



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**“ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE
INCENDIOS FORESTALES EN EL PARQUE
NACIONAL CAÑÓN DEL SUMIDERO.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE Y
GESTIÓN DE RIESGOS.**

PRESENTA

JOSUÉ ALEXIS CLEMENTE QUEZADA.

DIRECTOR

**DR. ROBERTO HORACIO ALBORES ARZATE.
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

CODIRECTORA

**DRA. MICHELLE FARFÁN GUTIÉRREZ.
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

ASESORES

**MTRO. ROBERTO MORENO CEBALLO.
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DR. JORGE ANTONIO PAZ TENORIO.
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Marzo de 2024



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**“ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE
INCENDIOS FORESTALES EN EL PARQUE
NACIONAL CAÑÓN DEL SUMIDERO.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE Y
GESTIÓN DE RIESGOS.**

PRESENTA

JOSUÉ ALEXIS CLEMENTE QUEZADA.

DIRECTOR

**DR. ROBERTO HORACIO ALBORES ARZATE.
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

CODIRECTORA

**DRA. MICHELLE FARFÁN GUTIÉRREZ.
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

ASESORES INTERNOS

**MTRO. ROBERTO MORENO
CEBALLO
DR. JORGE ANTONIO PAZ
TENORIO**

ASESORES EXTERNOS

**DR. CARLOS DE JESÚS OCAÑA
PARADA
MTRA. EDALÍ CAMACHO RUÍZ**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Marzo de 2024



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 22 de febrero de 2024

Oficio No. SA/DIP/0132/2024

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Josué Alexis Clemente Quezada
CVU: 1194753
Candidato al Grado de Maestro en Ciencias en
Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos
Facultad de Ingeniería
UNICACH
P r e s e n t e

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Estimación y evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el parque nacional cañón del sumidero** cuyo Director de tesis es el Dr. Roberto Horacio Albores Arzate (CVU: 339480) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Ciencias en Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Carolina Orantes García
Directora



C.c.p. Ing. Mónica Catalina Cisneros Ramos, Directora de la Facultad de Ingeniería, UNICACH. Para su conocimiento.
Dr. Arturo Carrillo Reyes, Coordinador del Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNICACH. Para su conocimiento.
Archivo/minutario.

RJAG/COG/igp/gtr

2024 Año de Felipe Carrillo Puerto
BENEMÉRITO DEL PROLETARIADO,
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR DEL MAYAB.



Dirección de Investigación y Posgrado
Libramiento Norte Poniente 1550 C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Teléfono: (961) 61 70440 Ext: 4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

AGRADECIMIENTOS.

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis:

En primer lugar, quiero elevar mi gratitud a Dios por su constante guía, fortaleza y bendiciones a lo largo de este viaje académico. En cada paso, me ha otorgado la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar los desafíos y alcanzar este logro.

Agradezco de corazón a mis amados padres por ser el pilar de mi vida, por su amor incondicional y por los sacrificios que realizaron para brindarme la oportunidad de alcanzar mis metas académicas.

Expreso mi sincero agradecimiento a mis hermanos por su apoyo incondicional, su ánimo constante y su comprensión durante los momentos de dedicación exclusiva a este proyecto

Mi más profundo reconocimiento al Doctor Roberto Albores y a la Doctora Michelle Farfán por su dedicación, orientación y sabiduría compartida a lo largo de este proceso. Sus consejos expertos fueron guiándome hacia la conclusión de este proyecto.

Asimismo, quiero agradecer al Maestro Roberto y al Doctor Jorge Paz por el apoyo incondicional y sus valiosas enseñanzas, las cuales fueron fundamentales para mi crecimiento académico y personal.

Además, deseo agradecer al Doctor Arturo Carrillo y a la Licenciada Vianey, coordinadores de la maestría, por su apoyo, orientación y liderazgo en el programa. Su dedicación ha sido fundamental para mi desarrollo académico y la culminación exitosa de este proyecto de investigación.

Por último, deseo reconocer el apoyo fundamental del Ingeniero Roberto Escalante López, Director del Parque Nacional Cañón del Sumidero, y al Ingeniero Darinel Velázquez Pérez, encargado del manejo del fuego en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, por su generosidad al proporcionar acceso a información crucial para mi estudio y por su dedicación a la conservación del medio ambiente.

A todas estas personas e instituciones, les estoy profundamente agradecido por su generosidad, colaboración y confianza en mí. Este logro no habría sido posible sin su invaluable contribución.

