones preventivas ante estos eventos.

1.3 Objetivos particulares

- Ubicar las zonas donde se han presentado incendios de mayor magnitud dentro de la Sierra Madre Oriental.
- Crear un modelo multicriterio de riesgo por incendios forestales.
- Identificar las áreas urbanizadas que se encuentran en zonas de riesgo a los incendios forestales.

1.4 Hipótesis

Mediante un SIG se puede generar un modelo multicriterio para la identificar las zonas en riesgo a incendios forestales y evaluar los poblados dentro de la Sierra Madre Oriental que se encuentran en riesgo utilizando imágenes satelitales Landsat 8.

2 Antecedentes

Por definición, el riesgo es una combinación de la probabilidad de que un evento ocurra y las consecuencias negativas que dicho evento generaría a la población vulnerable. Esto puede ser una limitante a la sustentabilidad que busca tener el desarrollo humano, pues se encuentra ligado directamente al nivel de vulnerabilidad de una población, así como a la exposición de estas a los eventos (González, E., & Maldonado, A., 2017). Además, se unen factores que hacen que este valor de riesgo tome su significado, como lo son la vulnerabilidad de las poblaciones, y las amenazas. Donde la vulnerabilidad poblacional se define como un grupo de personas que se encuentran en desprotección o incapacidad ante a una amenaza debido a su condición física, socioeconómica, psicológica, entre otros.

Hoy en día es más común ver los efectos del cambio climático en el número de incendios forestales que va en aumento. Actualmente es cada vez más común que se presenten prolongadas temporadas de sequías combinadas con altas temperaturas, que generan actividades incendiarias cada vez más agresivas (Sulova, A., 2020). La presencia de incendios forestales que se salen de control es cada vez más común, y con las zonas urbanizadas cada día creciendo más, es común ver que hay áreas donde el fuego alcanzó a generar daños en algún sector de la población como las casas o negocios.

Castellnou et al., 2005 dividen los incendios forestales en cuatro generaciones, donde la primera generación se caracteriza por ser incendios de gran magnitud, debido a una gran disponibilidad de material combustible. La segunda generación es debido a un cambio de uso de suelo donde hay campos de cultivo abandonados y se caracterizan por ser incendios más fuertes y rápidos. Y la tercera generación son incendios pasivos, pero de gran intensidad y que son incendios inalcanzables para cualquier tipo de método de ataque para su sofocación.

Esto da paso a la cuarta generación, que son incendios forestales donde la fuente combustible no es solo el material forestal, sino también las urbanizaciones. Estos incendios avanzan consumiendo material forestal, jardines domésticos y estructuras a su paso, lo que los hace aún más complicados de trabajar.

Los incendios forestales frecuentemente queman casas en las zonas de interfaz entre tierra salvaje-urbana y esto lo hace más complicado de combatir (Radeloff, V. et al., 2017). En los últimos años se han desarrollado modelos para medir la severidad y la susceptibilidad a los incendios forestales con herramientas como Google Earth Engine, cómo se presenta en “Un enfoque de Google Earth Engine para la susceptibilidad a los incendios forestales Fusión de Predicción con Datos de Teledetección de Diferentes Resoluciones espaciales” (Tavakkoli S. et al., 2022). Para identificar las zonas donde se presentaron los incendios históricos Tavakkoli, (2022) hacen uso de imágenes de un espectrómetro de media resolución (por sus siglas en inglés MODIS) para detectar las anomalías térmicas y ubicarlas mediante un sistema de posicionamiento global (por sus siglas en inglés GPS) y coleccionar datos históricos, en base a estos analizan las condiciones que incrementan el riesgo y la fuerza de los incendios. Estas condiciones se separan en cuatro grupos que son la topografía, datos meteorológicos, vegetación, y los factores antrópicos.

Los primeros factores que se tienen en cuenta al momento de valorar el riesgo de incendios forestales son aquellos que no cambian o lo hacen con lentitud. A estos factores, también llamados factores estructurales de riesgo (Chuvieco et al., 1999) son los que tienen un impacto primario en la probabilidad de que se inicie un fuego y determina en gran medida su comportamiento (Vicente F., 2012). En su estudio Simental, J. & Pompa, M., (2016) abordan como la topografía tiene una correlación con la temporalidad de los incendios forestales, y destacan como los factores que se derivan de esta variable como son la altitud, pendiente y aspecto, afectan el desarrollo de los incendios forestales. En su estudio Wong, (2006) hace referencia a como la orientación de las laderas o aspecto es un factor condicional para la humedad relativa del combustible, pues a medida que avanza el día, según es esta orientación y la temperatura aumenta, las laderas orientadas al norte serán más húmedas en un periodo del día y las laderas al sur cuentan con un valor menor de humedad.

Ramos M. et al., (2017) explica que comprender la relación que hay entre los incendios forestales y las variables meteorológicas es importante con vistas a la gestión de actividades del manejo del fuego dentro de límites económicamente viables, socialmente aceptables y ecológicamente apropiados. Entre las importantes en la presencia de incendios forestales, están las variables meteorológicas. Soares &

Batista, (2007) dicen que factores como los meteorológicos se encuentran ligados a la posibilidad y la frecuencia de que se presenten los incendios forestales. Esto debido a que las condiciones como temperatura y precipitación condicionan la calidad del material combustible y en base a estas variables se puede identificar días y épocas de mayor probabilidad de que se presenten incendios (Ramos, M. et al., 2017).

Los factores antrópicos son aquellos donde interviene el humano para la iniciación de los incendios, ya sea por motivos intencionados o no intencionados (AQUA Fundación). Estos se presentan de distintas maneras, pero tienen en común que al presentarse tienden a aumentar el riesgo de ignición de incendios forestales. Chuvieco, E., (2007) señala que aquellos factores que se vinculen a algún tipo de actividad humana tienen especial una especial relevancia en la cuantificación del riesgo por incendios forestales.

Al integrar la interacción de la población en las áreas donde se proyectan incendios, se tiene un alto riesgo y es aquí donde se busca actuar. Según el estudio de R. Sadasivun, W.H. Cooke., S. Bhushan., (2012) hay patrones de asentamiento humano que pueden predecir los potenciales incendios forestales; en este crean un modelo de densidad para evaluar el riesgo de incendios en base a la densidad de combustible y a la interacción poblacional. Al trabajar con los factores de asentamiento humano, se puede proponer un valor de riesgo por población, que se deberá asignar manualmente. Este valor al ser una variable en constante cambio, es necesario validarla en la mayoría de los casos, como explica Muñoz C., Treviño E., Verastegui j., Jimenez J., & Aguirre O., (2013). Los autores resaltan que, al hablar de la actividad humana, siempre existirá una gran incertidumbre respecto al riesgo de incendios, y puntúan que como puntos de riesgo agregados a la presencia de los asentamientos humanos se debe tener importante cuidado en las distancias a carreteras, a ciudades, los tipos de propiedades y el valor comercial que tiene la masa forestal. Por tanto, proponen que se haga una evaluación en sitio acerca de los factores mostrados anteriormente.

Muñoz C., (2003) propone un modelo donde este busca una correlación al usar los componentes meteorológicos y antropogénicos, donde este destaca las actividades agropecuarias, la infraestructura de caminos, cercanía a poblados, orientación de la pendiente, precipitación pluvial y temperatura, también

complementando estas variables con la variable de la carga de combustibles. Sin embargo, resalta que es necesaria la incorporación de nuevas variables con datos que aumenten la confiabilidad de los resultados cartográficos.

En su estudio Vicente F., (2012) señala que el riesgo se puede dividir en dos formas, que son el peligro y la vulnerabilidad. En su modelo de riesgo este destaca el uso de las variables en el ámbito forestal dejando de lado las variables que involucran la interacción de los asentamientos humanos, las variables meteorológicas y climatológicas. En su literatura menciona como el conocimiento de estas zonas de riesgo ayudan a mejorar la toma de decisiones en cuanto a medios de vigilancia como pueden ser estaciones de vigilancia o vigilancia móvil.

La creación de nuevas tácticas de ataque a incendios forestales y medidas de precaución bien implementadas, podrían ser de gran ayuda, evitando así la pérdida de vidas humanas, tanto de rescatistas como de los mismos pobladores. Frank Brannigan, (2016) comenta que los edificios son uno de los principales enemigos de los cuerpos contra incendios; debido a estos es necesario tener un control exhaustivo en la forma que serán construidos dichos edificios, para así tener un conocimiento previo de cómo se desarrollarían los eventos en caso de existir. “fire fighter nation” comenta en su artículo “entendiendo cómo afecta el fuego a la construcción moderna” que las nuevas construcciones requieren nuevas tácticas de defensa en presencia de eventos como los presentados en California en el año 2007.

La resiliencia es definida como la capacidad que tienen las comunidades o poblados para prepararse, resistir y recuperarse ante la presencia de un evento natural, como incendios forestales, huracanes, terremotos, etc. Al hablar de estos eventos se deben tener en cuenta las distintas medidas tanto preventivas como de acción inmediata que aseguren la capacidad de salvaguardar el bienestar de la población, así como tener en cuenta la recuperación de estos lugares. En la revista “disaster prevention and management” Goh, K. S., & Yeo, P. L., (2002) explican que, para la correcta gestión de los riesgos ante desastres naturales la resiliencia es un concepto de gran importancia, pues en base a esta se rigen las capacidades de adaptarse a los eventos y recuperarse del paso de estos. Argumentan la importancia que tiene esta de mejorar ante el paso de eventos mediante medidas preventivas y recuperativas, y como al contar con estas medidas se tiene una menor vulnerabilidad.

2.1 Los incendios en la región

Con el paso del tiempo y la actuación del ser humano cada vez más presente en zonas altas de la Sierra Madre Oriental se ha hecho notorio el aumento del número de incendios forestales como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estadística de incendios del 2008 al 2021. Fuente: CONAFOR 2022.

Año	Número de incendios	Superficie afectada (Ha)
2008	51	4,904.64
2009	75	3,090.77
2010	30	613.18
2011	98	17,935.42
2012	53	289.36
2013	30	583.00
2014	13	154.00
2015	13	81.00
2016	54	1,191.85
2017	47	733.50
2018	44	700.00
2019	42	946.00
2020	44	1,453.00
2021	51	32,794.96

Ciertas zonas que cumplen con un grupo de características son más propensas a presentar incendios forestales, como lo son las zonas montañosas de Nuevo León (Protección civil de Nuevo León, 2021).

3 Marco teórico

3.1 Teledetección

La teledetección se define como la técnica para adquirir datos de la superficie de la tierra mediante sensores que operan desde plataformas espaciales. Esto debido a que la interacción que existe entre el terreno a monitorear y el sensor generan una serie de datos que son procesados para posteriormente obtener datos sobre la tierra que nos arrojan información importante (Instituto Geográfico Nacional, Madrid España, 2019).

Las herramientas destinadas a la teledetección han cobrado una gran fuerza con el paso del tiempo. A partir de que se lanzó el primer satélite de observación de la tierra que fue puesto en órbita en 1972 por los Estados Unidos de América y el desarrollo constante de las tecnologías que hacen cada vez más accesible el trabajo de la información satelital, se han ido desarrollando modelos y herramientas para la aplicación de la teledetección en un amplio campo de distintas profesiones.

Por lo tanto, la teledetección nos permite obtener información vital de zonas remotas, con datos superficiales sin necesidad de mantener contacto directo con los elementos a estudiar, proporcionando así un gran número de aplicaciones como son: la agricultura, monitoreo de volcanes, sistemas de protección ambiental (Sacristan, F., 2006, Mireles, S., 2021), incendios forestales (Chuvienco, E., 2007), etc.

La teledetección puede ser de dos formas, pasiva o activa, siendo la pasiva aquella que solo es unidireccional y ofrece sólo la información que el elemento proporcione por sí mismo como pueden ser grandes eventos como huracanes, incendios, erupciones volcánicas, etc. Por el contrario, está la teledetección activa, que se basa en irradiar la zona terrestre u objeto que se busca conocer sus características, esta ofrece como ventaja el control de la radiación electromagnética dependiendo de cuál sea su aplicación y así evitar depender únicamente de la iluminación natural (Figura 1).

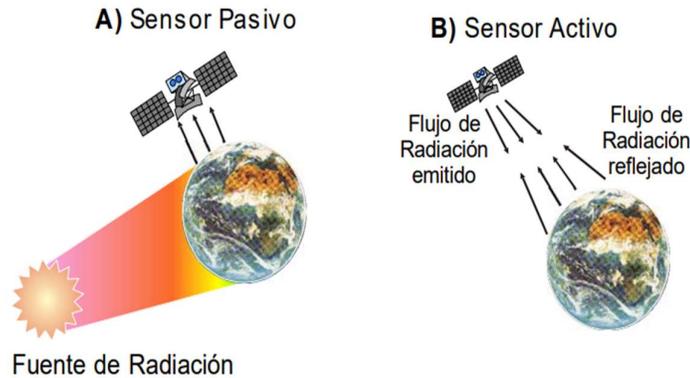


Figura 1 Sensores activos y pasivos. Fuente: Pérez, D., 2007.

3.2. Sensores remotos

Los elementos usados para llevar a cabo la teledetección son también llamados sensores de percepción remota, que por definición es un aparato por el cual se obtiene información de un objeto, área o fenómeno sin tener contacto físico con este. Por lo tanto, se considera a elementos como la audición, la visión y el olfato sensores de percepción remota (Tamez, A., 2019).

Estos equipos hacen uso de la radiación electromagnética, esta es generada, propagada y modificada (Pérez, D., 2007). Los seres humanos estamos expuestos a esta radiación todo el tiempo, pero solo somos capaces de observar un pequeño rango de ondas que hacen referencia al espectro visible que va de 0.4 micrones a 0.7 micrones como se muestra en la Figura 2.

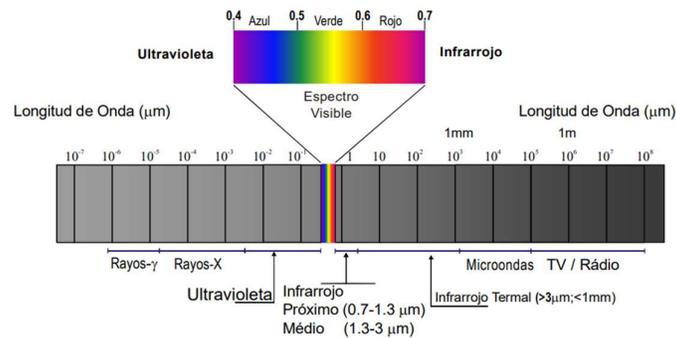


Figura 2 Espectro electromagnético visible para las personas de los rangos de onda. Fuente: Pérez, D., 2007

Al trabajar con áreas de grandes dimensiones se busca obtener bases de datos lo más confiable que sean posibles con sensores remotos, y para esto se hace

aplicación de satélites que nos ofrecen imágenes de zonas amplias con distintas características de las áreas captadas.

Un ejemplo de estos son los satélites del programa Landsat, como es el satélite Landsat 8 que ofrece imágenes satelitales con una resolución a 30 metros por píxel y con un total de 11 bandas.

3.3. Modelaje con los Sistemas de Información Geográfica.

Con la presencia de nuevos retos para las personas, también se ha implementado el uso de nuevas herramientas para los riesgos ambientales y la gestión de toma de medidas (Muñoz, C., 2003).

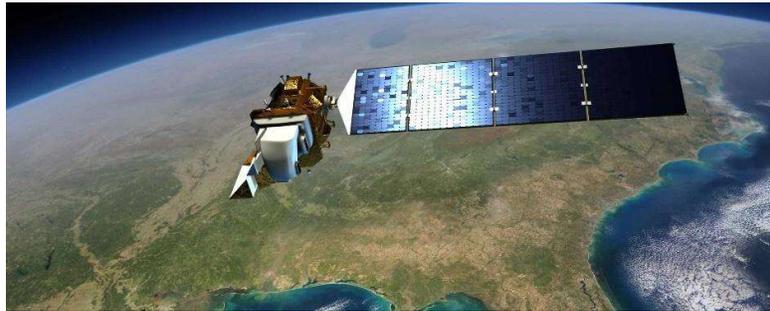


Figura 3 Satélite Landsat 8 en órbita.

Fuente: National Aeronautics and Space Administration

Al hacer uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) logramos obtener, procesar y analizar un amplio número de datos, con los cuales podemos obtener distinta información que nos ayuda a cumplir y satisfacer las necesidades que la sociedad actual tiene. Una aplicación que se le da es en el modelaje, como es el caso de los Modelos de toma de decisión con criterios múltiple (MCDM por sus siglas en ingles) que pondera variables mediante una combinación de técnicas, procedimientos y algoritmos, para evaluar problemas de decisión y evaluar soluciones alternativas (Mireles, D., 2021). Combinando esta técnica con las herramientas SIG obtenemos una gama muy amplia de aplicaciones en el análisis de datos espaciales y la toma de decisiones (Simental, J. & Pompa, M. 2016; Malparida, R., 2016; Vicente, F., 2012;).

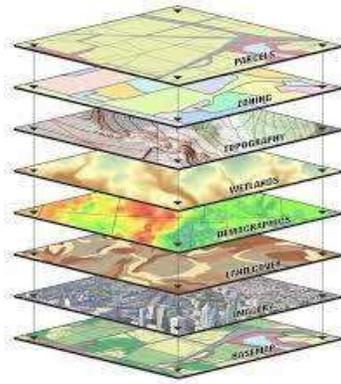


Figura 4 Representación de una suma de distintas capas de rasters.

Fuente: www.turfimage.com

Los análisis multicriterio para el ámbito de incendios forestales se han aplicado en diferentes medidas para obtener el riesgo de estos eventos en distintas zonas, donde se hace uso de distintas variables según sea el enfoque que se busca acentuar. En un primer ejemplo Vicente Francisco, (2012) aplica un modelo multicriterio donde divide los factores actuantes en vulnerabilidad y peligro. Aplica un modelo enfocado en comportamientos más constantes o que cambian en periodos muy amplios que por tanto no necesitan una actualización constante, y criterios que son de periodos más cortos como son las condiciones climatológicas. Por lo tanto, divide su estudio en dos factores: riesgo dinámico y riesgo estructural. En esta literatura acentúa el ámbito forestal y la automatización de los modelos multicriterio.

Otros autores usan los modelos multicriterio para evaluar riesgo de incendios forestales mediante los datos meteorológicos y antropogénicos. En estos se hace especial mención de las actividades humanas como principal factor de riesgo de ignición.

Los incendios forestales

Los bosques son el ecosistema terrestre con una mayor extensión llegando a ocupar hasta un 30 % de la superficie terrestre (FAO, 2007). El valor de los bosques radica en su valor ambiental, como función en captación de dióxido de carbono, ciclo hidrológico y la biodiversidad, sirviendo también como un protector del suelo, permitiendo la conservación de biodiversidad y el correcto funcionamiento de la cuenca hidrológica. El crecimiento de la población ha provocado que cada vez las

zonas urbanas se adentren en áreas donde antes no existía presencia humana y el interés turístico ha causado un cambio de giro de uso de suelo, abriendo camino a zonas que son usadas como lugares turísticos que crean las denominadas zonas de transición de “zona salvaje-urbana”.

Las zonas de transición son lugares donde las casas se encuentran dentro o alrededor de zonas de vegetación salvaje (Radeloff V., 2018). Estas zonas son lugares que se encuentran en continuo cambio, pues la población tiende a subir y bajar respecto a las condiciones. La masa de las poblaciones generalmente se encuentra dentro de la masa boscosa. Con esto se hace un alto riesgo de la presencia de incendios forestales.

Los incendios forestales son fenómeno de la naturaleza que tiene como principal función regular y mantener un equilibrio natural en un medio, pueden ser agentes destructivos y a la vez son un factor positivo que constituyen al establecimiento y desarrollo de la vegetación forestal (Oliver y Larson, 1996). Donde su incidencia y magnitud se rige en base a tres variables fundamentales; condiciones ambientales, volumen de masa combustible y una fuente de ignición.

Los factores ambientales son a gran medida los que rigen el comportamiento de los incendios, entre estos están la temperatura ambiental, la humedad relativa, la dirección y la velocidad del viento (Delgadillo, J., 2014). Estas tienen un impacto directo en factores como la intensidad o la velocidad de propagación. La presencia de baja precipitación combinado a las altas temperaturas provoca un estrés hídrico que se hace más notorio durante las épocas de verano. La topografía del terreno es de gran importancia pues afecta directamente en la ocurrencia y la propagación pues tiene un impacto directo en el clima y el tipo de vegetación que se encuentre en la zona (Aguado I., 1998). El tipo de vegetación en la zona es de importancia debido a que esto rige que tan fácil es que se propaguen los incendios, pues resulta más fácil que material de baja densidad como los bosques de pinos ardan y por ende se propaguen los incendios a través de ellos (Vicente, F., 2012).

Se necesita una fuente de ignición que es energía en forma de calor que provoca a los materiales llegar a su temperatura de ignición, que generalmente son circunstancias inusuales (RIMAC). El tema de incendios forestales tomó importancia

para los ingenieros civiles al percibir la pérdida de estructuras que, en algunos de manera inadecuada, se encuentran dentro de las zonas de transición trayendo consecuencias ambientales, económicas y sociales.

Los incendios dejan de tener una función natural y regulatoria cuando son provocados por actividades como las actividades humanas que son por antecedentes más dañinos que los incendios formados de forma natural. En solución a estos efectos distintos cuerpos de control forestal han desarrollado métodos para clasificar la severidad en presencia de incendios forestales.

La severidad por incendios forestales es el daño que provoca el fuego en el suelo y en la vegetación (Potvin, D. et al., 2009). Este valor se mide mediante la medición de la pérdida de elementos como la vegetación y la pérdida de la materia orgánica que está en el suelo y aunado a esto se agrega la información de los sensores remotos para índices de vegetación que nos aportan información del área quemada, pero deben ser calibrados para los valores requeridos del área.

Los incendios forestales se pueden atribuir a distintas causas, sin embargo, en los últimos años los causados por acciones humanas tienden a ser más severos y con esto trae más daños como pérdidas económicas y daños ambientales.

Prevenir estos incendios se vuelve cada vez más importante, pero con el crecimiento de la población también se vuelven más común las prácticas como quemas de basura, desmonte por medios incendiarios, pirotecnia, camping, etc. Y esto lleva a buscar medidas preventivas y de acción. Sin embargo, las medidas actuales son solo para daños ya vistos por incendios anteriores, y sin atender factores que aún no suceden, pero podrían ocurrir.

Las pérdidas humanas y económicas se pueden reducir si se toma en cuenta un protocolo que contribuya a los métodos constructivos y reglamentos forestales que sean aplicables a las zonas de alto riesgo, y atendiendo a los valores de severidad vistos en anteriores fenómenos. Un buen diseño en la prevención, no solo para evitar el daño forestal, si no el daño a las poblaciones generaría tiempo para que las personas actúen en una zona segura y con esto combatir distintos incendios dependiendo de su magnitud, severidad e intensidad.

En la actualidad se observa que los incendios forestales ya no solo afectan a bosques, viviendas y algunas estructuras, si no que se propagan a través de las urbanizaciones a su paso, retrasado con esto la lucha por controlar los incendios y poniendo en peligro la vida de bomberos y rescatistas, provocando distintas emergencias (Castellnou M., 2003).

Estas zonas que se encuentran bajo amenaza de incendios generalmente presentan características que hacen que se diferencien a otras áreas que, aunque se encuentren en una zona de amenaza sus condiciones sociales los vuelven más vulnerables a estos desastres naturales.

4 Experimentación

4.1 Zona de estudio

La zona de estudio fue elegida por la importancia que representa para Monterrey y su área metropolitana. Monterrey es conocida como la ciudad de las montañas, con una superficie de 578 km² (INEGI, 2021), se encuentra envuelta por las faldas de la Sierra Madre Oriental, Cerro de la Silla, Cerro de las Mitras, Cerro del Topo chico y aunque en menores dimensiones, pero igualmente presionados por el desarrollo urbano los lomeríos del Cerro de las Águilas, la Loma Larga y algunas crestas menores en el área sur. El área de estudio para este trabajo se ubicó en la zona de la Sierra Madre Oriental, abarcando un área total de 39950.32 km² que abarca parte de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Esta área se delimitó a partir de la cota 1339, teniendo como límite el sur de los tres estados anteriormente mencionados.

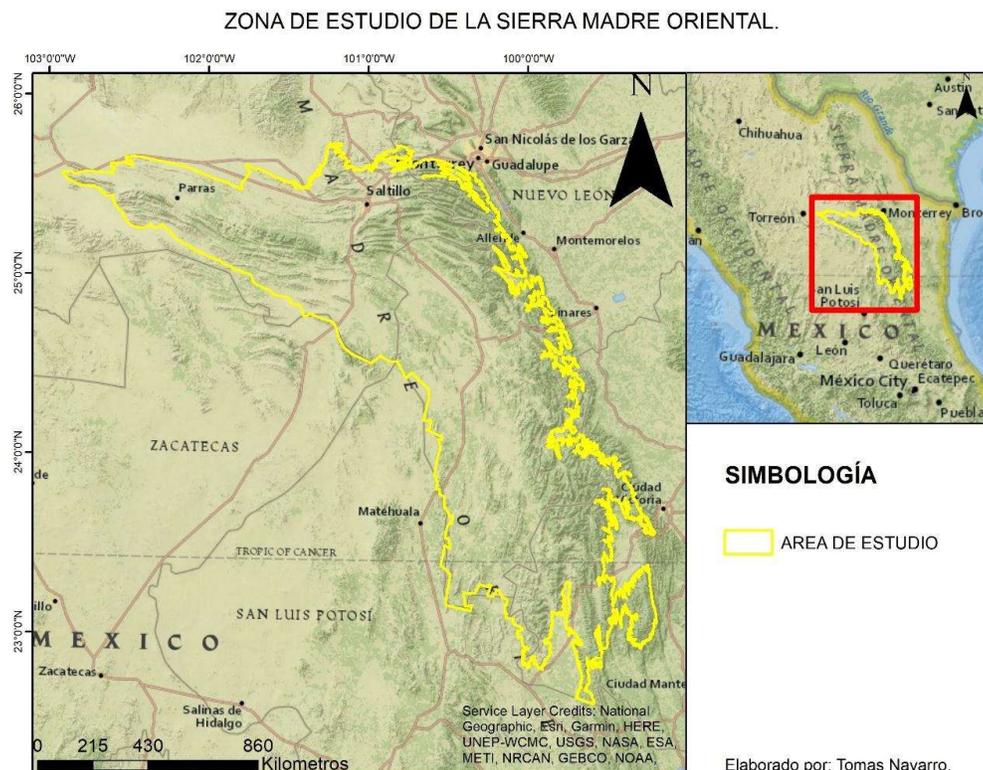


Figura 5. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Esta área fue elegida mediante un reconocimiento visual de la ubicación de los incendios forestales de importancia que fueron registrados en los últimos 8 años por la CONAFOR, seleccionando los de mayor área; Mediante una base de datos se ubicaron los lugares donde se presentó mayor daño y se tomaron como guía para delimitar esta área.

4.2 Equipo y software

Los efectos de la resolución espacial de los datos de teledetección en la susceptibilidad a los incendios forestales la predicción no se entiende completamente (Tavakkoli et. al., 2022). Para el estudio serán utilizadas las bases de datos de imágenes satelitales de alta y mediana resolución, así como datos puntuales como se describe a continuación.

4.3 Landsat 8

Se utilizaron imágenes Landsat 8, que cuenta con una resolución espacial de 30 metros. Este consta de 11 bandas, de las cuales 9 son espectrales con una resolución de 30 metros, una banda pancromática con resolución de 15 metros y dos bandas enfocadas a la temperatura con resolución de 100 metros. Para esta práctica se utilizaron los datos de las bandas 5 (infrarrojo cercano) y banda 7 (infrarrojo de onda corta). Las imágenes ofrecidas individualmente alcanzan una longitud de 170 km de norte-sur por 180 de este a oeste (Ariza, A. 2013. *Productos LDCM-Landsat 8.*).

Tabla 2. Distribución de las bandas OLI y TIRS (USGS 2013).

	bandas	longitud de onda (micrómetros)	resolución (metros)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30

and Thermal Infrared Sensor (TIRS) febrero 11,2013	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

4.4 Computadora

El procesamiento de los datos se realizó en un computador portátil con las siguientes características.

Tabla 3. Características del equipo portátil.

Características del equipo	
Marca	Acer
Modelo	AN515-52-56HV
Procesador	Intel Core i5-8300H@ 2.30GHz
RAM instalada	12 Gb
Sistema operativo	Windows 11
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits.
Capacidad	1 Tb.

4.5 Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) es un catálogo de datos públicos de varios petabytes que utiliza datos geoespaciales y de teledetección. Google Earth Engine contiene particularmente imágenes de la superficie terrestre captadas por los satélites Landsat y Sentinel. También contiene otros conjuntos de datos sobre la cobertura del suelo, así como conjuntos de datos ambientales y relacionados con el clima. La colección se actualiza constantemente a un ritmo de casi 6000 escenas de satélite por día desde diferentes sensores, generalmente proporcionados dentro de las 24 h desde el momento de la adquisición de la escena. Los usuarios pueden agregar nuevos conjuntos de datos al GEE desde el catálogo público o agregar su propio conjunto de datos para el análisis adicional utilizando la interfaz REST. De esta manera, la computación de alto rendimiento sea posible para usuarios comunes, junto con cálculos basados en la nube para grandes petabytes de capacidad de datos (Loveland y Dwyer, 2012). Los datos satelitales se han puesto a disposición de forma gratuita con cobertura mundial, principalmente datos geoespaciales y de detección remota a través de varias agencias como la NASA, los EE. UU. Servicio Geológico, NOAA, Agencia Espacial Europea, y otros. Este fuerte incremento en la disponibilidad de datos de teledetección de cobertura mundial va acompañado del desarrollo de numerosas herramientas precisas para procesar los datos geoespaciales y de teledetección. Con todos los datos fácilmente accesibles de numerosas fuentes, estos recursos son cautivadores, pero aún implica esfuerzo y competencia técnica para obtener resultados significativos y valiosos.

4.6 Construcción del modelo SIG.

Para la conformación del modelo SIG y el análisis de sus factores de zonificación de niveles de riesgo ante la presencia de incendios forestales será utilizada la herramienta 3D Analyst de ArcMap (ArcGis 10.8, ESRI). Para esto se aplicarán distintos mapas temáticos que serán sobrepuestos que estén involucrados en los incendios forestales, para este caso particular se utilizaran los siguientes: 1) Factores ambientales (índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), precipitación y temperatura, cobertura del suelo, la distancia a los ríos, la velocidad y dirección del viento), 2) Factores topográficos (pendiente, elevación, aspecto) y 3) Factores antrópicos (distancia a las carreteras, la densidad de los poblados y uso de suelo). Cada uno de los factores a tomar en cuenta será clasificado

en un rango del 1 al 5, en donde 1 será el nivel de riesgo más bajo y el 5 el nivel de riesgo más alto al que se presente la zona ante el riesgo de incendios forestales. Todos los valores tendrán el mismo peso dentro del modelo, dando así la oportunidad de hacer uso del álgebra de rasters como una fórmula algebraica que se aplicará a los rasters en cuestión. Los valores que finalmente se otorguen serán reclasificados para así obtener la ponderación final del modelo.

La cobertura del suelo será derivada del geoportal de CONABIO con una escala 1:250000 y será procesada en el software ArcGIS. De este mismo se derivaron insumos de actividades antrópicas. Para obtener los valores de índice de vegetación normalizada (NDVI) se hará uso de la plataforma google earth engine, que, mediante imágenes satelitales de Landsat 8 se creará un mosaico respectivo a la zona de estudio y se utilizará un periodo de tiempo de un año, recordando que esta es una variable de periodo corto, por lo tanto, se puede sustituir en cualquier momento para modificar sus resultados.

Las características topográficas, como la pendiente y el aspecto, se pueden obtener a partir de un modelo de elevación (DEM por sus siglas en inglés). Además, la precisión del modelado y el mapeo de la susceptibilidad a los incendios forestales depende en gran medida del tamaño de las áreas quemadas existentes. Además, como estamos usando puntos del sistema de posicionamiento global (GPS) para entrenamiento y procesos de evaluación de precisión, la resolución DEM adecuada es un requisito previo en el modelado y mapeo de la susceptibilidad a los incendios forestales.

De igual manera, los puntos de inventario de áreas quemadas son importantes. La selección de resoluciones espaciales apropiadas se aborda cada vez más en la literatura de Schlögel, R et al., 2018; Tian et al, 2008 y Avand et al., 2022. Sin embargo, el desafío de representar adecuadamente las ubicaciones de peligro mediante una característica puntual como inventario junto con datos de imagen y ráster para entrenar o probar los modelos necesita ser investigado en mayor detalle. Por este motivo se realizó un inventario de los últimos 8 años (2015 – 2021) de incendios forestales y así detectar las cicatrices en las zonas afectadas.

Los insumos con menor resolución son los obtenidos del Global Wind Atlas como es la velocidad media del viento. Esta es una plataforma de datos abiertos que facilita la toma de datos, teniendo en cuenta zonas amplias. Cuenta con una interfaz fácil de usar con distintas aplicaciones (Figura 6).

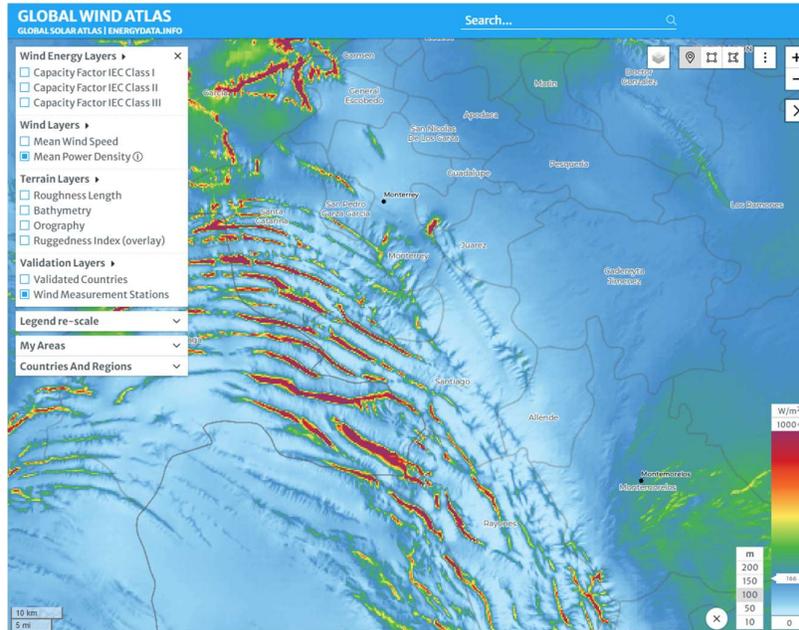


Figura 6. Fuente para obtener datos de las características del viento en la zona de estudio.

Fuente: Global Wind Atlas.

4.7 Procedimiento

Para llevar a cabo este proyecto será necesario separar las tareas en tres fases. 1) generación de base de datos. Esto mediante el uso de FIRMS y el SPIF de la CONAFOR, a partir del año 2015. 2) obtención rasters. Generar los insumos y creación de los ráster, así como su reclasificación para su post procesamiento con álgebra de rasters. 3) obtención y análisis de resultados. La metodología se puede observar en la Figura 7.

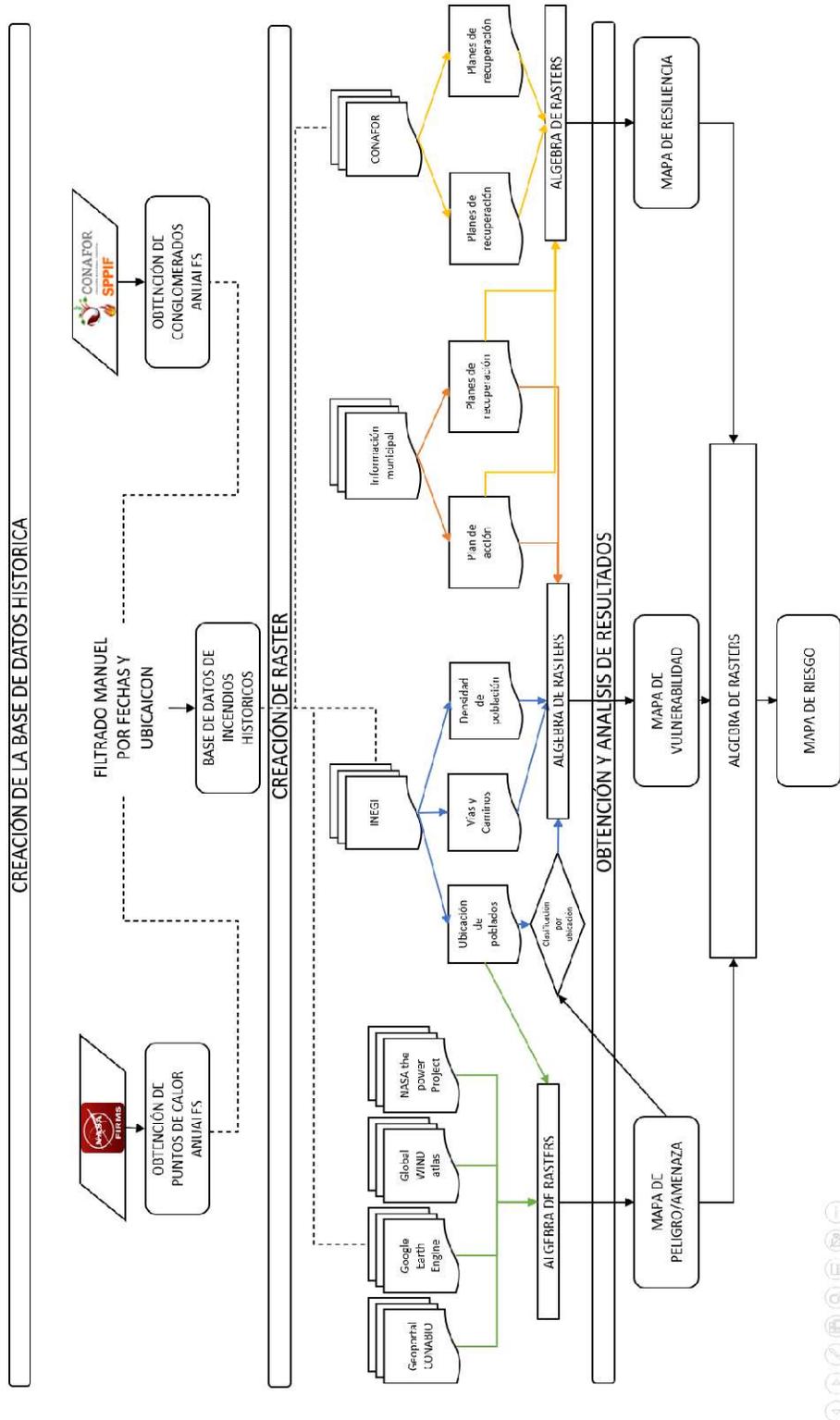


Figura 7. Metodología aplicada para el modelo.

4.7.1 Generación de base de datos incendios históricos

Para la creación de la base de datos se obtuvieron los puntos de calor anuales captados mediante la plataforma de la NASA “Fires Information for Resource Management System”. Esta hace uso de imágenes espectro radiómetro de imágenes de media resolución (MODIS, por sus siglas en inglés). Estas imágenes tienen una resolución de 500 metros por lo tanto sus datos pueden estar sesgados por la detección de otros puntos de calor que no sean incendios forestales. Para evitar esto se hizo una corroboración con los datos de Incendios forestales que ofrece el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF).

4.7.2 FIRMS

Los puntos de calor se descargaron dentro de la plataforma FIRMS de forma anual en archivo CSV (archivo Excel) y se georreferenciaron en el software ArcGIS, teniendo como datos fuente un total de 8 años de estudio.

Al obtener estos datos se generaba un mapa de todos los puntos de calor que se detectaron dentro de la República Mexicana, por lo tanto, fue necesario filtrar estos datos mediante la aplicación ArcGIS para que los puntos de calor correspondiesen a la zona de estudio. Estos datos nos ofrecen fecha y hora en la que se detectó el evento, así como los datos de georreferencia como son las coordenadas.

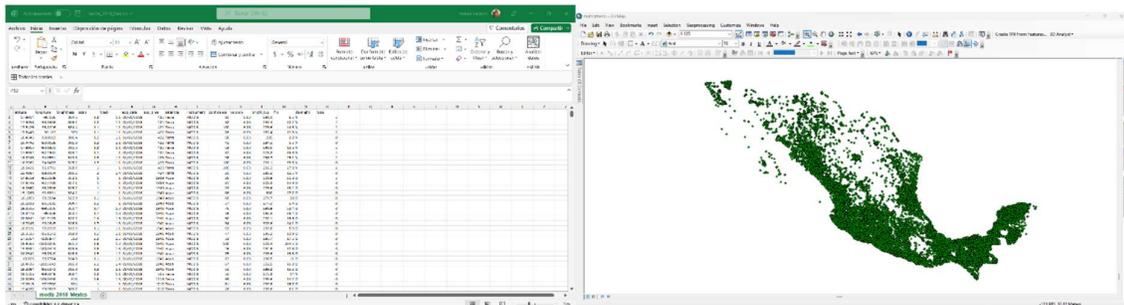


Figura 8. Obtención de puntos de calor mediante FIRMS.

Los datos son generados por el satélite MODIS que se subdivide en imágenes “aqua” y “terra”. Cuenta con una resolución de 1000 metros en sus bandas 24 y 25,

que son las que usa para el uso de temperatura y son usados para detectar los puntos de calor.

4.7.3 Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF).

Para corroborar que los puntos registrados correspondiesen a las zonas que se deseaban estudiar se hizo uso de la plataforma SPPIF que de igual forma trabaja con imágenes MODIS, pero CONAFOR ofrece los datos de conglomerados históricos, que son polígonos de incendios forestales ya registrados en un periodo anual.

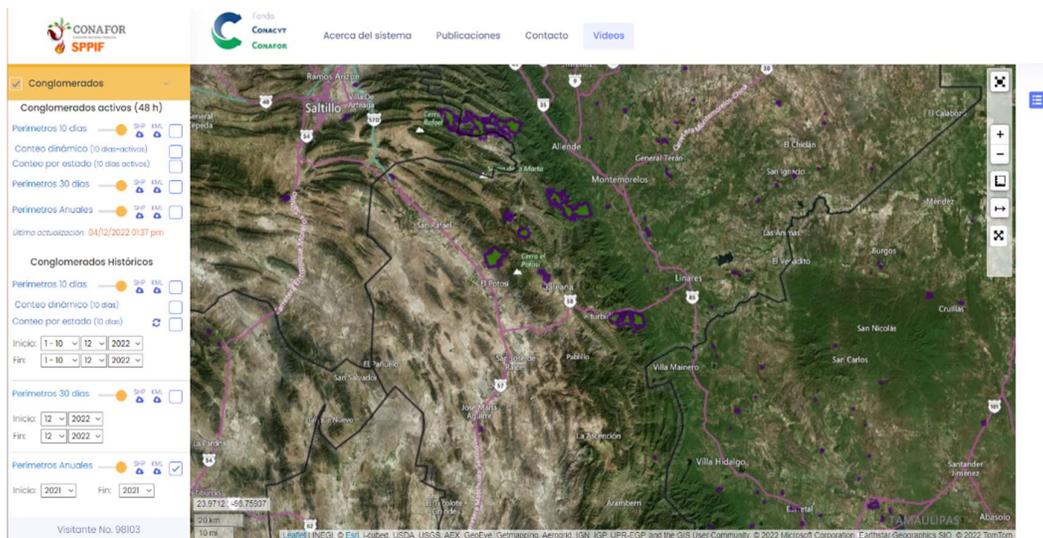


Figura 9. Plataforma de Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales.

Fuente: CONAFOR 2022.

Mediante estas dos herramientas se pudieron compenetrar nuestros datos en el software ArcGIS para así obtener una base de datos confiable que sólo ofreciera los datos generados por incendios forestales y dejar fuera datos como puntos de calor generados por empresas o ciudades.

Con esto se analizó cada uno de los eventos que se registraron dentro de la zona de estudio evaluando ambos criterios de forma manual y obtener información de hora, fecha y lugar, así mismo podemos buscar y ajustar las zonas afectadas de forma

manual mediante imágenes satelitales con color real donde se aprecie la cicatriz de los eventos pasados.

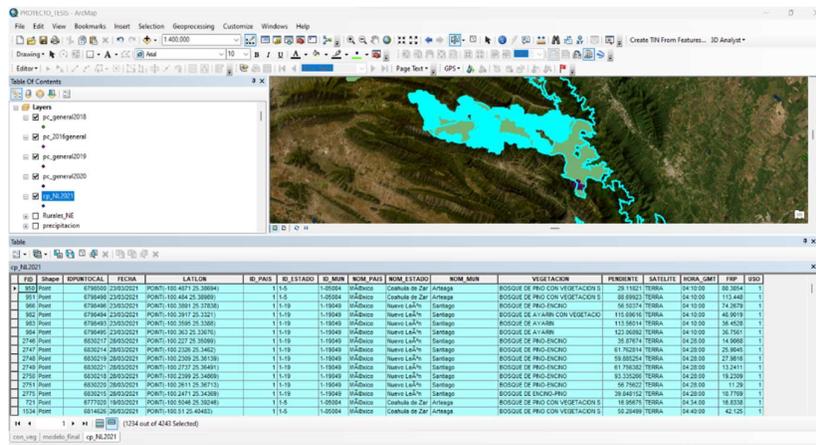


Figura 10. Datos obtenidos de comparar bases de datos FIRMS y SPPIF.

4.7.4 Validación polígonos generados

Una vez que se ubicaron los polígonos en las zonas de eventos registrados a través de los años de estudio, se realizó una validación manual donde, mediante imágenes satelitales de las fechas después de los eventos se corrigieron los polígonos a las zonas observadas en imágenes del área afectada.

Para esto se hizo uso de imágenes satelitales Landsat 8. Las imágenes que se usaron para la validación se procuraron que tuvieran no más de 3 meses desde el fin del evento, esto para tener la cicatriz de la zona lo más marcada posible antes de que se recupere la vegetación.