Que este trabajo sea un tributo a la confianza depositada en mí y un testimonio de mi profundo agradecimiento hacia aquellos que han sido parte de este camino hacia el conocimiento y la realización personal.

¡A Dios y a todos ustedes, mi más sincero agradecimiento!

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO 1. GENERALIDADES	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Antecedentes.....	6
1.2.1 Internacional.....	6
1.2.2 Nacional.....	10
1.2.3 Local.....	13
1.3 Planteamiento del problema.....	14
1.4 Justificación.....	16
1.6 Objetivos de la investigación.....	18
1.6.1 Objetivo general.....	18
1.6.2 Objetivos específicos.....	18
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	19
2.1 Área Natural Protegida (ANP).....	19
2.2 Incendios forestales.....	22
2.2.1 Tipos de incendios forestales.....	23
2.2.2 Causas principales de los incendios forestales.....	24
2.2.3 Factores que determinan un incendio forestal.....	26
2.2.4 Daños y efectos de los incendios forestales.....	26
2.2.5 Manejo integral del fuego.....	28
2.4 Sistema de información geográfica (SIG).....	31
2.4.1 Definición.....	31
2.4.2 Componentes de un SIG.....	32
2.5 Conceptualización del riesgo.....	34
2.5.1 Amenaza.....	35
2.5.2 Vulnerabilidad.....	36
2.5.3 Riesgo.....	38
2.5.4 Gestión de riesgos.....	40
2.5.5 Gestión correctiva y prospectiva.....	42
2.6 Desarrollo sustentable.....	44

2.7 Modelo espacialmente explícito.	46
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	48
3.1 Características del Parque Nacional Cañón del Sumidero.	48
3.1.1 Ubicación geográfica.	48
3.1.2 Tipos de suelo.	50
3.1.3 Geología.	50
3.1.4 Clima.	50
3.1.5. Topografía.	51
3.1.6 Uso de suelo y vegetación.	51
3.1.7 Tipos de ecosistemas forestales.	53
3.2 Registro histórico de incendios ocurridos.	60
3.3 Identificación de áreas quemadas.	62
3.4 Insumos cartográficos para la calibración del modelo de riesgo.	63
3.5 Aplicación de geoprocesos y calibración del modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales.	66
3.5.1 Construcción del modelo.	66
3.5.2 Cálculo de la matriz de transición de Markov.	66
3.5.3 Calibración del modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales.	68
3.6 Evaluación de la probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales con el estadístico de la curva ROC.	70
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	72
4.1 Cálculo de áreas quemadas.	72
4.2 Estadísticas de superficies afectadas por incendios forestales.	75
4.3 Matrices de transición.	78
4.4 Generación de mapa de calor.	80
4.5 Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.	82
4.6 Evaluación del modelo de probabilidad.	86
CAPITULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	88
5.1 Discusión.	88
5.2 Conclusión.	91
GLOSARIO.	92
RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de las Área Naturales Protegidas en México. Fuente: Sistema de Información, Monitoreo y evaluación para la conservación “SIMEC”, CONANP.....	21
Figura 2: Triángulo de manejo del fuego.	29
Figura 3: Triángulo del Manejo Integral del Fuego	30
Figura 4: Ciclo de un Sistema de Información Geográfica (SIG).....	32
Figura 5: Mapa de ubicación de la zona de estudio.	49
Figura 6: Grafica de la clasificación de los ecosistemas forestales de acuerdo con el régimen de fuego que poseen en el PNCS. Elaboración propia.....	53
Figura 7: Mapa edafológico del PNCS.	54
Figura 8: Mapa geológico del PNCS.....	55
Figura 9: Mapa de climas del PNCS.	56
Figura 10: Mapa topográfico del PNCS.....	57
Figura 11: Mapa de uso de suelo y vegetación del PNCS.	58
Figura 12: Mapa de ecosistemas forestales en presencia del fuego del PNCS.	59
Figura 13: Composición de una imagen a falso color basada en el infrarrojo cercano para Sentinel 2 (en la banda 8) generando composiciones RGB (843) respectivamente para permitir realzar la vegetación de manera análoga.....	62
Figura 14: Variables utilizadas en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Elaboración propia.	65
Figura 15: Cálculo de la matriz de transición: El número de píxeles que pasan de azul a rojo son 2 de 3 píxeles y los que pasan de rojo a azul son de 4 a 6.	67
Figura 16: Diagrama modelo de cálculo de las matrices de transición.	68
Figura 17: Mapa de áreas quemadas del 2016 al 2021 dentro del PNCS.	73
Figura 18: Superficies quemadas cartografiadas y superficies reportadas por la CONANP del 2016 al 2021, en el PNCS. Elaboración propia.	74
Figura 19: Diagrama de Prueba de Hipótesis.....	75
Figura 20: Superficie (en ha) de bosques afectados por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.....	76
Figura 21: Superficie (en ha) de selva baja afectada por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.....	76
Figura 22: Superficie (en ha) de selva mediana afectada por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.	77
Figura 23: Superficie (en ha) de pastizales afectados por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.....	77
Figura 24: Superficie (en ha) de tierras agrícolas afectadas por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.	78
Figura 25: Diagrama de flujo que representa las transiciones de la cubierta forestal y usos de suelo a áreas quemadas que fueron definidas en el modelo de manera anual. Elaboración propia.	79