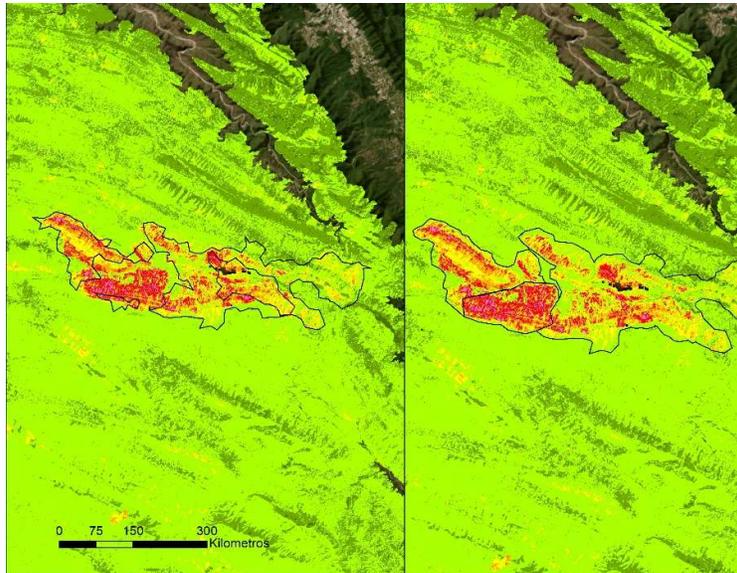


Figura 11. Polígonos antes y después de corrección manual.

4.7.5 Periodo de tiempo seleccionado de estudio

Una vez que se generó la base de datos se obtuvo que la mayoría de los incendios de importancia se presentaban entre los meses de marzo a agosto, siendo ocasionales los eventos que se presentaban en febrero y septiembre. Por tanto, se tomó la decisión, de que para fines de este trabajo lo mejor sería utilizar un periodo relativamente amplio que contemplaba desde febrero hasta agosto. Dando así un total de 8 meses de datos de incendios.

4.7.6 Obtención de ráster/ post proceso

Para llevar a cabo el análisis multicriterio se evaluarán las distintas variables que influyen en los incendios forestales, estos se clasificaron en 5 niveles que van del 1 al 5. Cada valor corresponderá como se muestra en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Clasificación de cada valor de peligro

Valor	peligro
1	MUY BAJO
2	BAJA
3	MEDIA
4	ALTA
5	EXTREMO

Estos valores se generaron a partir de distintas bibliografías y estudios previos, seleccionando las zonas con características más similares y adaptando a los factores presentes en la región.

4.7.7 Topográficos

Para obtener el continuo de elevación se realizó un mosaico, y así unir los continuos de elevación de las distintas regiones que se encontraban divididas por estados, con esto se obtuvo el modelo de elevaciones para toda la zona de estudio como se muestra en la Figura 12. Este insumo se descargó del geoportal de CONABIO con una resolución de 5m. Posterior a esto se realizó el proceso para derivar los respectivos ráster que se implementarían en el modelo multicriterio, estas variables o rasters son, elevaciones, pendientes y aspecto.

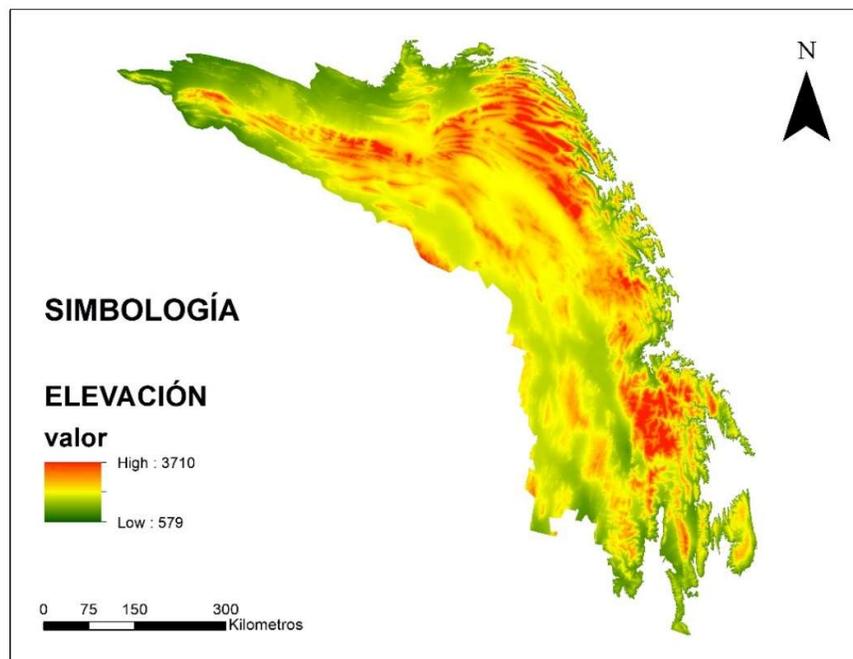


Figura 12. Continuo de elevaciones mexicano para la zona de estudio.

Elevación.

Una vez se tuvo el continuo de elevaciones mexicano para la zona de estudio, se realiza una reclasificación a este ráster para dar los valores correspondientes según será su valor de peligro. Para este elemento fue necesario reclasificar el ráster para aportar los valores numéricos mediante el proceso siguiente: spatial analyst tools>reclass>Reclassify. Esto en el software ArcGIS.

Al analizar la base de datos de incendios forestales, se observa como la mayoría de los incendios forestales se presentaron en zonas altas de la Sierra Madre Oriental, y destacó que mientras más alto fue el evento, la severidad del incendio fue mayor. Por esta razón se va a tomar que a mayor altura mayor será el valor de peligro. Para fines de este estudio se hará uso de una clasificación previamente diseñada para una zona con características similares.

Tabla 5. Valores de riesgo por altitud. Fuente: Malparida, M., 2016.

Altitud	peligro
250 - 1250	1
1250 - 2250	2
2250 - 3250	3
3250 - 4250	4
NULO	5

Una vez realizada la reclasificación respecto a los valores obtenidos de las bibliografías e interpretados para ajustarse a la región se obtuvo el insumo mostrado en la Figura 13.

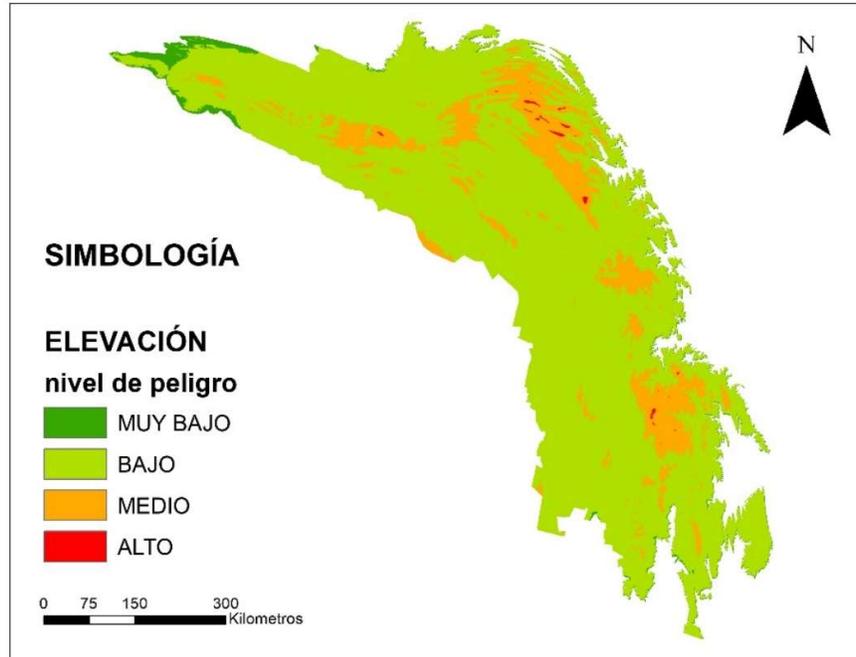


Figura 13. Insumo de elevación.

Pendiente

La pendiente del terreno se obtuvo al procesar el continuo de elevaciones mexicano en ArcGIS mediante la herramienta "slope" y se generó en porcentaje para su posterior reclasificación. Para obtener este insumo ráster se aplicó el siguiente proceso: spatial analyst tools>surface>slope. En este se especificó las unidades en las que se expresarían los resultados, el cual corresponde a porcentaje y se obtuvo un ráster como se muestra en la Figura 14.

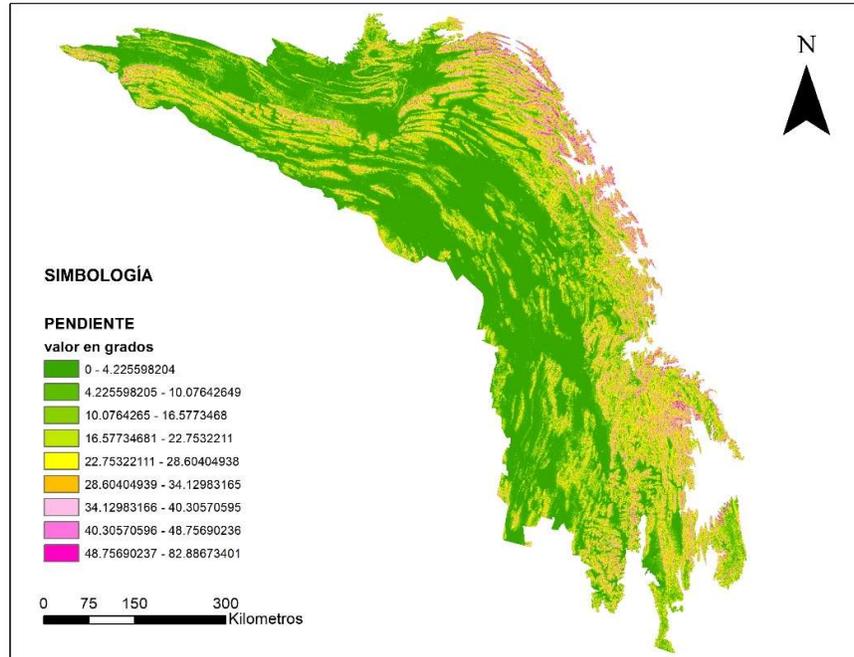


Figura 14. Ráster de pendiente sin reclasificar.

Una vez obtenido el ráster de pendientes se continuó con la reclasificación del insumo. Para este criterio se clasificó sólo en cuatro niveles que van del 2 en adelante como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de riesgo por pendiente. Fuente: Alegría, R., (2020).

Pendiente (%)	Peligro
NULO	1
0-30	2
30-60	3
60-80	4
80-95	5

Con esto se obtuvo finalmente el insumo de pendiente (Figura 15) para su aplicación en el modelo multicriterio de peligro.

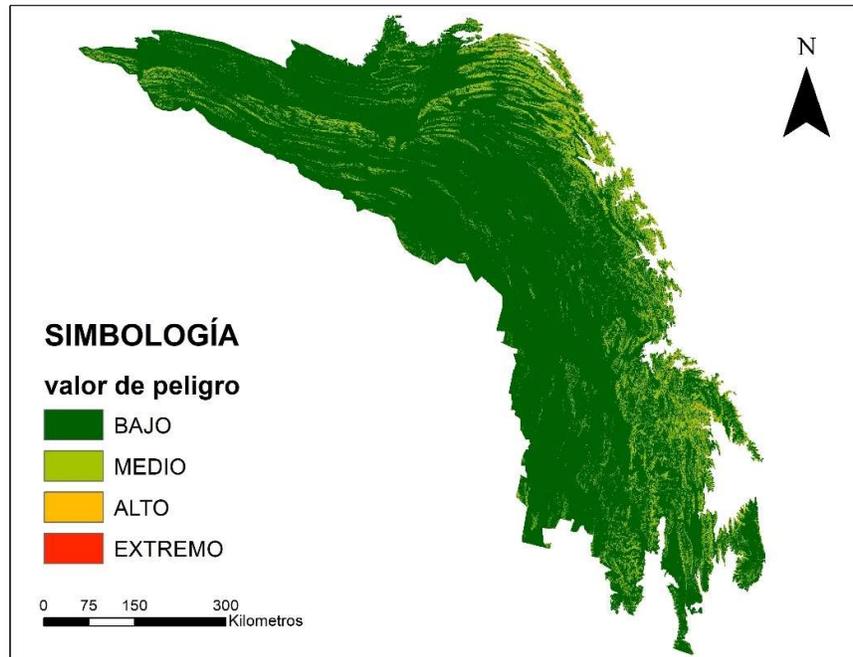


Figura 15. Insumo de pendiente.

Aspecto.

El aspecto u orientación de las laderas indica la orientación que tienen las caras respecto un norte, y es de importancia para saber qué caras de las laderas están más expuestas a la radiación solar, así como la humedad que esta conserva y esto rige la calidad de la vegetación en estas zonas.

Este ráster se generó a partir del continuo de elevación mexicano, y se realizó el siguiente proceso: ArcToolBox > Spatial Analyst tools> Surface > Aspect. Una vez hecho esto se obtuvo un ráster de orientación de laderas (Figura 16) para ser reclasificado según la Tabla 7.

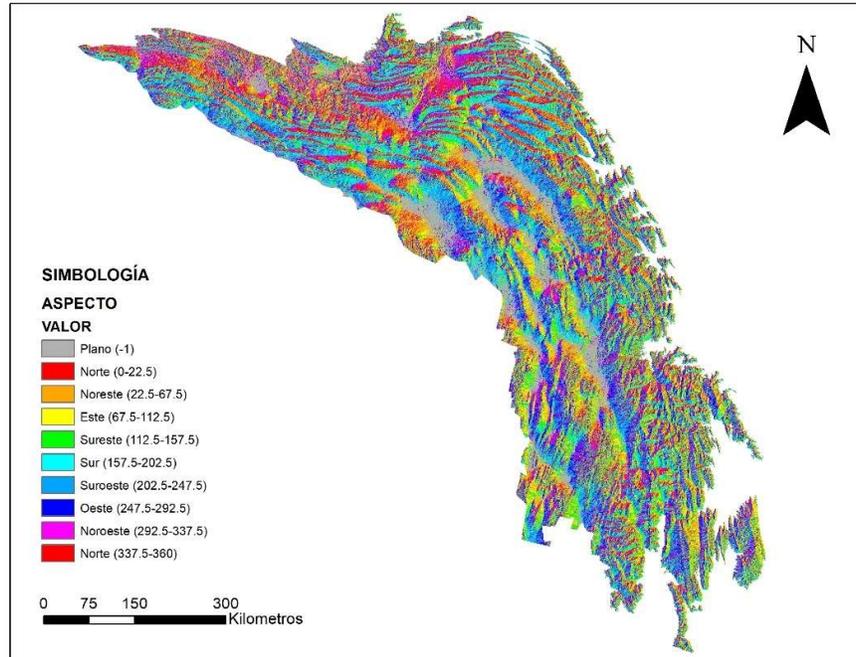


Figura 16. Ráster de aspecto sin reclasificar.

Tabla 7. Valores de peligro por aspecto

Aspecto	Peligro
NORTE	1
NORESTE/NOROESTE	2
ESTE/OESTE	3
SURESTE/SUROESTE	4
SUR	5

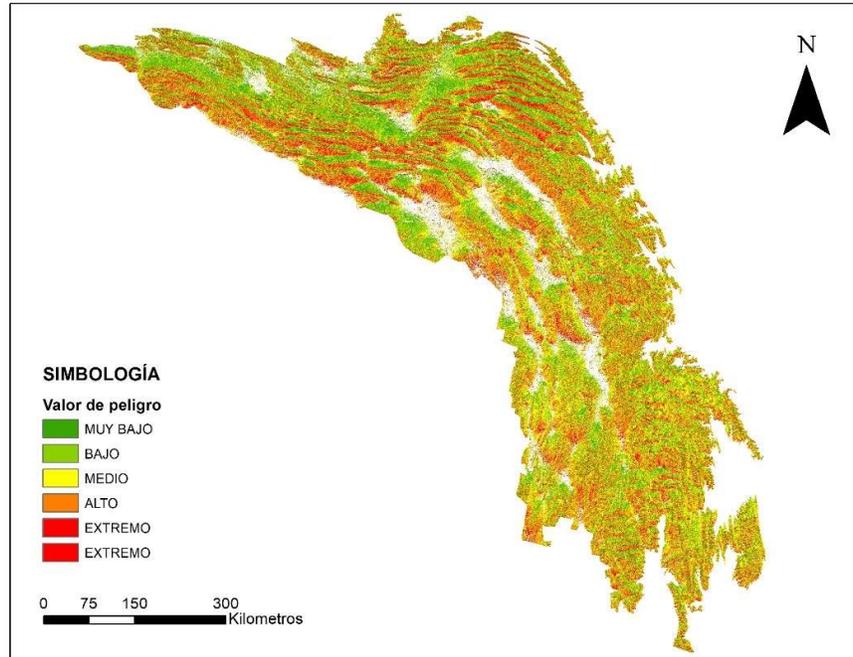


Figura 17. Insumo de aspecto reclasificado.

4.7.8 Ambientales

Los factores ambientales son considerados de periodo corto, por lo cual podría ser una variable que cambie según se necesite si es que se desea actualizar este modelo. De igual forma podrán actualizarse en caso de que se presenten eventos extraordinarios como es en el caso del periodo 2021-2022, que se presentó una sequía.

4.7.9 Severidad

Con la herramienta de Google Earth Engine (GEE) se lograron acortar los tiempos de procesamiento y búsqueda de información. Mediante esta plataforma se crearon mosaicos de imágenes para la zona de estudio, tanto antes de los incendios como después. Para asegurar tener una buena base de datos en cuanto a las imágenes, se optó por tomar un periodo de tiempo de 2 a 3 meses para cada colección de imágenes, puesto que con esto se obtenía la mejor imagen posible para su análisis.

En promedio se obtuvieron para cada mosaico un total de 25 imágenes con el satélite Landsat 8.

Para mejorar la calidad de las imágenes se les colocó un filtro de nubes, con la finalidad de obtener el mosaico con la mejor calidad y evitar la mayor pérdida de datos en lo posible. Al crear este filtro de nubes se reducen los pixeles que tienen esta interferencia y se rellenan con datos de otras imágenes coleccionadas dentro del mismo G.E.E. para obtener una imagen única filtrada.



Figura 18. A) Imagen antes de aplicar el filtro de nubes. B) Misma imagen con filtro de nubes.

Ráster severidad (dNBR)

Una vez que los mosaicos de imágenes fueron creados y filtrados ante la presencia de nubes (en la mayor medida posible) se inicia su proceso para la obtención del Índice Normalizado de Área Quemada.

El proceso de obtener los ráster de NBR para antes y después de los incendios se realizó de igual forma en la plataforma Google Earth Engine, recortando los tiempos de trabajo en cuestión de minutos. Para este proceso se utilizaron las bandas del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta con imágenes satelitales de Landsat 8.

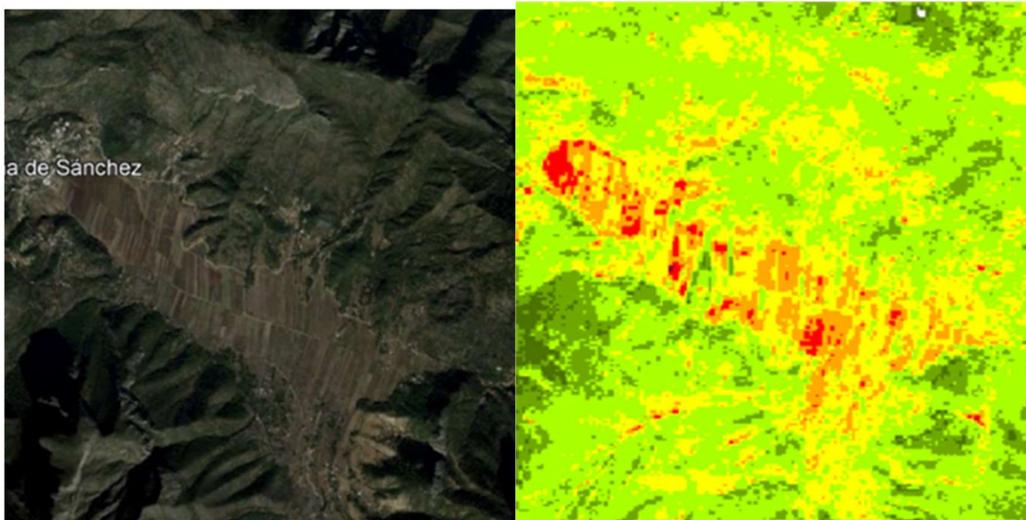
Para la generación de los ráster de severidad no fue necesario realizar los procesos de cada mosaico de imagen por medios manuales, ya que la plataforma de G.E.E. nos ofrece la opción de utilizar el comando “`ee.Image.normalizedDifference`”. Esta función genera una diferencia normalizada entre dos bandas que se deberán especificar, aplicando la fórmula “(banda 1-banda 2) / (banda 2 + banda 1)” y nos

arroja una imagen nueva que no conserva los mismos datos de entrada, puesto que nos entrega una nueva banda con propiedades distintas con el nombre “nd”.

Mediante el comando “ee.Image.normalizedDifference” se especificó sobre que bandas trabajar para obtener el NBR según fuera necesario para cada satélite. Una vez obtenidos estos valores de NBR se presentaron como dos ráster distintos, uno para post incendio y otro para pre-incendio. Estos valores solo muestran las zonas quemadas en dos distintos intervalos de tiempos que son para antes y para después de los incendios. Por lo tanto se aplicó el comando “ee.Image.Substract” para obtener el diferencial entre estas dos imágenes y así obtener el dNBR.

Zonas de agricultura.

Durante la inspección visual se observó la existencia de zonas destinadas al sector agrario. La característica de estas áreas son las figuras rectangulares o circulares (en zonas donde se realiza riego con pivote). Estas zonas son lugares con constante cambio en cuanto a su valor de reflectancia y si forma, por tanto, se decidió que al presentarse este tipo de figuras se deberían tomar como zonas.



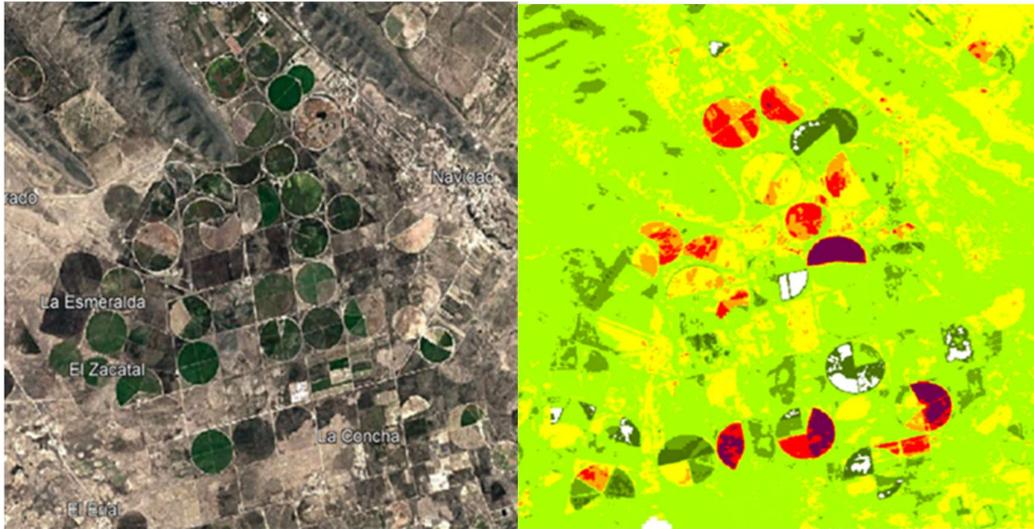


Figura 19. Presencia de severidad en zonas destinadas a la agricultura en imágenes y ráster referente a 2016.

Al generar los datos de los ráster de dNBR se observó que presentaban una alta severidad y severidad moderada de acuerdo con la clasificación de valores, debido a esto se realizó una corrección manual con la que se buscó reducir la presencia de polígonos generados en estas zonas que se confundieran con incendios. Mediante el uso de los ráster generados con ambos satélites se presenciaban más o menos daño en estas zonas, siendo lo óptimo eliminar estos polígonos para evitar una pérdida de información que generará errores en futuras tomas de decisiones.

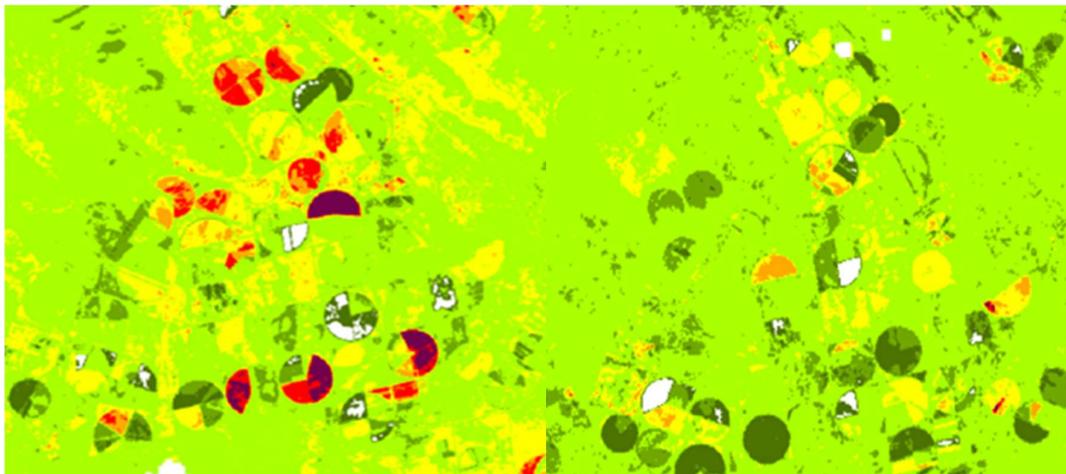


Figura 20. Comparación de resolución en severidad Sentinel 2 y Landsat 8.

Efecto de la sequía en el análisis de las imágenes

Durante la observación de las imágenes generales se observó una variación importante en el dNBR de los datos anuales. Particularmente el año 2022 presentó datos de severidad moderada-baja y severidad baja en la mayoría de la zona centro del área de estudio, sin embargo, es importante notar que durante este periodo las precipitaciones fueron escasas, dando como resultado un periodo de sequía.

También se consideró la falta de presencia de siniestros a gran escala en esa zona, por lo que se descartó que esto fuera generado por incendios forestales. Esto llevó a que se presentará este efecto que asemejaba un área incendiada como se muestra en la figura 21.

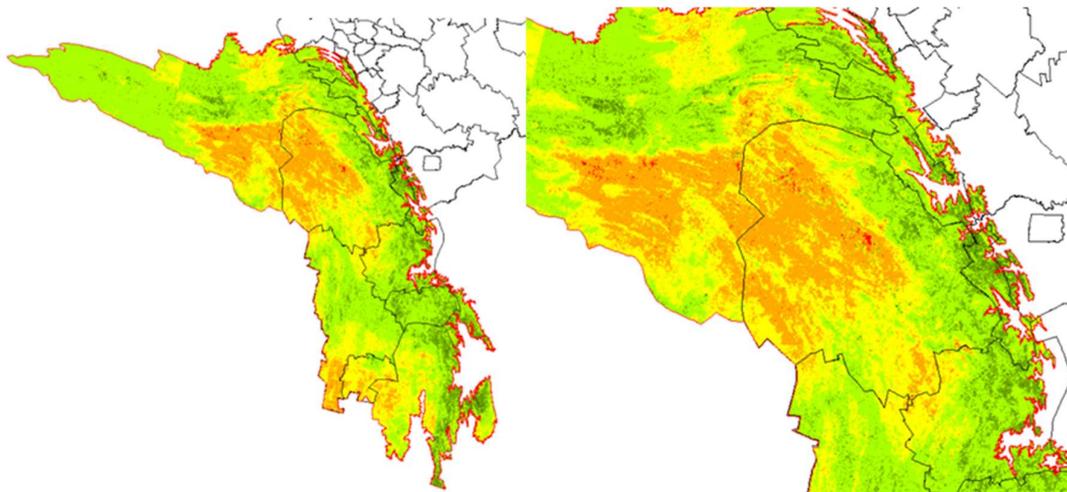


Figura 21. Presencia de sequía en el periodo correspondiente a 2021.

Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El factor del índice de calidad de vegetación se obtiene mediante el análisis de imágenes satelitales, a las cuales se realiza un índice normalizado que responde a la ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Ecuación 1. Cálculo de Índice normalizado de vegetación

Sin embargo, mediante el uso de GEE este proceso de recolección de imágenes y procesado se puede acortar, y obtener resultados óptimos en cuestión de horas o incluso minutos.

Por lo tanto, mediante el uso de google earth engine se realizó un proceso de colección de imágenes muy amplio en un periodo de tiempo muy corto. Mediante esta herramienta se logró procesar un total de 105 de imágenes Landsat 8, esto en un periodo de tiempo menor al que hubiese tomado realizarlo manualmente, y con esto el desgaste en los equipos fue mucho menor. Aplicando el Código se obtuvo un ráster de NDVI (Figura 22) con corrección de imagen por nubes, esto quiere decir que se realizó un mosaico para evitar que las nubes presentes en las imágenes interfirieran, reemplazando estas áreas con otras imágenes de la misma zona dentro de un periodo de tiempo definido para así quitar la presencia de estas nubes y tener una zona más despejada de nubosidad.

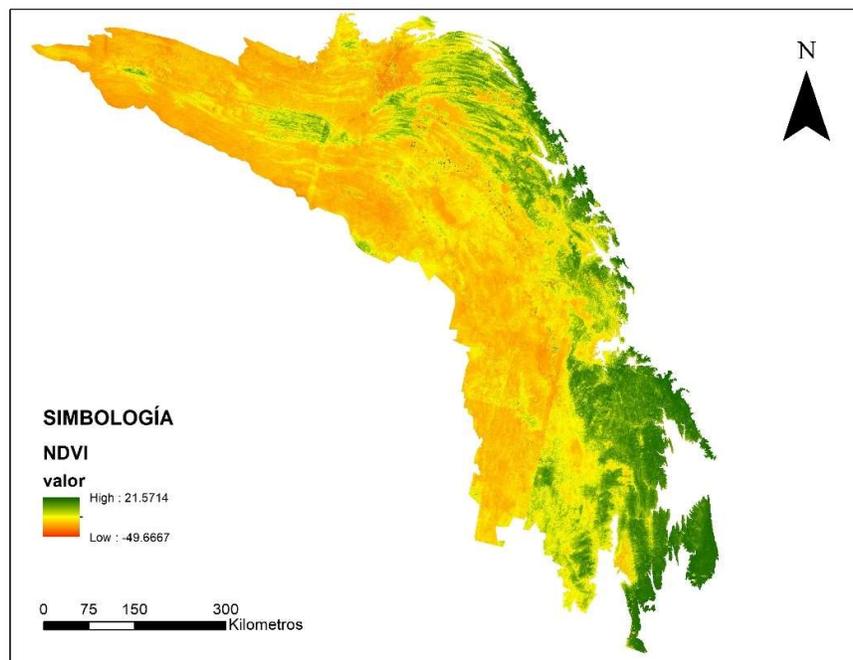


Figura 22. Ráster de NDVI sin clasificar.

A partir de este ráster de NDVI se realizó una reclasificación basada en los valores de la Tabla 8, con esto se obtuvo el insumo de Índice Normalizado de Vegetación (Figura 23).

Tabla 8. Rangos de peligro para la reclasificación NDVI. Fuente: Malparida, M., 2016.

NDVI	Peligro
-0.16 - 0	1
0.01 - 0.1	2
0.11-0.2	3
0.21-0.3	4
0.31-0.63	5

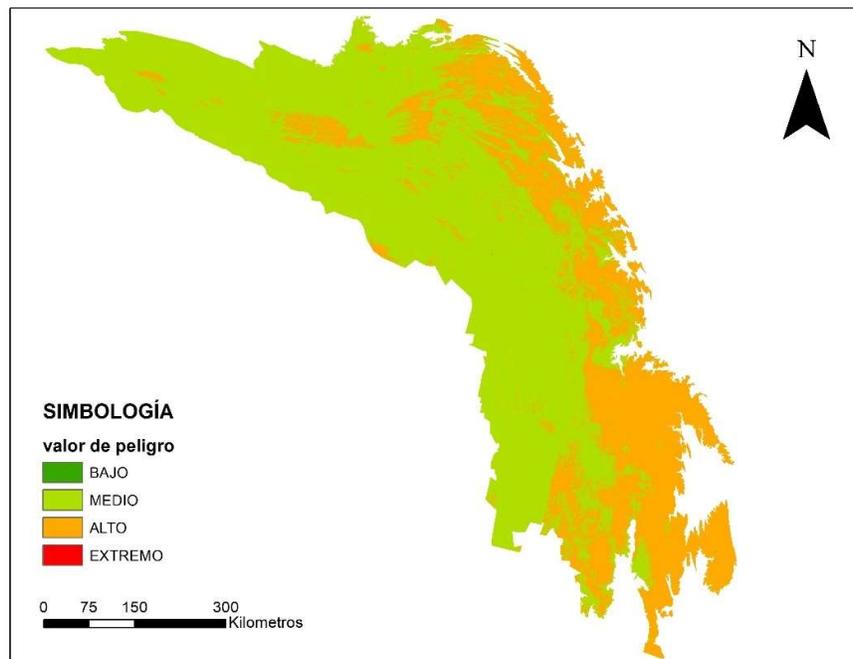


Figura 23. Insumo de NDVI.

4.7.10 Vegetación

Esta base de datos se descargó del geoportal de CONABIO en una escala 1:250000. Para obtener este insumo fue necesario procesar la carta de uso de suelo y vegetación. Se identificaron los tipos de vegetación en la zona con respecto a la altitud y se replanteo la clasificación propuesta por Vicente, F., (2012) en su trabajo, siendo orientada a las condiciones que presentaba la zona de estudio en cuestión.

Dentro de las zonas identificadas se divide en: bosques, matorrales, vegetaciones secundarias y pastizales. Y se dividieron como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Clase de vegetación y su valor de peligro. Fuente: ajustada a partir de Vicente, F., (2012).

Clases vegetación	Peligro
BOSQUE	5
MATORRALES	2
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA	3
PASTIZALES	1
VEGETACIÓN SECUNDARIA BOSCOSEA	4

Este insumo se derivó de una base de datos descargada de la CONABIO a la cual se le extrajeron los valores que corresponden a otros insumos, como son los asentamientos humanos y las zonas agrícolas. Con esto se obtuvo una representación de los tipos de vegetación que se encuentran en la zona de estudio como se muestra en la Figura 24.

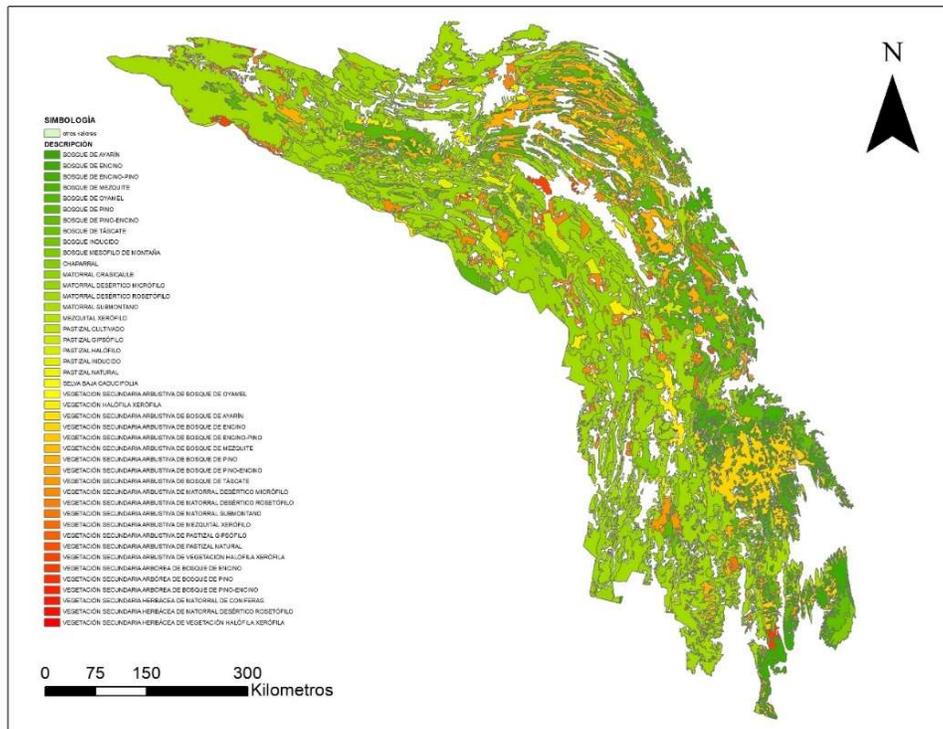


Figura 24. Tipo de vegetación sin clasificar.

Posterior a esto se realizó una reclasificación utilizando los valores adaptados mostrados en la Tabla 9. Con esto se obtuvo el insumo final que hace referencia a los datos de vegetación (Figura 25).

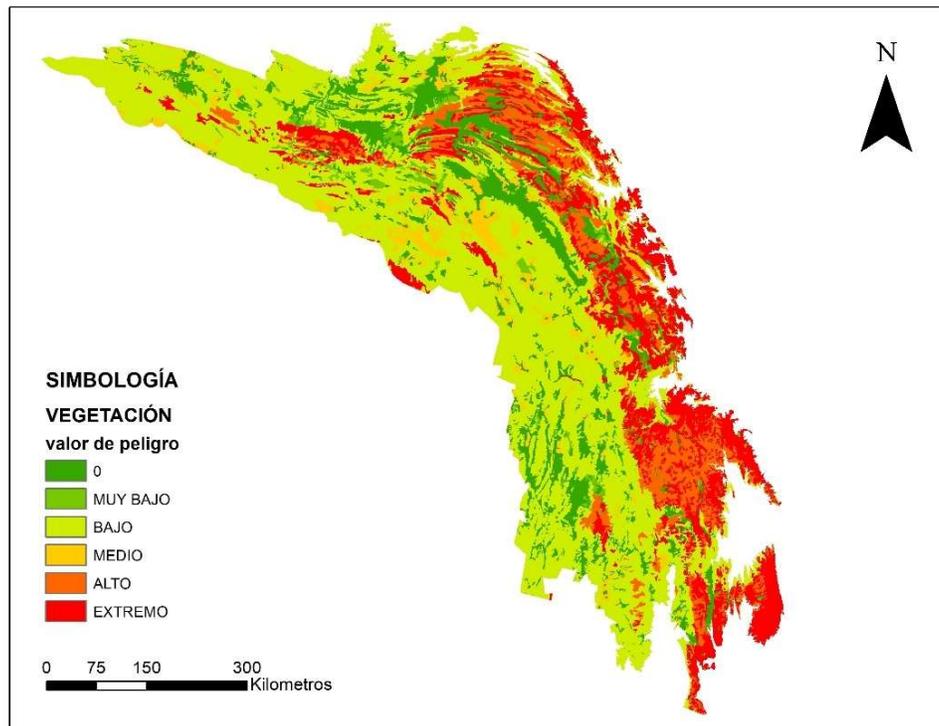


Figura 25. Insumo de vegetación.

En este insumo se presenta un valor 0, este hace referencia a valores vacíos y a los insumos estudiados en otros apartados de este trabajo, como son los antrópicos.

4.7.11 Climatológicos

Los datos climatológicos se generaron a partir de plataformas de información satelital de datos abiertos, estas plataformas son “the POWER project” ofrecida por la NASA y “Global Wind Atlas”.

La primera es la generada por la NASA, esta es llamada the POWER project, esta plataforma ofrece datos de precipitación y temperatura generados mediante información satelital. Para obtener este insumo se seleccionaron 17 estaciones

aleatorias dentro la zona de estudio, estas estaciones tienen información histórica de precipitación y temperatura del periodo estudiado. Dichas estaciones se interpolan y se obtiene un ráster de precipitación como se muestra en la Figura 26.

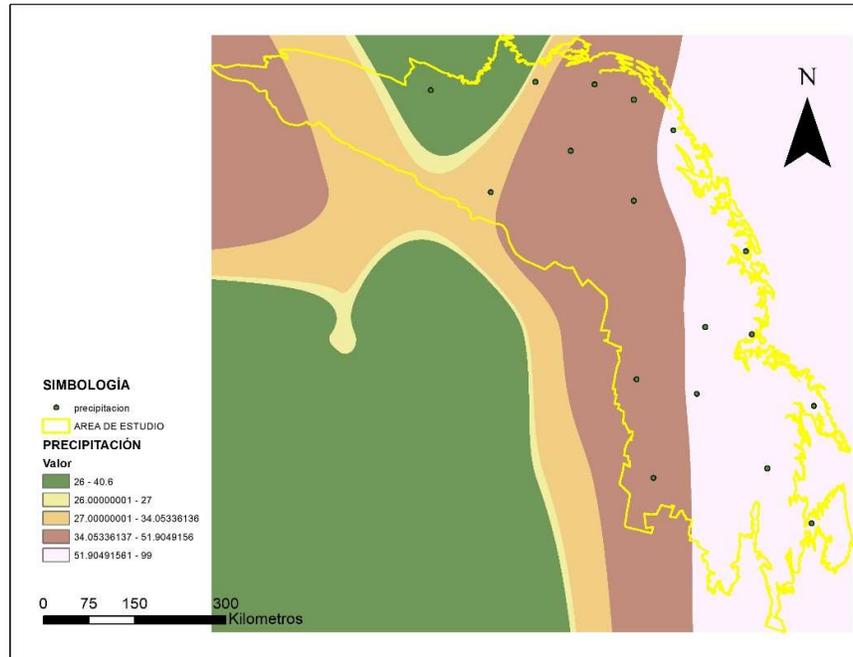


Figura 26. Ráster precipitación interpolado con estaciones.

Posterior a esto se realizó una reclasificación de los datos generados, esto a partir de la clasificación aportada por Malparida, R., 2016 mostrada en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Clasificación de precipitación, rangos y peligro.

Precipitación	Peligro
84.41 - 99	1
69.81 - 84.40	2
55.21 - 69.80	3
40.61 - 55.20	4
26 - 40.60	5

Tabla 11. Clasificación de temperatura, rangos y peligro.

Temperatura	Peligro
11.6 - 15.82	1
15.82 - 20.0	2
20.04 - 24.26	3

24.6 - 28.48	4
28.48 - 32.7	5

A partir de estos datos se obtuvieron los insumos de precipitación y temperatura mostrados en la Figura 27 y Figura 28 respectivamente.

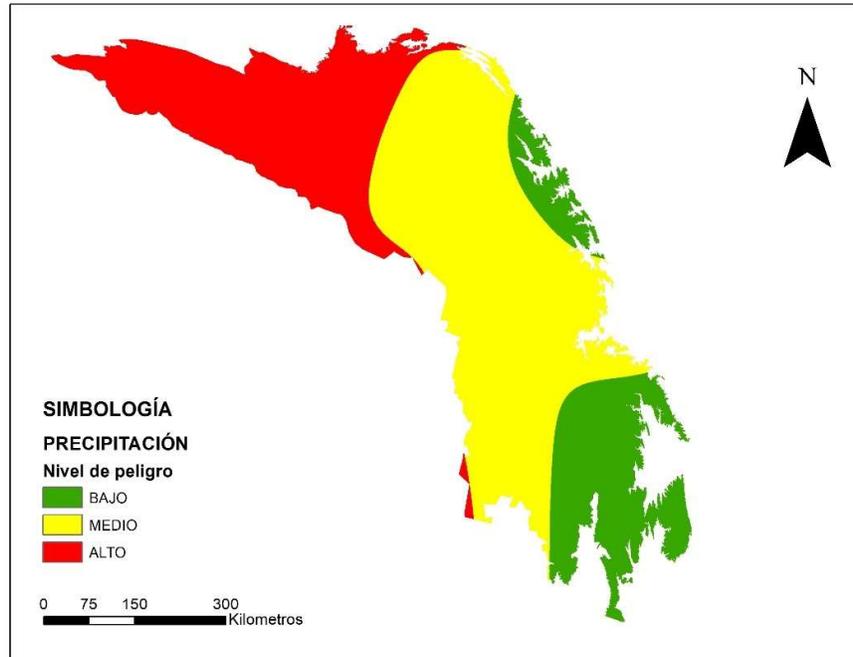


Figura 27. Insumo de precipitación.

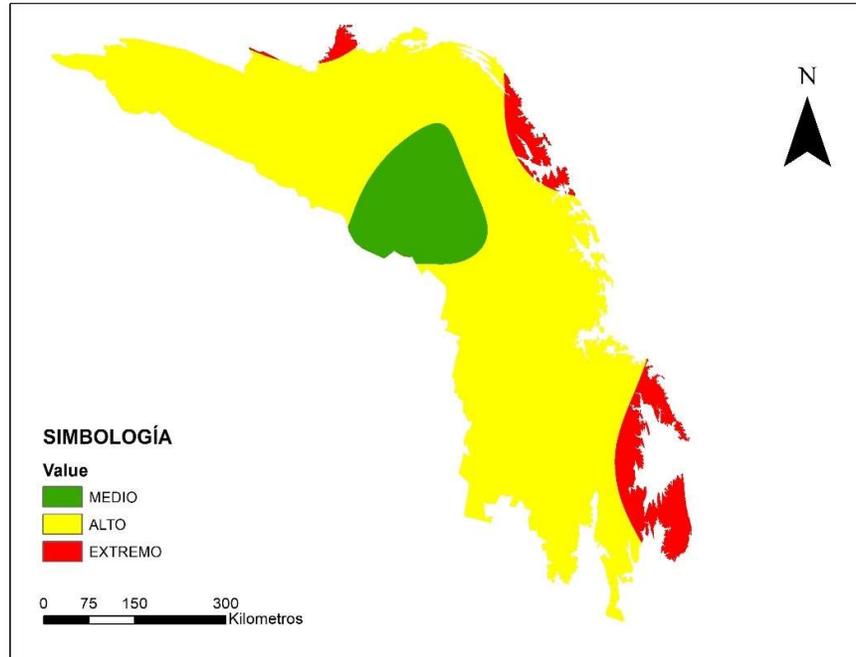


Figura 28. Insumo de temperatura.