Figura 26: Diagrama de flujo que representa las transiciones de la cubierta forestal y usos de suelo a áreas quemadas que fueron definidas en el modelo en la etapa de calibración. Elaboración propia.....	80
Figura 27: Mapa de calor generado por los puntos de incendios forestales en el PNCS.....	81
Figura 28: Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el PNCS.	84
Figura 29: Mapa de riesgo a incendios forestales para el PNCS, clasificándolo en cuatro categorías (muy alto, alto, medio y bajo).	85
Figura 30: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de selva baja en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.....	86
Figura 31: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de selva mediana en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.....	86
Figura 32: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de pastizales en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.....	87
Figura 33: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de agricultura en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de Rocas en el PNCS.	50
Tabla 2: Descripción de los tipos de vegetación que se encuentran en el PNCS.....	51
Tabla 3: Incidencias de incendios forestales dentro del PNCS.	60
Tabla 4: Comunidades donde se presentan con mayor frecuencia los incendios forestales	61
Tabla 5: Variables seleccionadas para explicar la ocurrencia de incendios forestales en el PNCS.	64
Tabla 6: Clasificación numérica utilizada por Dinámica EGO.....	66
Tabla 7: Rangos de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales.....	70
Tabla 8: Análisis de varianza de las variables de las áreas quemadas generadas por imágenes de satélite y los datos proporcionados por la CONANP.....	74
Tabla 9: Superficie ocupada por cada clase del modelo de riesgo a incendios forestales, derivado de la reclasificación del mapa de probabilidad.	82

RESUMEN

Los incendios forestales son un agente perturbador de origen natural o antrópico que ocurre en diferentes tipos de ecosistemas forestales en México. Actualmente se manifiestan con mayor intensidad, debido a la alta presión ejercida por las actividades humanas en los ecosistemas forestales y por el calentamiento global. Este tipo de perturbaciones han aumentado en su frecuencia, intensidad y dimensión, trayendo consigo pérdidas económicas, vulnerabilidad social y daño ambiental. Por lo tanto, es importante poder identificar las áreas con alta probabilidad y riesgo a la ocurrencia de los incendios forestales. En este sentido, se desarrolló un modelo de probabilidad a incendios forestales espacialmente explícito empleando el método de los pesos de evidencia y un conjunto de variables antrópicas y ambientales. El área de estudio fue el Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS), una importante zona turística y rica en biodiversidad en el estado de Chiapas, México. Para evaluar el modelo de probabilidad desarrollado se comparó con los incendios ocurridos en el año 2009 mediante la prueba ROC. Los valores del área bajo la curva obtenidos fueron aceptables entre 0.66 y 0.70. Finalmente, el mapa de probabilidad se clasificó en las siguientes cuatro categorías: (1) bajo; (2) medio; (3) alto y (4) muy alto. Dicha cartografía es un primer paso para la gestión integral del riesgo ante la problemática de los incendios forestales en el PNCS.

Palabras clave: riesgo, variables antrópicas, incendios forestales, área natural protegida, pesos de evidencia, modelo espacial.