Los datos de viento se extrajeron en formato ráster de la plataforma Global Wind Atlas. Estos datos se extrajeron con un tamaño de píxel de 270 por 270 metros.

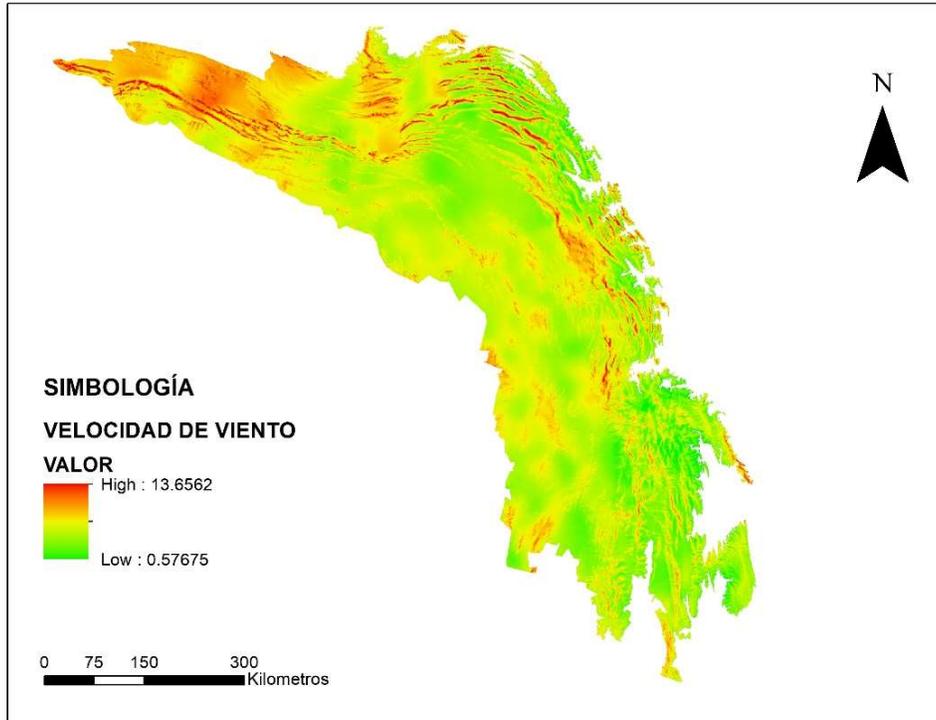


Figura 29. Ráster de velocidad de viento sin clasificar.

Una vez generado se clasificaron en base a distintas bibliografías que se adaptaron a las condiciones presentadas en la región, dando con esto los intervalos y rangos mostrados en la

. A partir de estos datos se obtuvo el insumo de velocidad del viento como se muestra en la Figura 30.

Tabla 12. Clasificación de velocidad de viento, rangos y peligro.

Vel. Viento (Km/h)	Peligro
0 - 3	1
3-5	2
5-7	3
7-10	4
10-14	5

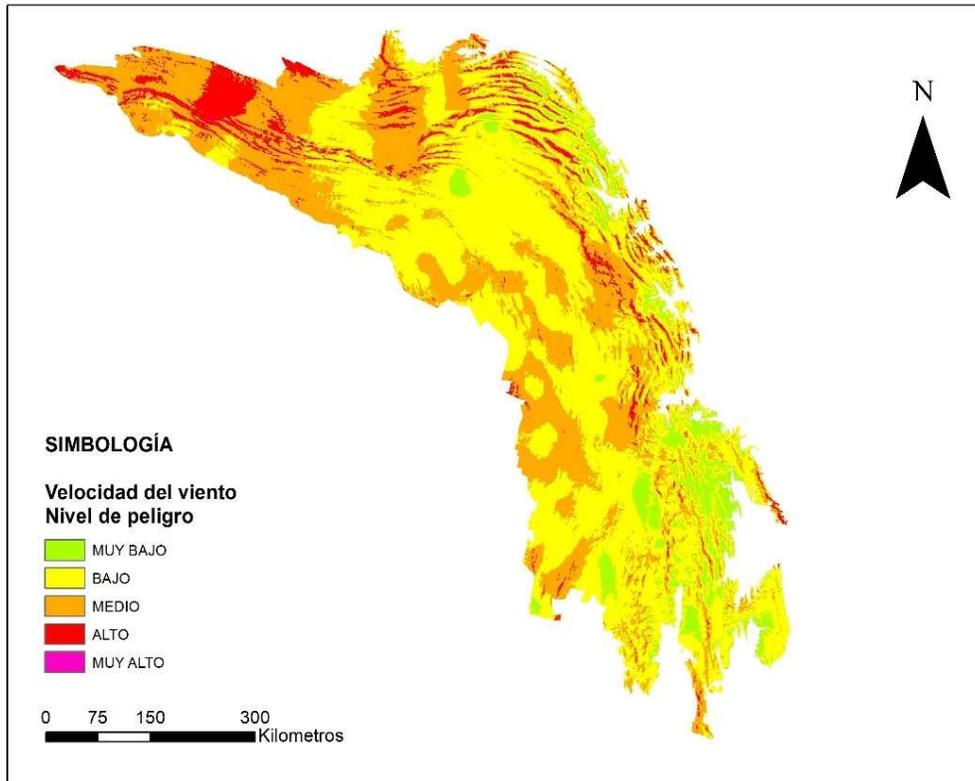


Figura 30. Insumo de velocidad de viento.

4.7.12 Antrópicos

Los datos de actividades antrópicas son los que determinan el riesgo de inicio de incendios forestales, al haber un mayor número actividad humana el peligro de ignición se ve incrementado.

Los datos de información para esta capa fueron obtenidos a través del portal del INEG, que es un portal de información abierta al público y que pertenecen a los datos del censo del 2020.

El INEGI toma como ubicaciones rurales a todos aquellos poblados con menos de 2499 habitantes, por lo tanto, se decidió que se deben tomar en cuenta todos los puntos que genera como “poblado”, y a cada uno se le asignó un valor de riesgo respecto a la cercanía territorial.

A la par se contempla que, al ser zona rural, es constante la presencia de actividad agrícola donde se tienden a realizar quemas controladas que suponen un riesgo de ignición, y por esto se deben tomar en cuenta. De igual forma se analizan las distancias territoriales desde el centro de estos polígonos obtenidos con los datos de las cartas de uso de suelo del INEGI.

Otro aspecto importante son las carreteras que presentan un riesgo de ignición, pues en su mayoría los bordes boscosos rozan el derecho de vía, contrario a lo estipulado en los reglamentos de tránsito que determinan una distancia mínima entre estos. Este insumo se obtuvo de las cartas del INEGI con una escala 1:50000.

Distancia a caminos.

A partir del registro de caminos en el INEGI se descargó el shapefile de la CONABIO en escala 1:50000, este conjunto de datos contenía tanto caminos principales, así como los caminos secundarios dentro de poblados y alrededores cercanos. Posterior se procesó en el software ArcGIS a partir del criterio de cercanía con la función “euclidean distance” (Figura 31).

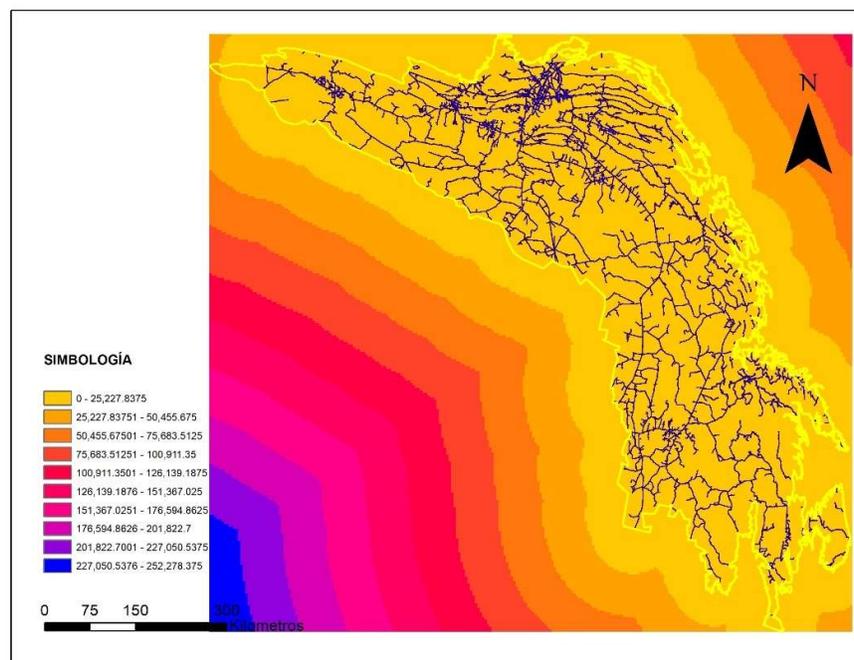


Figura 31. Ráster de cercanía a caminos sin clasificar.

A partir de estas distancias se generó el insumo de distancia a caminos (Figura 32) siguiendo la clasificación mostrada en la Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación de distancia a caminos, rangos y peligro.

Dist. caminos (m)	Peligro
2000 - 2500	1
1500 - 2000	2
1000 - 1500	3
500 - 1000	4
0 - 500	5

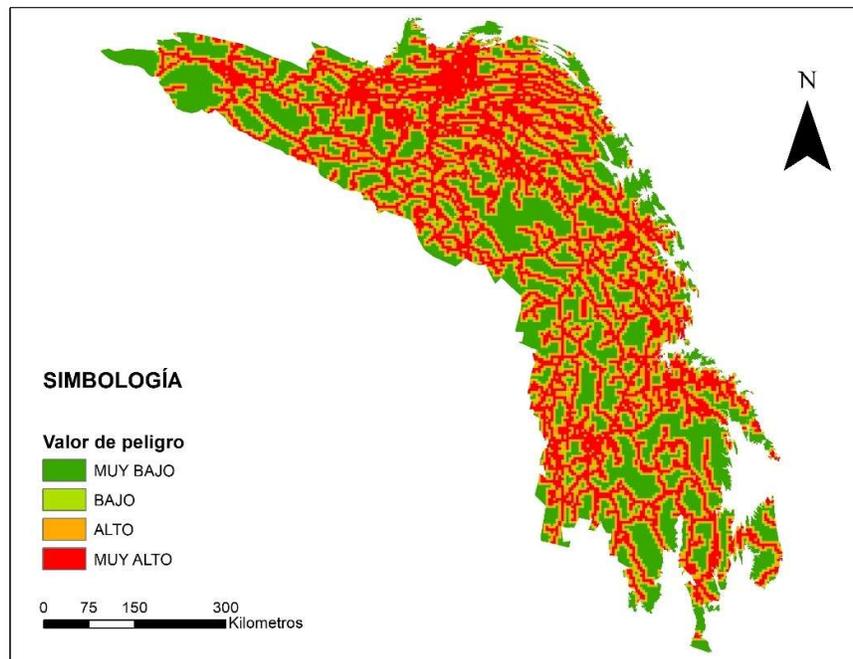


Figura 32. Insumo de distancia a caminos.

Distancia a zona agrícola.

A partir de la carta de uso de suelo obtenida del geoportal de la CONABIO se extrajeron las zonas destinadas a la agricultura, posterior a esto se determinó la cercanía a estas áreas para clasificarlas como peligros potenciales. Con la función “euclidean distance” se determinó la distancia a partir de estos polígonos, con esto se obtuvo el mapa mostrado en la Figura 33.

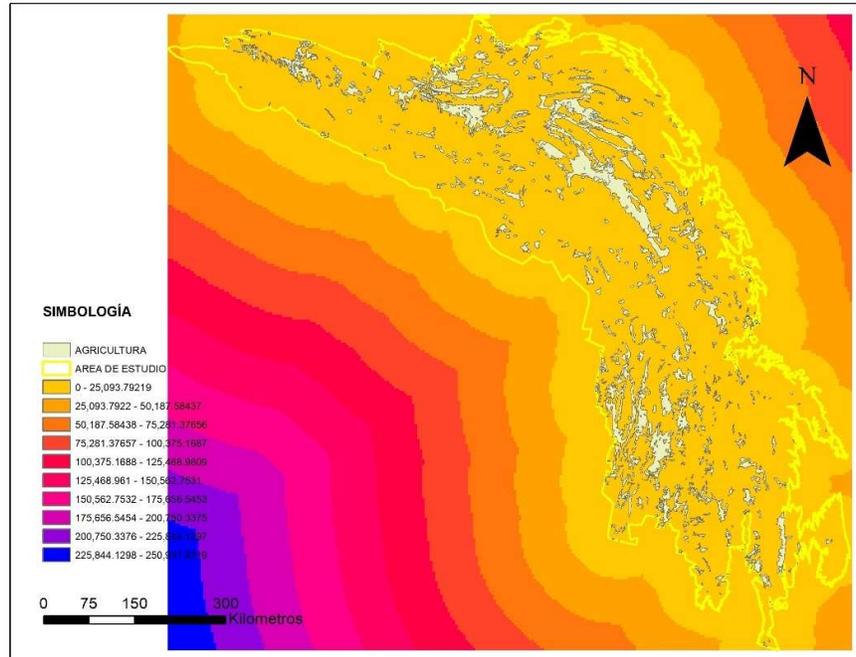


Figura 33. Ráster de cercanía a zona agrícola sin clasificar.

A partir de estas distancias se generó el insumo de distancia a zonas agrícolas (Figura 34) siguiendo la clasificación mostrada en la Tabla 14.

Tabla 14. Clasificación de distancia a zonas agrícolas, rangos y peligro.

Dist. Agrícola (m)	Peligro
>500	1
200-500	2
100 - 200	3
NULO	4
<100	5

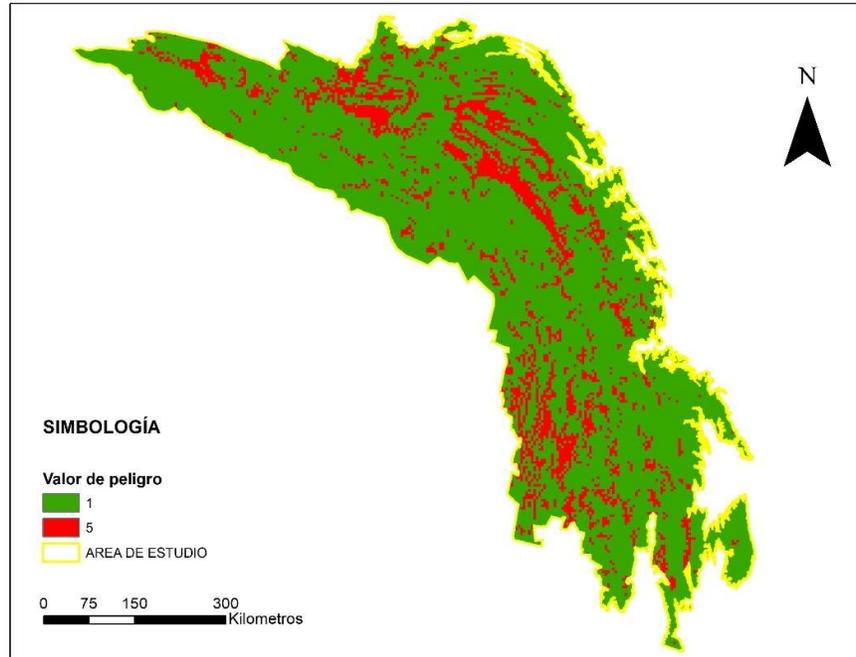


Figura 34. Insumo de distancia a zona agrícola.

Distancia a poblados.

A partir de la carta de uso de suelo obtenida del Geoportal de la CONABIO se extrajeron las zonas destinadas a asentamiento humanos, a partir de esta se determinó la cercanía a estas áreas para clasificarlas como peligros potenciales. Con la función “euclidean distance” se determinó la distancia a partir de estos polígonos, con esto se obtuvo el mapa mostrado en la Figura 35.

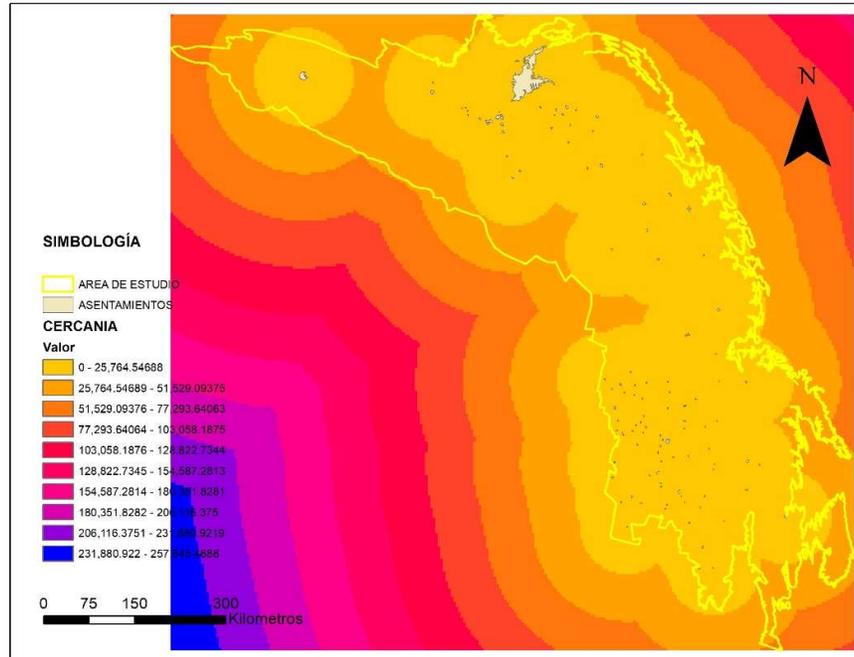


Figura 35. Ráster de cercanía a poblados sin clasificar.

A partir de estas distancias se generó el insumo de distancia a zonas agrícolas (Figura 36) siguiendo la clasificación mostrada en la Tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de distancia a poblados, rangos y peligro.

Dist. poblados	Peligro
>1500	1
600-100	2
400-600	3
500-400	4
<500	5

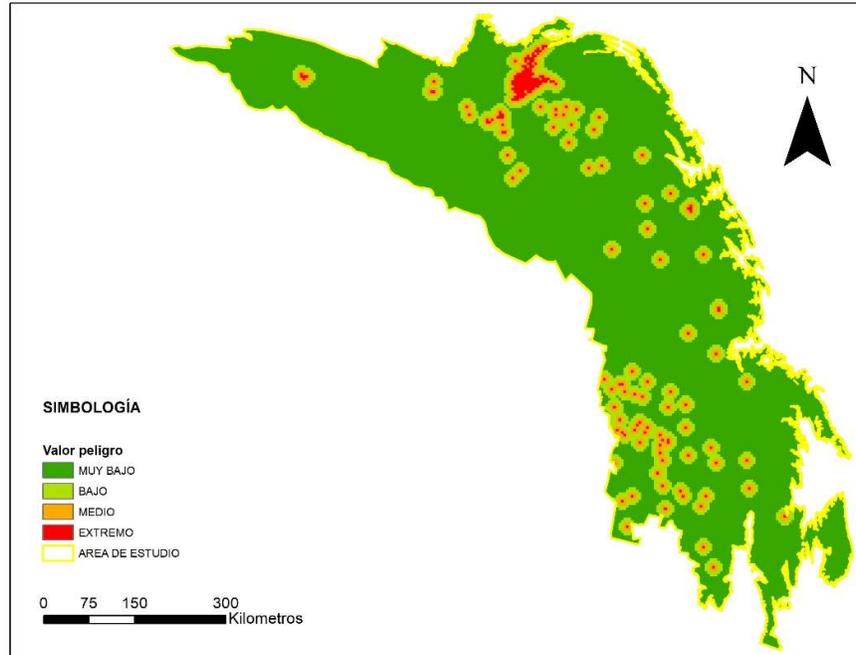


Figura 36. Insumo de distancia a poblados.

4.8 Mapa de amenaza o peligro.

Para el modelo de toma de decisiones por criterio múltiple se hizo una suma de los rasters una vez se hubieron ponderados los 11 criterios ponderados a tomar en cuenta. Este nuevo ráster nos da una capa con la suma de todos los valores por pixeles que posteriormente se reclasificaron en cuatro niveles de riesgo.

Vulnerabilidad y resiliencia.

La información recaudada para el estado de Nuevo León se repartió por municipios según los datos ofrecidos por protección civil. En cambio, los datos que se obtuvieron para los estados de Tamaulipas y Coahuila estaban solo proyectados a nivel estatal, generando con esto un error latente a futuros estudios.

Analizando la información ofrecida por parte de los cuerpos de protección civil de los distintos estados, se tomó la decisión de dejar fuera de este mapa final de riesgo a los estados de Tamaulipas y Coahuila, debido a que la cantidad de datos

ofrecidos generan una capa de información con calidad muy baja que podría sesgar nuestros resultados finales.

Por lo tanto, antes de proceder a realizar el mapa de riesgo, se realizó un recorte dejando fuera del mapa final a las zonas correspondientes a Tamaulipas y Coahuila como se muestra en la Figura 37.

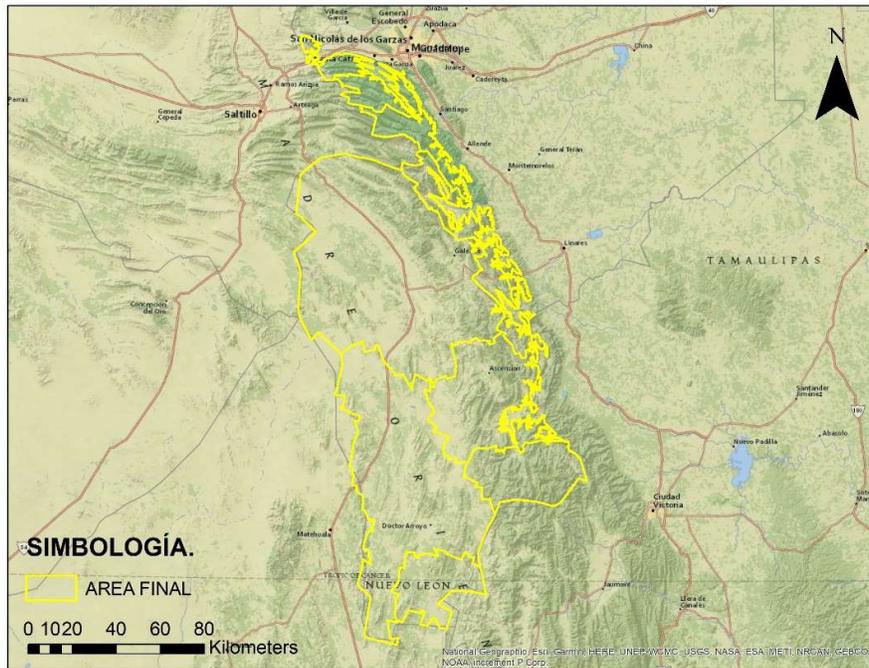


Figura 37. Área de estudio.

4.9 Vulnerabilidad

Los insumos de vulnerabilidad se basaron en las condiciones de los poblados y cómo se verían frente a un evento de incendio forestal. Principalmente se evaluaron 3 factores de los poblados, estos son: ubicación respecto a las zonas de peligro, ubicación respecto a rutas de evacuación y la densidad poblacional, así como su condición socioeconómica.

Estos valores se ponderaron como se muestra en la Tabla 16 y representan los factores de vulnerabilidad ante incendios forestales.

Tabla 16. Niveles de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

Vulnerabilidad	Nivel vulnerabilidad
Sin vulnerabilidad aparente	1

Vulnerable	2
Moderadamente vulnerable	3
Muy vulnerable	4

Los datos de vulnerabilidad se obtuvieron a partir de datos proporcionados por el INEGI a través de su plataforma. Se obtuvieron estos datos en una nube de puntos con datos de cada pueblo, especificando que son todos considerados como rurales por contar con menos de 2,499 habitantes. Estos se dividieron en 3 grupos de poblados, poblados con más de 500 habitantes, poblados con 499 a 200 habitantes y poblado con menos de 199 habitantes. Para representar los datos de los poblados se realizó un buffer a partir de los datos de ubicación en los centros de poblados siendo estos círculos que cubrieran la mayor cantidad de territorio poblado y sus alrededores. Para cada categoría se otorgó una medida distinta de la cual se validó de manera visual utilizando la herramienta Google Earth como se muestra en la Figura 38.

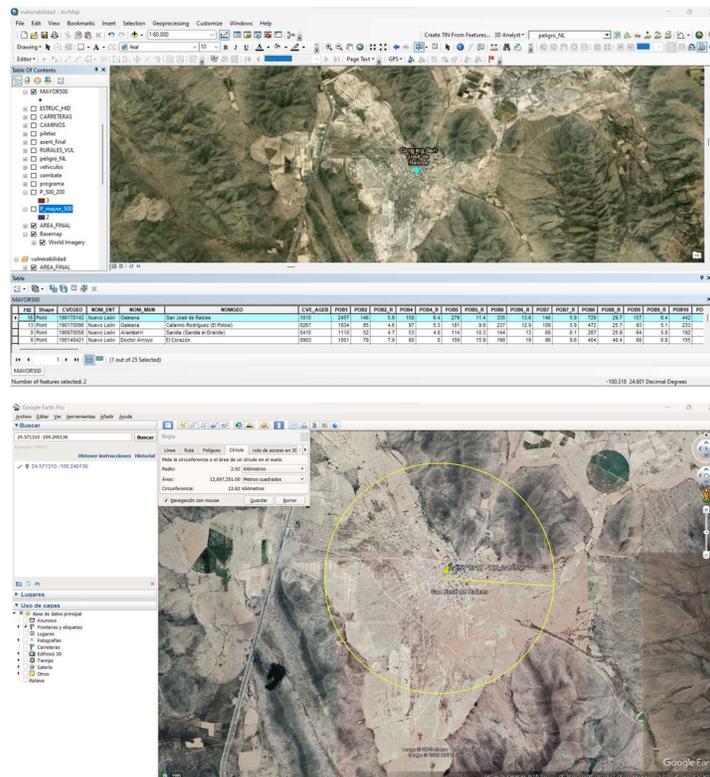


Figura 38. Validación de buffer poblados.

Ubicación respecto a las zonas de peligro

Para generar este insumo se hizo uso del mapa de peligro a incendios forestales mostrado en la Figura 49 y la información de los poblados obtenidos a través del INEGI. Se realizó una selección manual, donde aquellos poblados ubicados dentro de las zonas de peligro medio y extremo fueron seleccionados para ser evaluados respecto a su vulnerabilidad y ubicación. Los poblados en zonas de medio peligro se les otorgó un valor de 2 de riesgo y los poblados que se encontraban dentro de las áreas de extremo riesgo obtuvieron un valor de 3. Al resto de los poblados se les dio valor de 1 como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Criterio de vulnerabilidad por ubicación

Criterio	Vulnerabilidad
Poblados en peligro bajo/muy bajo	1
Poblados en peligro Medio	2
Poblados en peligro Extremo	3

Ubicación respecto a rutas de evacuación.

Para este insumo se utilizaron datos de las carreteras y caminos, este insumo se obtuvo a partir de datos descargados en la plataforma de la CONABIO. Los poblados se dividieron en 3 categorías: poblados sobre rutas principales, poblados sobre caminos secundarios, y poblados sin caminos aparentes. Estos últimos son poblados aislados donde los caminos tienden a ser de terracería en mal estado.

Tabla 18. Clasificación por proximidad a caminos.

Criterio	Vulnerabilidad
Poblados próximos a caminos principales.	2
Poblados en caminos secundarios o caminos.	3
Poblados sin conexión aparente a caminos.	4

Los poblados por sí mismo se encuentran en una vulnerabilidad “vulnerable” como lo muestra la Tabla 17, al que se le da un valor de 2 en vulnerabilidad. Estos

poblados se puntuaron de esta manera bajo la condición de estar asentados sobre caminos principales. A los poblados que se conectan a los caminos secundarios se califican como moderadamente vulnerable y son puntuados con un valor de 3. Aquellos poblados que aparecen sin conexión a los caminos son muy vulnerables y se puntuaron con un valor de 4. En base a este criterio se generó el insumo mostrado en la Figura 39.

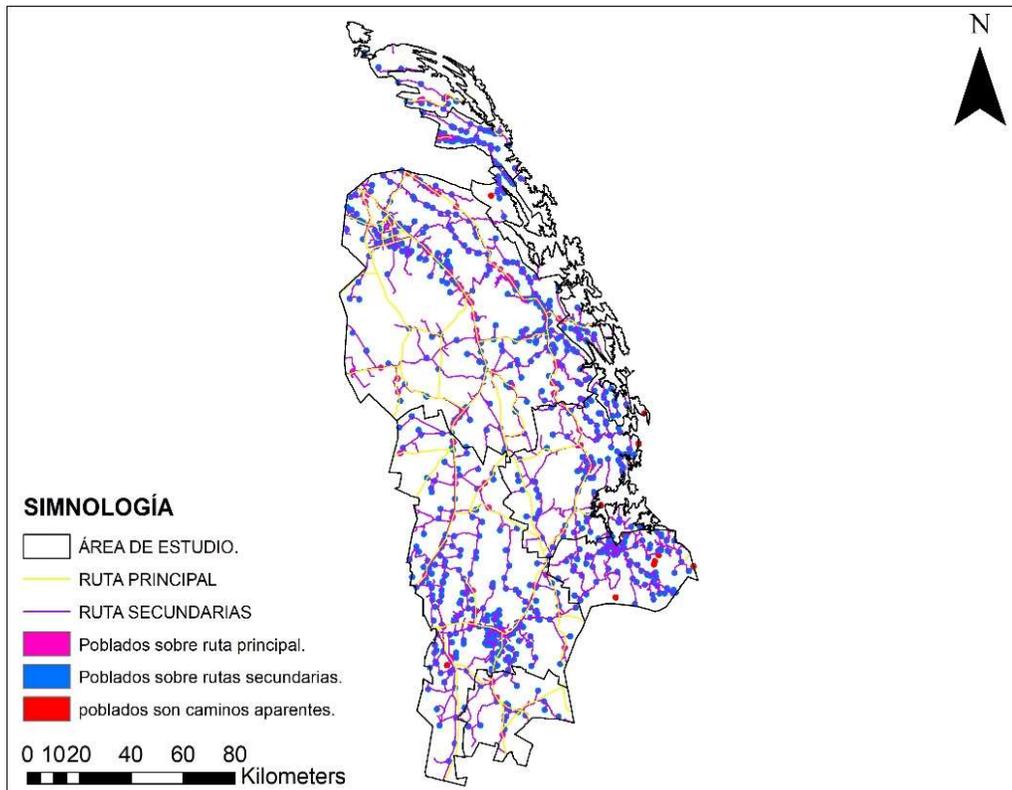


Figura 39. Ubicación de poblados respecto a caminos.

Población por poblado.

Las poblaciones con menos de 200 personas se clasificaron con una vulnerabilidad de 4. Poblaciones con 200 a 500 habitantes se clasificaron con vulnerabilidad de 3 y aquellos con más de 500 pobladores se consideran menos vulnerables y se clasificaron con un valor de 2 dando como resultado el insumo mostrado en la Figura 40.

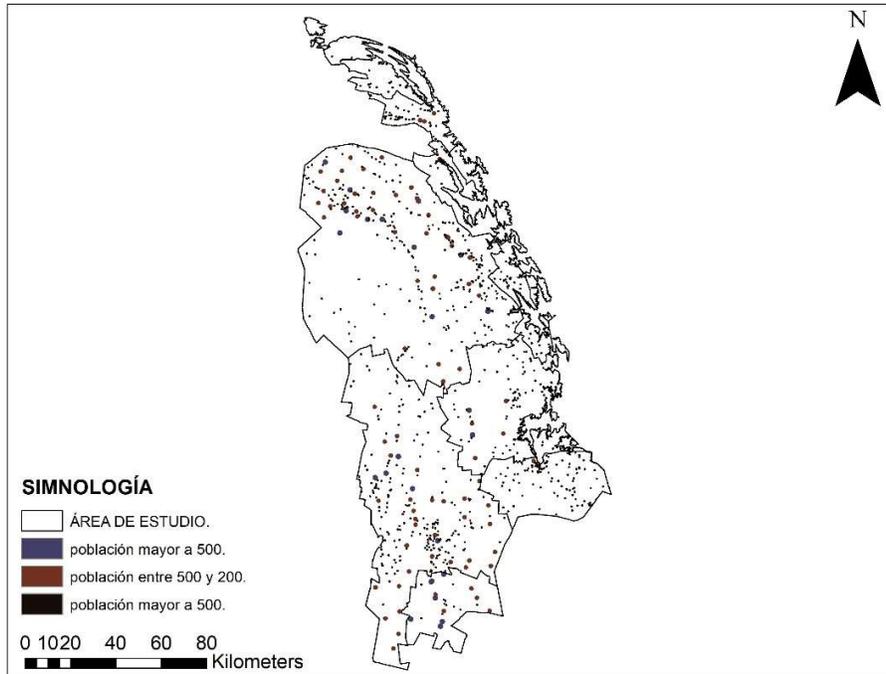


Figura 40. Densidad poblacional.

Finalmente se realizó una suma de estos insumos para obtener un modelo que refleja la vulnerabilidad de los poblados ubicados dentro de la zona de estudio, este se muestra en la Figura 41.

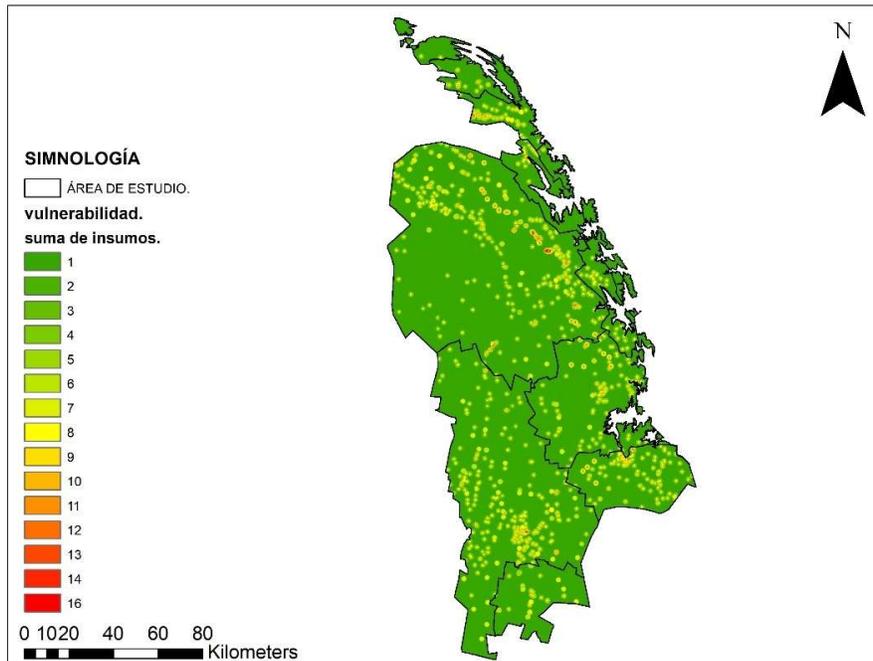


Figura 41. Vulnerabilidad sumada en zona de estudio.

El modelo mostrado en la Figura 41 se encuentra sin reclasificar y no representa de manera visual estas zonas vulnerables.

Resiliencia

Los datos de resiliencia se generaron a partir de los distintos programas estatales y municipales, obteniendo así los datos de equipos para combatir incendios, estructuras preventivas, protocolos en caso de emergencias, información sobre las brigadas, entre otras medidas de recuperación para después de los eventos. Para este insumo se utilizó la evaluación mostrada en la tabla.

Tabla 19. Clasificación de resiliencia.

Resiliencia	Nivel resiliencia
Sin resiliencia aparente	1
Resiliente	2
Moderadamente resiliente	3
Muy resiliente	4

Principalmente se evaluó la capacidad que los municipios presentan para actuar y recuperarse en caso de estos eventos, por lo tanto los factores que se tomaron en cuenta fueron los siguientes: cuenta con programa de contactos de emergencia, cuenta con equipo de combate y cantidad, vehículos oficiales con los que cuenta para en caso de incendios forestales, número de brigadas forestales y condición (eventuales o permanentes), estructuras preventivas (tanques de agua, torres de vigilancia, franjas cortafuego, etc.).

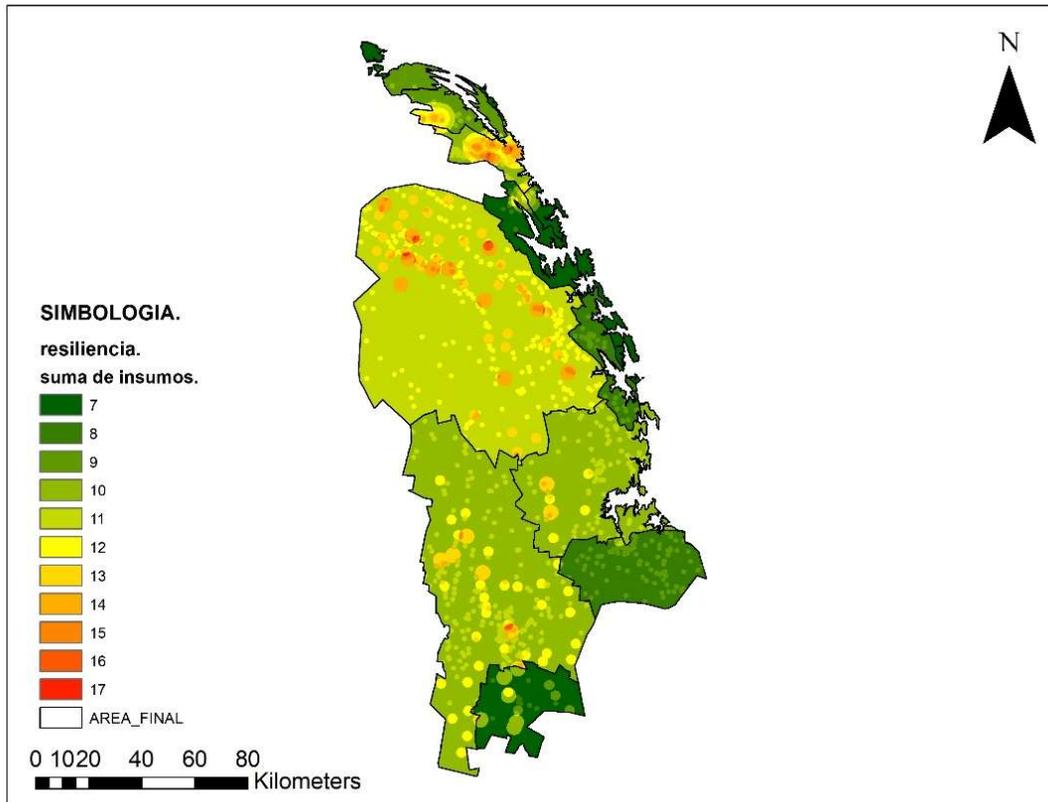


Figura 42. Resiliencia sumada en zona de estudio.

4.10 Mapa de riesgo.

Una vez recortados los tres mapas se aplicó la fórmula de riesgo (Ecuación 2), que incluye los 3 insumos generados anteriormente dando como resultado el modelo mostrado en la Figura 43.

$$riesgo = \frac{(amenaza) * (vulnerabilidad)}{resiliencia}$$

Ecuación 2. Fórmula de riesgo.

5 Resultados

5.1 Incremento de incendios forestales

Se realizó un sondeo de los incendios forestales ocurridos en la zona de estudio desde el 2015 al 2022, dando con esto un total de 8 años de información. A partir del 2015 se ha presentado un incremento en el número de eventos ocurridos, siendo los años 2021 y 2022 los que más casos presentaron.

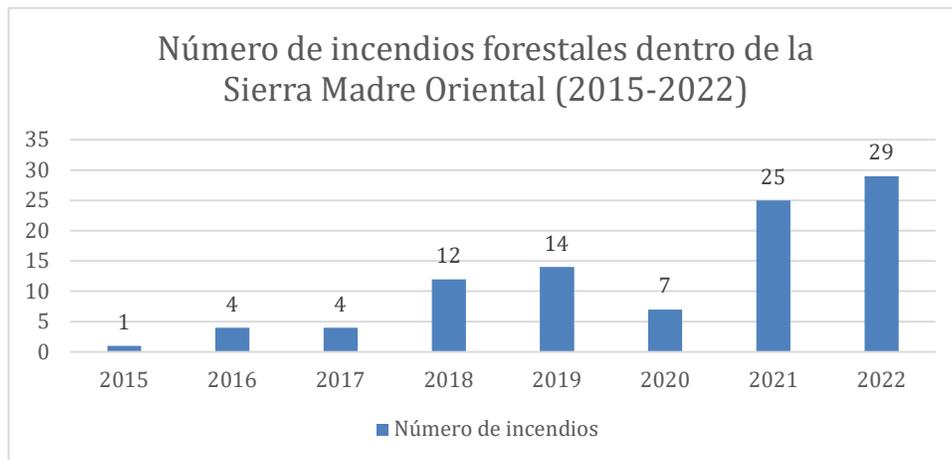


Figura 44. Aumento de incendios forestales dentro de la SMO.

Analizando los datos obtenidos de zonas afectadas se obtuvo que el número de incendios registrados no es directamente proporcional al área que estos afectan. Como se muestra en la Figura 44 se presentaron casi los mismos daños en 2017 donde solo hubo 4 incendios dentro de la zona de estudio que en años como 2019 con un total de 14 incendios.

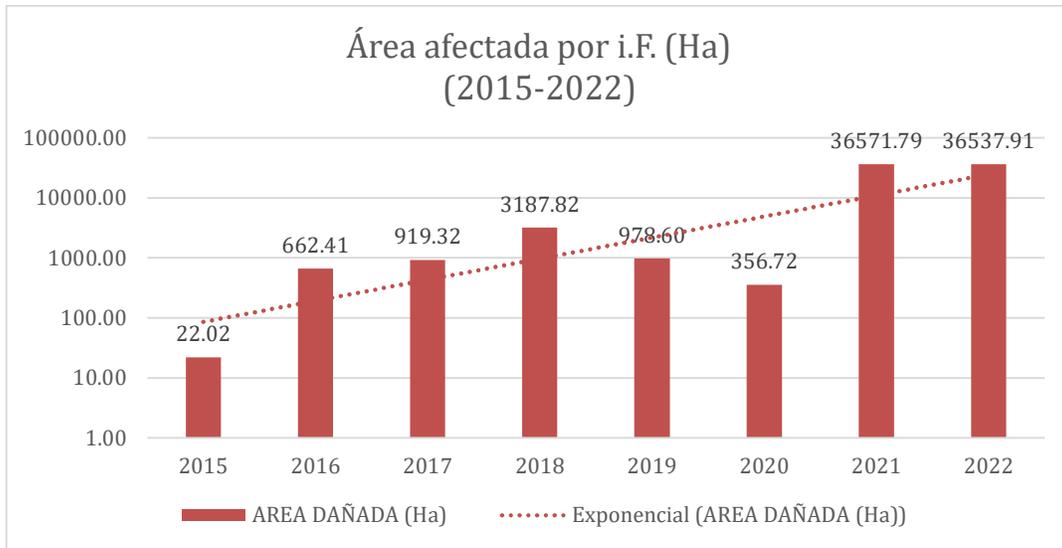


Figura 45. Área afectada periodo 2015-2022

5.2 La severidad de los nuevos incendios

Al observar los rasters de severidad de incendios históricos se obtuvo como se han comportado respecto a su severidad con el paso del tiempo, denotando un aumento en su efecto sobre la vegetación. Dentro de estos eventos se obtuvo que de los años estudiados el que mostró un aumento notable en cuanto a la severidad mediante los datos dNBR fue el año 2021, pero se ha notado un constante aumento en las severidades como se muestra en la Figura 46.

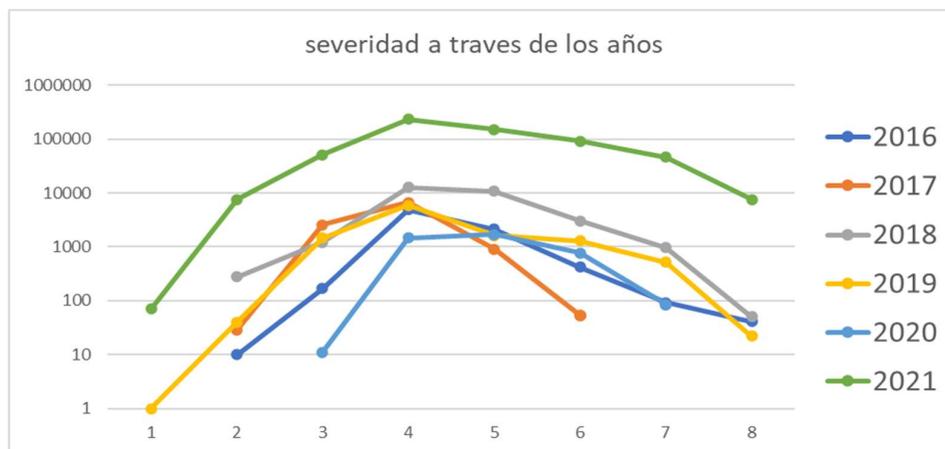


Figura 46. Aumento de la severidad en los incendios forestales a partir del 2015.

5.3 Orientación de las laderas

Se analizó el área de estudio a partir del continuo de elevaciones mexicano para la zona de estudio, y con esta se generó un mapa de orientación de laderas, con lo que se observó la manera en que los incendios forestales aumentan de tamaño en laderas con orientación Noreste y Suroeste. En cuanto a la severidad, se observó la manera en que los siniestros tienen mayor presencia de severidad en laderas que tienen su cara hacia el Noreste. Sin embargo, aquellos eventos que tienen más caras hacia el sur presentaron áreas de afectación más grandes, pero menos severas.

Al observar los datos de viento, se obtuvo que las velocidades máximas en la zona de estudio rondan los 14 km/h, y generalmente estos vientos se presentan en laderas que se forman cañones dentro de la sierra en la zona montañosa, y es en estos puntos donde se presentan los incendios de mayor severidad como se muestra en la Figura 47 . Sin embargo, los incendios de mayor proporción tienden a estar en zonas que rondan una velocidad por debajo de 8 Km/h y resultaron ser menos severos.

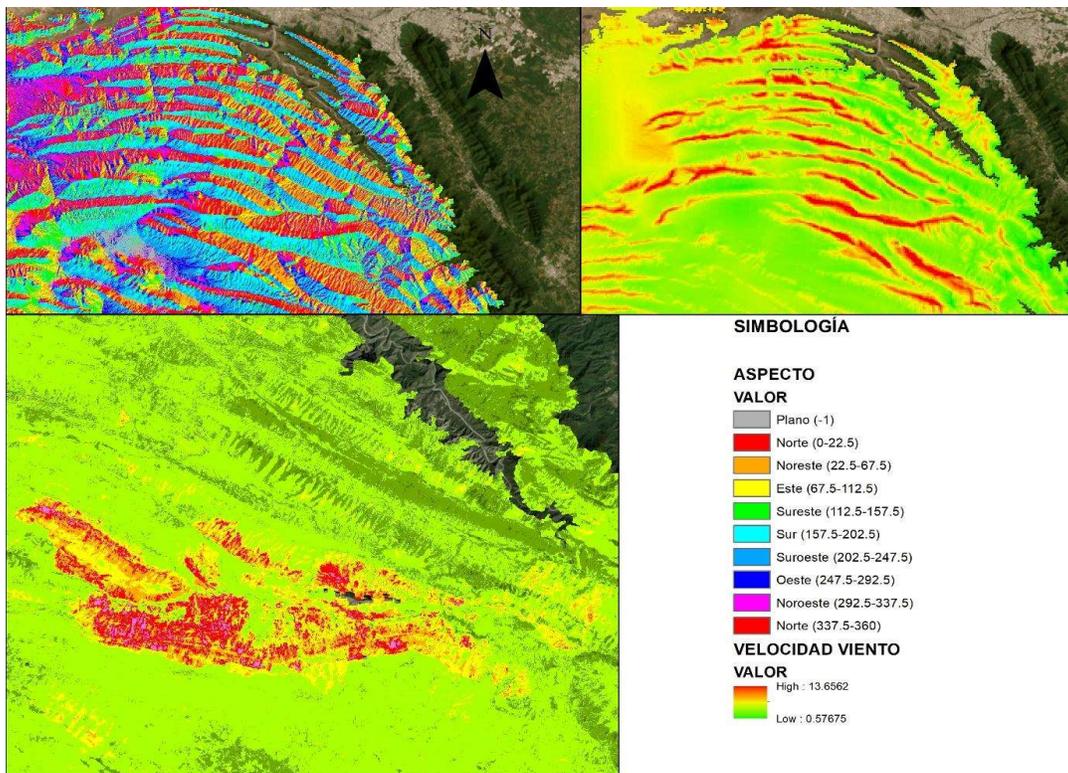
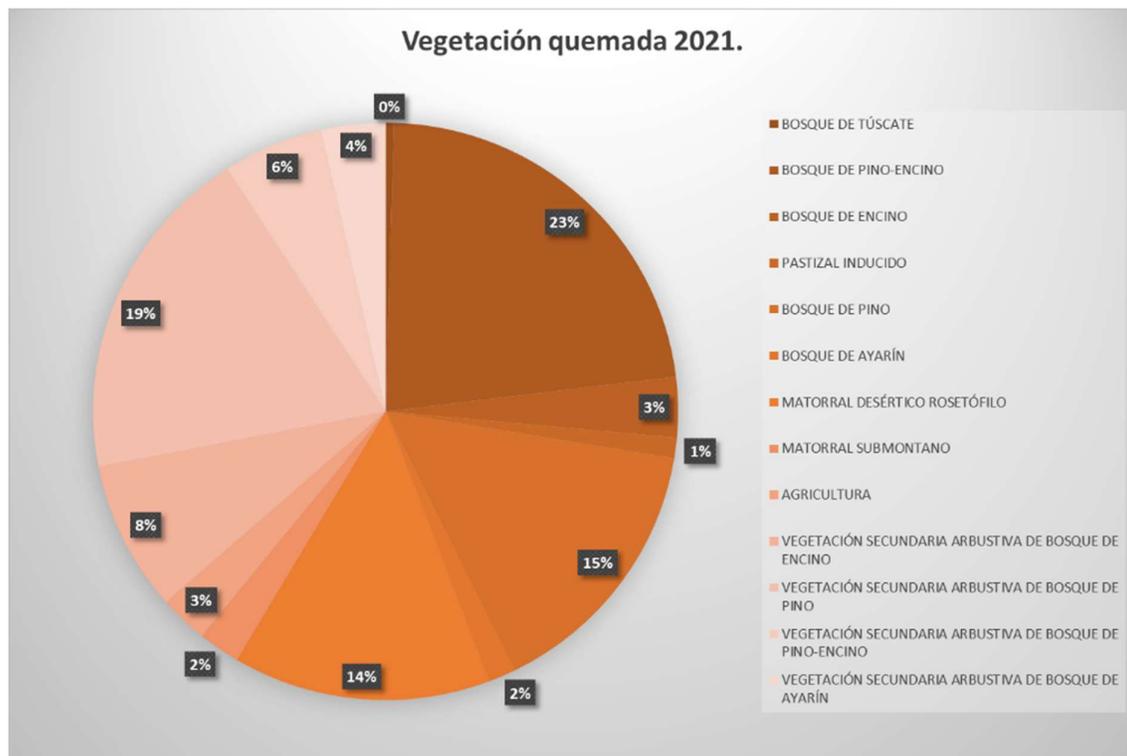


Figura 47. Orientación de las laderas respecto a incendios pasados.

5.4 Vegetación

Tomando los datos de vegetación de las zonas afectadas a partir del 2015, los incendios que mayor efecto de severidad tuvieron son aquellos que tenían presencia de bosques de encino y pino. Sin embargo, los incendios que tomaron mayor área de afectación son aquellos que en su mayoría eran matorrales.



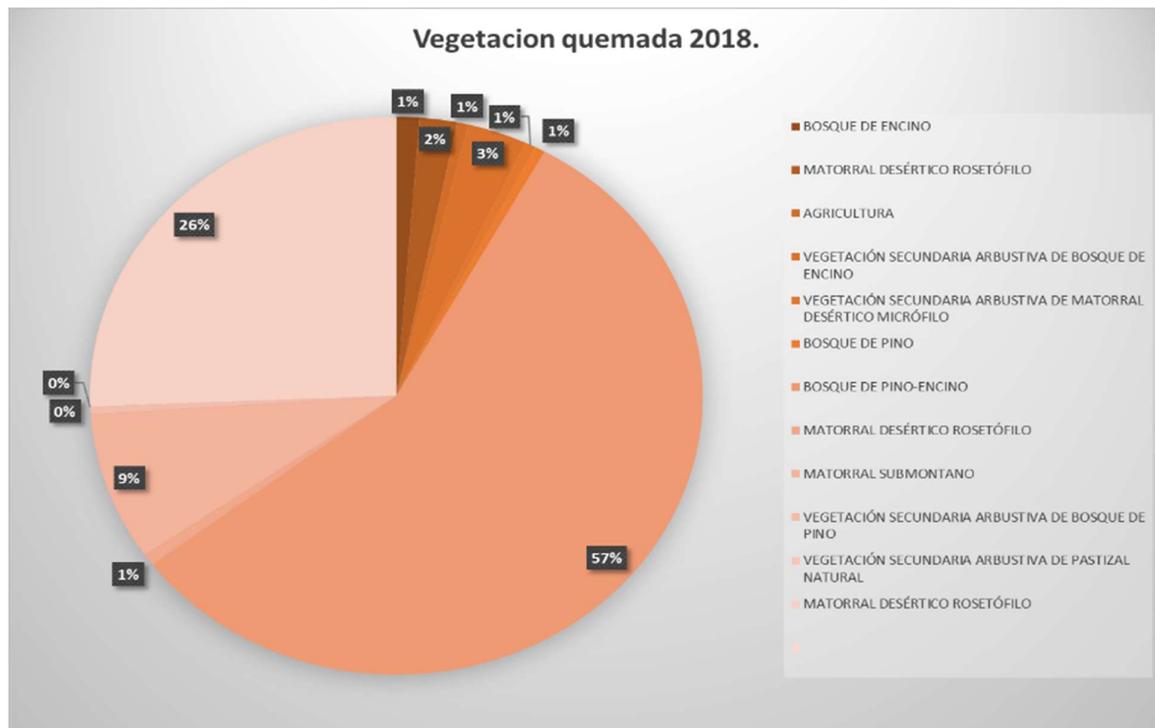


Figura 48. Comparación vegetación quemada años más severos.

5.5 Agrícola

Dentro de las zonas de incendios forestales se encontraban áreas destinadas a la agricultura. En el año 2018 se registraron los primeros datos de incendios forestales que alcanzaban zonas de agricultura, siendo equivalente a tan solo 15 hectáreas. Con el paso del tiempo este dato se ha visto incrementado, llegando a alcanzar un total de 1445 hectáreas dañadas en el año 2020.

5.6 Mapa de amenaza

Una vez se realizó el análisis de los datos anteriores, obtuvimos un mapa de riesgo mediante un modelo multicriterio, con esto se logra identificar de forma visual las zonas con mayor riesgo a que se presenten incendios forestales. Este modelo

contempló en total 11 criterios ponderados en un rango de 1 a 5. Con esto se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 49.

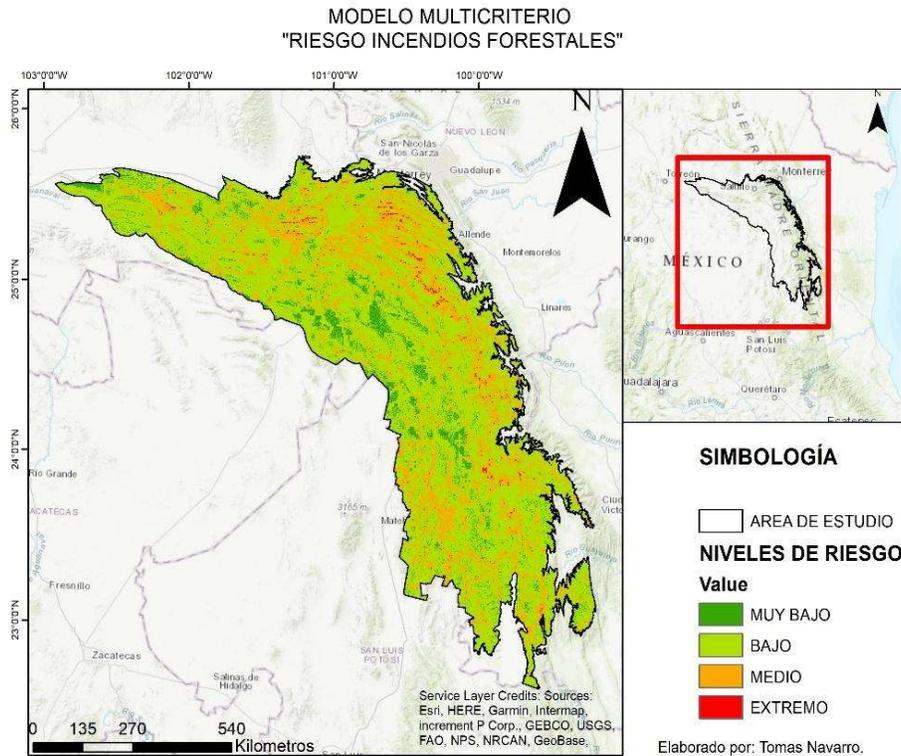


Figura 49. Modelo multicriterio de peligro.

Al generar estos resultados, pudimos analizar más a fondo tanto las zonas como las áreas que son vulnerables y destacar características de estas. Obtuvimos que el mapa presenta una gran parte de su área en una vulnerabilidad baja, y los niveles medio y extremo son mínimos, sin embargo, es importante notar que las zonas de medio y las zonas de extremo riesgo, se presentan en lugares donde ya se han registrado incendios de gran magnitud que están dentro de la base de datos de incendios históricos.

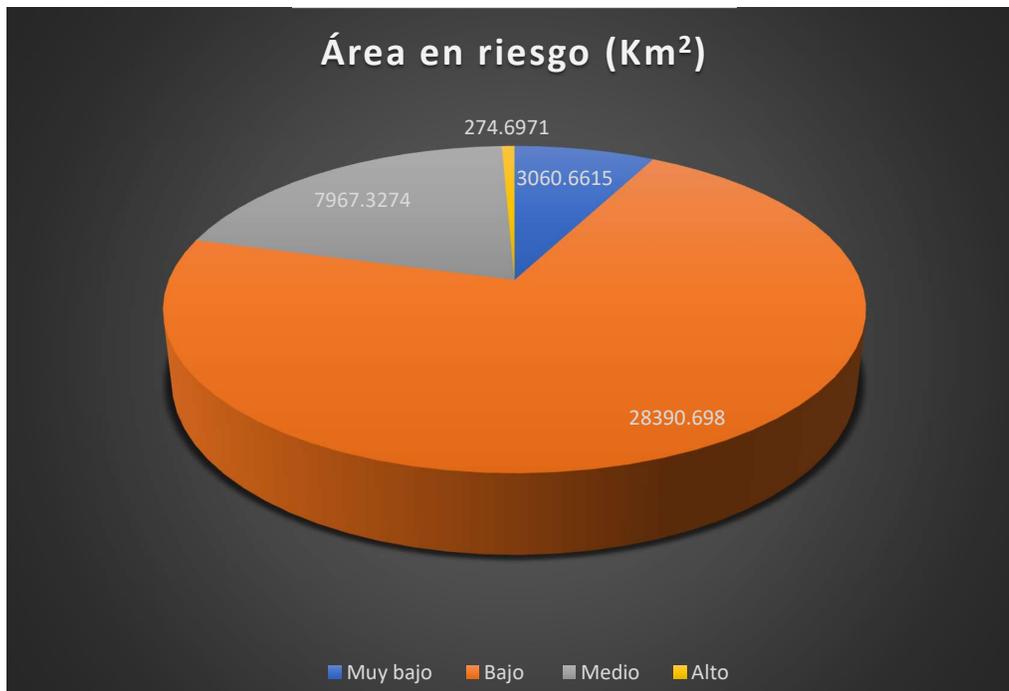


Figura 50. Áreas en peligro.

Al ver los resultados obtenemos los datos de qué área está representada por cada tipo de nivel de vulnerabilidad. Con estos datos podemos tener una representación visual más representativa de estas áreas y la proporción que ocupan

5.7 Ubicación de poblados

En base al modelo multicriterio se observa como la mayoría de las zonas de peligro están ubicadas en la zona montañosa y se puede notar la manera en que los asentamientos humanos se encuentran asentados en estas zonas. Analizando las capas de información se observa que en estas zonas de mayor riesgo son donde se concentran las variables topográficas de mayor importancia y las variables antrópicas de mayor impacto.

La zona con más concentración de poblados está en la parte noreste dentro de Nuevo León y límites de Coahuila (Figura 51). En esta misma zona se han presentado los incendios más dañinos de 2021 y 2022. También se detectó que las zonas del sur existen zonas con riesgos a incendios forestales (Figura 52), que hasta la fecha no han presentado eventos de grandes magnitudes. Comparando estas dos

zonas que son las de mayor concentración de poblados, muestra una mayor presencia en la zona norte de la zona de estudio, esto influye directamente en el aumento del nivel de riesgo.

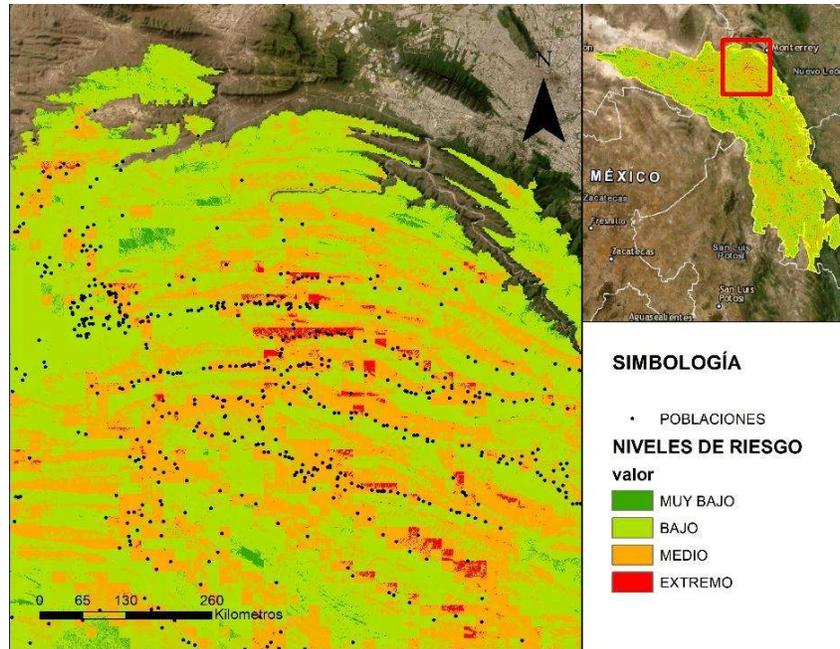


Figura 51. Poblados en zonas de peligro A.

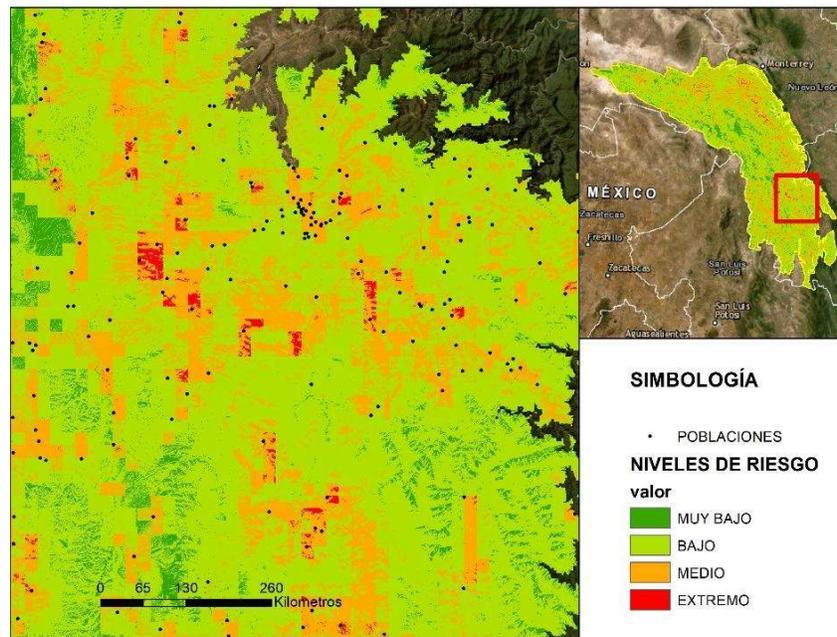


Figura 52. Poblados en zonas de peligro B.

5.8 Modelo multicriterio.

El modelo multicriterio de riesgo muestra aquellas zonas con mayor índice de riesgo en base a su capacidad de resiliencia y la vulnerabilidad de las poblaciones, en este caso las zonas con mayor riesgo se encontraron en el municipio de General Zaragoza dentro de la zona montañosa como se muestra en la Figura 53. También cabe destacar que las zonas montañosas de Aramberri presentan poblados donde se obtuvo un riesgo medio.

Mediante los datos de resiliencia se observó la forma en que se encuentran repartidos los insumos para el combate y la prevención a estos desastres naturales, dando como resultado que aquellos municipios con un giro comercial o turísticos y aquellos que colindan con la zona metropolitana de Monterrey son los que mejor capacidad tienen de ser resilientes para combatir y reponerse a estos eventos.

En cuanto a la vulnerabilidad, los poblados con mayor índice de vulnerabilidad son estos que se encuentran en zonas dentro de la sierra, a los cuales son de difícil acceso y se encuentran en zonas de alta amenaza, siendo estos en su mayoría los que se encuentran dentro del área de Galeana, San José de Boquillas, y General Zaragoza.

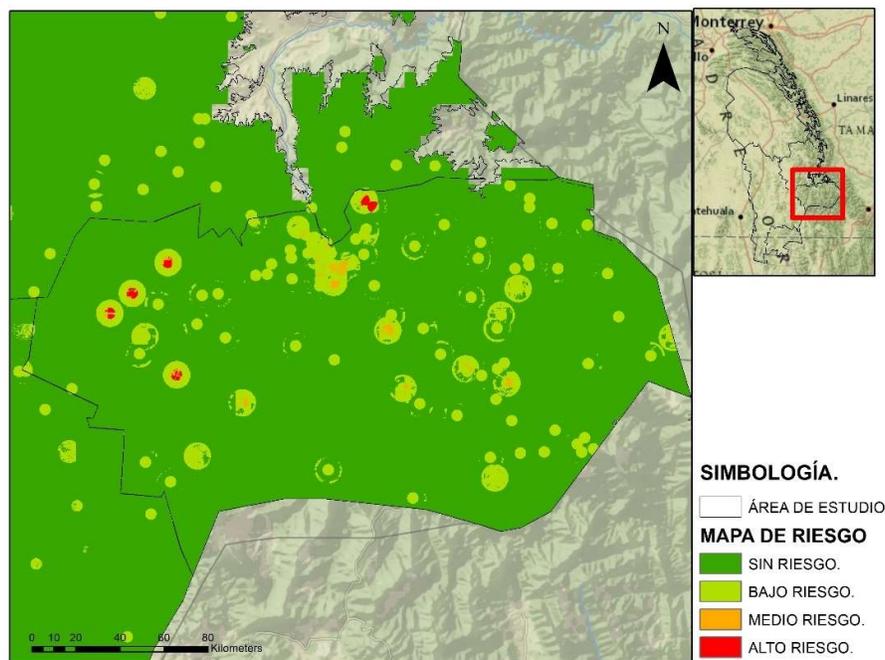


Figura 53. Acercamiento a las poblaciones en riesgo.

6 Discusión

6.1 Portales de datos abiertos y la obtención de datos base.

Al llevar a cabo el proyecto en un área tan grande la toma de datos en campo se volvería un problema, sin embargo, al contar con plataformas de datos abiertos como es el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y plataformas como FIIRMS y G.E.E. estos trabajos son posibles en un tiempo mínimo, ofreciendo un resultado confiable en el modelo multicriterio que sirva de base para toma de decisiones a partir de este.

Al realizar este Modelo Multicriterio se observó que también existen limitantes debido a la resolución obtenida por algunas fuentes de datos, como los obtenidos por medio de la CONABIO y el Global Wind Atlas que nos arrojaban píxeles demasiado grandes y esto podría provocar una pérdida de información a mediana y corta distancia. Debido a esto es posible que exista una pérdida de información.

6.2 Imágenes satelitales Landsat 8.

Para zonas tan amplias se decidió que la mejor opción al trabajar son las imágenes Landsat 8, estas tienen mejores resultados en cuanto a presencia de nubes y su resolución sigue siendo aceptable. Tomando en cuenta que existirá la limitante por medio de otras capas en cuanto a la resolución, la mejor opción fue Landsat 8. No obstante si se desea reducir estas zonas de estudio o aplicar este modelo multicriterio en zonas de menor dimensión y se buscan resultados más específicos, se ha de usar imágenes que cuenten con mejores resoluciones como son las Sentinel 2 y de ser posible generar las propias bases de datos como lo hace en su literatura Tavakkoli, S., (2021).

6.3 Google Earth Engine

Durante el planteamiento del proyecto se buscaba hacer uso de nuevas herramientas como es Google Earth Engine. Con esta plataforma conseguimos ahorrar horas de trabajo y evitar dañar el equipo con procesos prolongados, con lo cual obtener índices como fueron NDVI y dNBR resultaron ser más sencillos y cortos de tiempo, tomando en cuenta que solo debemos interpretar y ajustar códigos sin

necesidad de procesar todas las imágenes de una en una. Aprender una nueva técnica como es la programación puede tomar más tiempo del que se tuvo, por lo tanto, en este estudio se buscó apoyo en distintas literaturas las cuales hacían uso de esta herramienta y se planteó un uso práctico, pero preciso, sin embargo, las aplicaciones en ese ámbito son muy amplias como lo muestran Tavakkoli, S., et al., (2021).

6.4 Modelo multicriterio

Este Modelo Multicriterio nos da una vista previa de las zonas que presentan riesgo de que se vean afectados por incendios forestales, y esto se tomará en cuenta para la toma de decisiones respecto a acciones preventivas contra los incendios forestales como se han realizado en distintas zonas de Estados Unidos Alexandre, P., (2013) y Sadasivuni R., (2012).

Los factores de mayor importancia en este modelo fueron los generados en base a los datos ambientales con una carga del 32% en base la ponderación del modelo, por lo tanto, se cumple lo abordado por Muñoz, C., (2003). Que aborda el valor de la carga del material combustible como principal importancia en el comportamiento de los incendios forestales y como la calidad de la vegetación obtenida en base al NDVI influye en el comportamiento y el riesgo de los incendios forestales.

Durante el estudio se observó cómo los valores más altos de área afectada fueron aquellos que se rigieron por la topografía, pues como explica Chuvieco, E., (2007) existe una correlación directa entre incendios forestales y estas características. Debido a estos resultados se puede comprobar que este punto es confiable y la topografía siempre debe tomarse en cuenta al hablar de incendios forestales y sus áreas de riesgo.

Otro punto de importancia durante el modelaje fue la implementación de la actividad e influencia de la interacción humana con las zonas boscosas. Si bien durante este estudio se limitaron las variables antrópicas a tres tipos de actividades humanas, es importante desarrollar más a fondo este punto, pues como lo explican Jin, S. et al. (2019) y Sadasivuni R., (2012), existe una correlación entre actividades humanas, su estado socioeconómico y el aumento en el número de incendios

forestales. Por lo tanto, se ha de estudiar más a detalle estos factores como lo invita Vicente, F., (2012).

Con este trabajo se buscó que la ejecución de acciones preventivas vaya más allá de las aplicadas en el artículo 75 de la Ley General de Protección Civil federal. Que estipula acciones preventivas dentro de la ocurrencia de incendios forestales que pongan en riesgo asentamientos humanos en zonas de alto riesgo (Ley General de Protección Civil, 2021), estas entran en acción una vez iniciados los incendios forestales y lo que se busca ha de ser acciones preventivas a la presencia de estos. Por esto es recomendable realizar un protocolo que involucre medidas preventivas que como puede ser infraestructura variada, como puede ser el uso de elementos de ruptura de avance de fuego aplicando franjas cortafuegos (Vélez et al, 2000) o áreas cortafuego, despalmes en laterales de derechos de vías y la construcción de torres de vigilancia como las que han implementado en distintas zonas montañosas en España (Ministerio de agricultura, pesca y alimentación).

6.5 Resolución de información

Al buscar información acerca de las condiciones de vulnerabilidad y resiliencia de las zonas de Tamaulipas y Coahuila se hizo notable la falta de datos a nivel municipal, consiguiendo que se generará un sesgo de información que podría haber afectado al modelo final. Esto lleva a considerar que hace falta desarrollar más los datos de vulnerabilidad socioeconómica y generar un plan de mejor calidad como lo expresa Fernández V., (2012) en su estudio "Diseño de un modelo de riesgo integral de incendios forestales mediante técnicas multicriterio y su automatización en sistemas de información geográfica".

7 Recomendaciones

Se recomendaría desarrollar más las variables antrópicas como puede ser la densidad en poblaciones y condiciones socioeconómicas.

Realizar una adaptación de este modelo en zonas de menor dimensión, enfocada en las zonas con mayor presencia de niveles riesgo a partir del modelo multicriterio generado en este estudio.

En caso de realizar este tipo de modelos a menor escala, generar las bases de datos, generar nuevos datos con otros elementos mediante sensores remotos y el uso de VANT's, podría ayudar en la búsqueda de mejores resoluciones. Así como realizar investigación más enfocada en el impacto que tiene el crecimiento de la población en el aumento del número de incendios forestales.

Considerar el uso de estudios directos en términos de vulnerabilidad, buscando así conocer de manera que sirva como validación las condiciones de los poblados que se van a evaluar, y con esto conseguir un mejor resultado en estos insumos.

8 Conclusión

Mediante los Sistemas de Información Geográfica y con los sensores remotos, es posible crear un modelo que sea aplicable en zonas amplias y sea actualizable según las condiciones lo requieran. Comprobando así la confiabilidad en el abanico de herramientas para la creación de base de datos, como lo fueron las plataformas GEE, FIRMS, SPPIF, entre otros. Obteniendo la información necesaria para crear una base de datos que formará parte de nuestro modelo de SIG y cumplir con los objetivos planteados.

El riesgo extremo y alto a incendios forestales presentan baja presencia, pero son zonas uniformes las que se encuentran en estos rangos, además de que presentan un alto grado de presencia humana, lo cual significa un riesgo para las personas y para la vegetación de la zona.

Se abordaron distintas variables que unen un amplio número de estudios previos para la creación de modelos, tomando así factores previamente no incluidos en un mismo modelo, como fue la unión de datos forestales y datos antrópicos.

En este proyecto se diseñó un modelo para la toma de decisiones mediante un modelo multicriterio que sirve como identificador de zonas de riesgo para incendios forestales, y en base a esto se han de tomar medidas preventivas para estos eventos o inclusive ayuda a tomar decisiones en cuanto a planeamiento urbano en zonas dentro de la Sierra Madre Oriental.

9 Referencias bibliográficas

- Alegría Tardón, R. E. (2020). Estudio y evaluación del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal de las comunas que componen el Área Metropolitana de Valparaíso: periodo 2000-2017.
- Alexandre, P. M., Mockrin, M. H., Stewart, S. I., Hammer, R. B., & Radeloff, V. C. (2014). Rebuilding and new housing development after wildfire. *International Journal of Wildland Fire*, 24(1), 138-149.
- Avand, M.; Kuriqi, A.; Khazaei, M.; Ghorbanzadeh, O. DEM resolution effects on machine learning performance for flood probability mapping. *J. Hydro-Environ. Res.* 2022, 40, 1–16.
- Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Monjarás-Vega, N. A., Briseño-Reyes, J., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., ... & Parks, S. A. (2020). Near real-time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. *Remote Sensing*, 12(12), 2061.
- Catry, F. X., Rego, F. C., Santos, T., Almeida, J., & Relvas, P. (2007, May). Forest fires prevention in Portugal—using GIS to help improving early fire detection effectiveness. In *Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference* (pp. 13-17).
- Castellnou, M., Rodríguez, L., Miralles, M., Operativa, D., de Emergències, D. G., & Civil, S. (2005). El problema de las urbanizaciones y el fuego forestal. Aportaciones desde la experiencia en Cataluña durante la campaña forestal del 2003. In *II Conferencia Internacional sobre Estrategias de Prevención de Incendios*.
- Chávez-Cortés, M. M., Binnqüist-Cervantes, G., & Salas-Flores, A. C. (2017). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(10), 97-109.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Martín, P., Vilar, L., ... & Salas, J. (2007). Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG. *Teledetección-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Madrid: Editorial Martín, 19-26.
- CIVIL, D. D. P., & DE, A. D. E. NUEVO LEÓN; y. Reformado, PO día, 5.

- CIVIL, L. G. D. P. (2012). Ley General de Protección Civil.
- Escobedo Tamez, A. N., & Yépez Rincón, F. D. (2019). Diseño y evaluación de un método de inspección no destructivo para ubicar y determinar características geométricas de zonas con agrietamientos en estructuras de concreto reforzado (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Eskandari, S., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2021). Fire-susceptibility mapping in the natural areas of Iran using new and ensemble data-mining models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(34), 47395-47406.
- Estrada, L. I. R., Lozano, J. L. R., Trejo, D. A. R., & Villanueva-Morales, A. (2022). Susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México: una priorización basada en el enfoque multicriterio. *Sociedad y Ambiente*, (25), 1-35.
- Gholamnia, K.; Gudiyangada Nachappa, T.; Ghorbanzadeh, O.; Blaschke, T. Comparisons of Diverse Machine Learning Approaches for Wildfire Susceptibility Mapping. *Symmetry* 2020, 12, 604.
- Ghorbanzadeh, O.; Blaschke, T.; Gholamnia, K.; Aryal, J. Forest fire susceptibility and risk mapping using social/infrastructural vulnerability and environmental variables. *Fire* 2019, 2, 50.
- Ghorbanzadeh, O.; Valizadeh Kamran, K.; Blaschke, T.; Aryal, J.; Naboureh, A.; Einali, J.; Bian, J. Spatial Prediction of Wildfire Susceptibility Using Field Survey GPS Data and Machine Learning Approaches. *Fire* 2019, 2, 43.
- González-Gaudio, E. J., & Maldonado-González, A. L. (2017). Amenazas y riesgos climáticos en poblaciones vulnerables: el papel de la educación en la resiliencia comunitaria. *Amenazas y riesgos climáticos en poblaciones vulnerables: el papel de la educación en la resiliencia comunitaria*, 273-294.
- Gudiyangada Nachappa, T.; Tavakkoli Piralilou, S.; Ghorbanzadeh, O.; Shahabi, H.; Blaschke, T. Landslide Susceptibility Mapping for Austria Using Geons and Optimization with the Dempster-Shafer Theory. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5393.

- H. Liang, M. Zhang and H. Wang, "A Neural Network Model for Wildfire Scale Prediction Using Meteorological Factors," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 176746-176755, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957837.
- Iban, M. C., & Sekertekin, A. (2022). Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey. *Ecological Informatics*, 69, 101647.
- Kalantar, B.; Ueda, N.; Idrees, M.O.; Janizadeh, S.; Ahmadi, K.; Shabani, F. Forest fire susceptibility prediction based on machine learning models with resampling algorithms on remote sensing data. *Remote Sens.* 2020, 12, 3682.
- Kim, S. J., Lim, C. H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., ... & Lee, W. K. (2019). Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing*, 11(1), 86.
- Liang, H., Zhang, M., & Wang, H. (2019). A neural network model for wildfire scale prediction using meteorological factors. *IEEE Access*, 7, 176746-176755.
- Ljubomir, G.; Pamučar, D.; Drobnjak, S.; Pourghasemi, H.R. Modeling the Spatial Variability of Forest Fire Susceptibility Using Geographical Information Systems and the Analytical Hierarchy Process. In *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 337–369.
- López, F. J. D. V. (2012). Diseño de un modelo de riesgo integral de incendios forestales mediante técnicas multicriterio y su automatización en sistemas de información geográfica: una aplicación en la Comunidad Valenciana (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Loveland, T.R.; Dwyer, J.L. Landsat: Building a strong future. *Remote Sens. Environ.* 2012, 122, 22–29.
- Malpartida Mauricio, R. C. (2016). Riesgo a incendios forestales en la provincia de Satipo–Junín.
- Martín, M. P., Chuvieco, E., & Aguado, I. (1998). La incidencia de los incendios forestales en España.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.

- Mireles Soria, D. L. (2021). Elaboración de un modelo multicriterio con base SIG para el manejo integral de ríos urbanos utilizando VANTS y tecnología espectral (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Molina, J.R.; Gonzalez-Caban, A.; Rodriguez, Y.S.F. Wildfires impact on the economic susceptibility of recreation activities: Application in a Mediterranean protected area. *J. Environ. Manag.* 2019, 245, 454–463.
- Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, L., Carrión-Mero, P., Velastegui-Montoya, A., & Berrezueta, E. (2022). Forest fire assessment using remote sensing to support the development of an action plan proposal in Ecuador. *Remote Sensing*, 14(8), 1783.
- Muñoz Robles, C. A., Treviño Garza, E. J., Verástegui Chávez, J., Jiménez Pérez, J., & Aguirre Calderón, O. A. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones geográficas*, (56), 101-117.
- Penman, Trent & Nicholson, Ann & Bradstock, Ross & Collins, Luke & Penman, Sandra & Price, Owen. (2015). Reducing the risk of house loss due to wildfires. *Environmental Modelling & Software*. 67. 10.1016/j.envsoft.2014.12.020.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Potvin, D. A., Parris, K. M., Smith Date, K. L., Keely, C. C., Bray, R. D., Hale, J., ... & Melville, J. (2017). Genetic erosion and escalating extinction risk in frogs with increasing wildfire frequency. *Journal of Applied Ecology*, 54(3), 945-954.
- Pourtaghi, Z.S.; Pourghasemi, H.R.; Rossi, M. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. *Environ. Earth Sci.* 2015, 73, 1515–1533.
- R.A. Bradstock, G.J. Cary, I. Davies, D.B. Lindenmayer, O.F. Price, R.J. Williams, Wildfires, fuel treatment and risk mitigation in Australian eucalypt forests: Insights from landscape-scale simulation, *Journal of Environmental Management*, Volume 105, 2012, Pages 66-75, ISSN 0301-4797.
- Rodríguez, M. P. R., Rodríguez, Y. C., Sierra, C. A. M., Batista, A. C., & Tetto, A. F. (2017). Relación entre variables meteorológicas e incendios forestales en la Provincia Pinar del Río, Cuba. *Floresta*, 47(3).

- Rojo, a. B. Propuesta de una metodología para crear mapas de peligros naturales en guipúzcoa utilizando sig.
- Romero, F. S. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, (24).
- Ruiz, J. S., & Ramírez, R. G. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 12(2), 167-174.
- Sadasivuni, R., Cooke, W. H., & Bhushan, S. J. E. M. (2013). Wildfire risk prediction in southeastern Mississippi using population interaction. *Ecological Modelling*, 251, 297-306.
- Salinero, E. C. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Rev. Real Acad. Cienc. Exactas Físicas Nat*, 103, 173-182.
- Sánchez, S., Zanvettor, R. E., Grilli, M. P., & Ravelo, A. C. (2021). Impacto de la sequía en los incendios forestales en las Sierras de Córdoba, Argentina.
- Schlögel, R.; Marchesini, I.; Alvioli, M.; Reichenbach, P.; Rossi, M.; Malet, J.-P. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models. *Geomorphology* 2018, 301, 10–20.
- Shakesby, R.A. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Sci. Rev.* 2011, 105, 71–100.
- Simental Avila, J., & Pompa García, M. (2016). Incendios forestales: autocorrelación espacial de topografía y temporalidad. *Ciencia UANL*, 19(77), 41-41.
- Sosa-Valdés, R., Garza-Martínez, M. A., & Yépez-Rincón, F. D. MODELO PREDICTIVO DE LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO UTILIZANDO PERCEPCIÓN REMOTA.
- Tavakkoli Piralilou, S., Einali, G., Ghorbanzadeh, O., Nachappa, T. G., Gholamnia, K., Blaschke, T., & Ghamisi, P. (2022). A Google Earth Engine approach for wildfire susceptibility prediction fusion with remote sensing data of different spatial resolutions. *Remote sensing*, 14(3), 672.

- Terán, O. H. E., i Perpinyà, A. B., & i Traveria, M. G. (2022). Google Earth Engine aplicado al monitoreo de superficies quemadas y cambios de coberturas y usos del suelo. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (29), 89-113.
- Tian, Y.; XiaO, C.; Liu, Y.; Wu, L. Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: A case study of Shenzhen. *Sci. China Ser. E Technol. Sci.* 2008, 51, 188–198.
- Tien Bui, D.; Le, K.-T.; Nguyen, V.; Le, H.; Revhaug, I. Tropical Forest Fire Susceptibility Mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, Using GIS-Based Kernel Logistic Regression. *Remote Sens.* 2016, 8, 347.
- Valdez, M. C., Chang, K. T., Chen, C. F., Chiang, S. H., & Santos, J. L. (2017). Modelling the spatial variability of wildfire susceptibility in Honduras using remote sensing and geographical information systems. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 876-892.
- Vallejo, I., Navarro, M., & Navarro, D. (2020). Análisis de la vulnerabilidad social a los riesgos naturales mediante técnicas estadísticas multivariantes. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (74), 29-49.
- Vega-Nieva, D. J., Briseño-Reyes, J., Nava-Miranda, M. G., Calleros-Flores, E., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., ... & Preisler, H. K. (2018). Developing models to predict the number of fire hotspots from an accumulated fuel dryness index by vegetation type and region in Mexico. *Forests*, 9(4), 190.
- Verde, J.; Zêzere, J. Assessment and validation of wildfire susceptibility and hazard in Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010, 10, 485–497.
- Villalobos, R., Retana, J. A., & Acuña, A. (2000). El Niño y los incendios forestales en Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr*, 7(1), 1-20.
- Wong González, J. C., & Villers Ruiz, M. D. L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones geográficas*, (62), 87-103.
- Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire risk assessment and zoning by integrating Maxent and GIS in Hunan province, China. *Forests*, 12(10), 1299.

10 Anexos

Anexo 1. Eventos registrados manualmente.

Incendios forestales históricos sierra madre oriental		
Número incendio	Fechas del incendio	
	Inicio	Fin
2021		
incendio 1	16/03/2021	30/03/2021
incendio 2	25/03/2021	29/04/2021
incendio 3	18/03/2021	29/04/2021
incendio 4	14/03/2021	18/03/2021
incendio 5	25/02/2021	16/04/2021
incendio 6	26/03/2021	27/03/2021
incendio 7	15/03/2021	09/04/2021
incendio 8	20/04/2021	28/04/2021
2020		
incendio 1	12/04/2020	12/04/2020
incendio 2	22/04/2020	24/04/2020
2019		
incendio 1	17/05/2019	26/05/2019
incendio 2	04/04/2019	04/04/2019
2018		
incendio 1	15/07/2018	30/07/2018
incendio 2	03/04/2018	07/06/2018
incendio 3	17/04/2018	17/04/2018
2017		
incendio 1	28/04/2017	30/04/2017
incendio 2	30/04/2017	30/04/2017
incendio 3	27/04/2017	29/04/2017
2016		
incendio 1	23/03/2016	04/04/2016
incendio 2	01/04/2016	01/04/2016
2015		
APARENTEMENTE SIN INCIDENTES		

Anexo 2. Eventos registrados CONAFOR 2015.

2015		
ID_CPC	FECHA	HA
2380639	2015	22.0191400000

Anexo 3. Eventos registrados CONAFOR 2016.

2016		
ID_CPC	FECHA	HA
2391912	2016	4.7077000000
2392323	2016	185.2211400000
2392358	2016	452.8171600000
2392402	2016	19.6649800000

Anexo 4. Eventos registrados CONAFOR 2017.

2017		
ID_CPC	FECHA	HA
2406708	2017	380.3825400000
2406818	2017	159.6353800000
2406954	2017	372.3416800000
2407463	2017	6.9581500000

2018		
ID_CPC	FECHA	HA
2419017	2018	8.8579100000
2419024	2018	20.8569400000
2419078	2018	42.8577600000
2419142	2018	98.7875000000
2419160	2018	130.0400100000
2419231	2018	19.1577400000
2419239	2018	561.3269800000
2419270	2018	7.2208200000
2419472	2018	68.1971500000
2419484	2018	2173.7607000000
2419552	2018	10.2865500000
2419825	2018	46.4682200000

Anexo 5. Eventos registrados CONAFOR 2019.

2019		
ID_CPC	FECHA	HA
2435077	2019	30.9818200000
2435097	2019	2.3723000000
2435153	2019	26.0015300000
2435199	2019	15.3531300000
2435231	2019	71.6265500000
2435250	2019	68.1617800000
2435291	2019	10.9974000000
2435336	2019	11.0753400000
2435425	2019	28.8817300000
2435426	2019	17.1976600000
2435621	2019	8.6162200000
2435834	2019	15.8661500000
2435836	2019	662.1529000000
2435887	2019	9.3161100000

Anexo 6. Eventos registrados CONAFOR 2020

2020		
ID_CPC	FECHA	HA
7805030	2020	202.8719500000
7805118	2020	6.7097800000
7805144	2020	13.0512100000
7805274	2020	2.8070700000
7805388	2020	103.7966700000
7805390	2020	10.0708000000
7805446	2020	17.4111500000

Anexo 7. Eventos registrados CONAFOR 2021.

2021		
ID_CPC	FECHA	HA
22417538	2021	462.28651
22417570	2021	1779.99956
22417636	2021	1.7405600
22417694	2021	241.159600
22417759	2021	109.030470
22417786	2021	3.00867000
22417788	2021	92.0512800
22417797	2021	2009.81035
22417801	2021	3321.33097
22417866	2021	15.54372
22417884	2021	9.95200
22417978	2021	4.63464000
22417999	2021	4353.34594
22418043	2021	37.30517
22418044	2021	30.7473800
22418046	2021	24.67613
22418049	2021	59.849570
22418059	2021	212.016970
22418103	2021	3554.93940
22418134	2021	1098.28705
22418157	2021	475.80816
22418202	2021	7106.699670
22418267	2021	285.24186
22418285	2021	8596.4886600
22418292	2021	2685.8334600

Anexo 8. Eventos registrados CONAFOR 2022.

2022		
ID_CPC	FECHA	HA
34702637	2022	171.7741800000
34702715	2022	182.5267500000
34702789	2022	12087.7434800000
34702864	2022	1166.1763400000
34702876	2022	443.3647700000
34702890	2022	2720.9657500000
34702903	2022	363.1176500000
34702978	2022	444.5255400000
34702988	2022	891.9023900000
34703003	2022	3361.6789500000
34703038	2022	278.6217100000
34703040	2022	150.8375400000
34703042	2022	49.4617900000
34703047	2022	84.9310300000
34703058	2022	163.1601000000
34703158	2022	49.3727500000
34703248	2022	2.3373700000
34703278	2022	1349.9791400000
34703288	2022	3.8170500000
34703308	2022	25.6299100000
34703326	2022	5.4772200000
34703337	2022	360.5548600000
34703339	2022	25.7996700000
34703342	2022	354.3418900000
34703368	2022	2022.5221400000
34703373	2022	9246.5288300000
34703396	2022	504.8430000000
34703406	2022	3.9093500000
34703469	2022	22.0079500000