ABSTRACT

Forest fires are a disturbing agent of natural or anthropogenic origin that occurs in different types of forest ecosystems in Mexico. Currently they are manifested with greater intensity, due to the high pressure exerted by human activities on forest ecosystems and global warming. These types of disturbances have increased in frequency, intensity and dimension, bringing with them economic losses, social vulnerability and environmental damage. Therefore, it is important to be able to identify areas with high probability and risk of forest fires occurring. In this sense, a spatially explicit forest fire probability model was developed using the weights of evidence method and a set of anthropic and environmental variables. The study area was the Sumidero Canyon National Park (SCPN), an important tourist area rich in biodiversity in the state of Chiapas, Mexico. To evaluate the probability model developed, it was compared with the fires that occurred in 2009 using the ROC test. The area under the curve values obtained were acceptable between 0.66 and 0.70. Finally, the generated probability map was classified into the following four categories: (1) low; (2) medium; (3) high and (4) very high. This cartography is a first step for comprehensive risk management in the face of the problem of forest fires in the SCPN

Keywords: risk, anthropic variables, forest fires, protected natural area, weights of evidence, spatial model.

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.1 Introducción.

El fuego ha desempeñado un papel significativo en los ciclos vitales de los ecosistemas forestales, consolidándose como una herramienta clave en la vida humana. Su utilización abarca diversas esferas, tales como la caza, el manejo de pastizales, la defensa territorial, actividades industriales y rituales culturales (Bodí *et al.*, 2012). Este elemento ha actuado como aliado, influyendo de manera trascendental en la subsistencia de comunidades. No obstante, su empleo imprudente ha generado impactos ambientales notables. En particular, los incendios forestales han experimentado un marcado aumento en el marco del cambio climático global.

La caracterización de un incendio forestal, según la definición de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010) se manifiesta cuando el fuego se propaga sin control, afectando áreas boscosas, selvas o vegetación en entornos áridos y semiáridos. Estos incendios, originados tanto por causas naturales como por acciones humanas, representan una amenaza palpable al destruir ganado, viviendas e incluso poner en riesgo vidas humanas. Además, la recurrente incidencia de estos eventos puede desequilibrar la armonía natural del ecosistema, generando condiciones que difieren de las esperadas dentro del contexto climático preestablecido (Bodí *et al.*, 2012).

En la actualidad, se comprende que la aparición de incendios forestales está condicionada por una combinación de factores ambientales, socioeconómicos y climáticos, cuyos efectos son variables dependiendo del ecosistema, el espacio y el tiempo (Yang *et al.*, 2007). Las características de la vegetación y el estado del tiempo, como también la topografía, son factores determinantes en la ocurrencia y el comportamiento del fuego. Asimismo, la evolución del incendio está condicionada por las acciones que se tomen para su supresión; las características del terreno donde se desarrolle el fuego, las vías de acceso, la cercanía a fuentes de agua y las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, precipitación y viento), son todos los factores que contribuirán al grado de dificultad que presentarán estas acciones (Dentoni & Muñoz, 2012).

Es fundamental resaltar que los incendios forestales representan un desafío global, como lo reflejan las estadísticas a nivel mundial sobre las áreas afectadas y el número de incendios (Àgueda *et al.*, 2011). En México, los incendios representan uno de los mayores daños a los ecosistemas y son resultado de la interacción entre factores socioeconómicos, políticos y culturales (Muñoz *et al.*, 2005), de acuerdo a las estadísticas, se tiene el registro histórico de 374000 incendios forestales

en el país con más de 18,000,000 hectáreas afectadas (CONAFOR, 2022) y a nivel global, se estima una extensión de hasta 350,000,000 de hectáreas dañadas (FAO, 2019), impactando gravemente los recursos forestales en distintos ecosistemas mexicanos (bosques y selvas). Por tanto, la protección y gestión adecuada de estos recursos se vuelven prioritarias para conservar la biodiversidad y salvaguardar los servicios ecosistémicos que proveen a la humanidad (Macias, 2016).

Los incendios forestales, generados tanto por causas naturales como por actividades humanas, suponen un desafío constante para la conservación de los ecosistemas forestales. Además de la pérdida de vegetación, sus impactos incluyen la interrupción de procesos de regeneración, el debilitamiento de árboles, la vulnerabilidad ante plagas y enfermedades, la degradación del suelo y fenómenos erosivos que afectan la estabilidad del terreno. Estos eventos también alteran la biodiversidad y pueden influir en ciclos biogeoquímicos y patrones climáticos locales (CONAFOR, 2010) La comprensión de estas consecuencias es crucial para desarrollar estrategias efectivas de manejo y conservación frente a la complejidad de los impactos generados por los incendios forestales.

Los daños económicos resultantes de los incendios forestales son considerables, ya que estos eventos destructivos impactan directamente valiosos recursos forestales, desde productos maderables hasta otros bienes provenientes del bosque. Esto genera costos posteriores al incendio relacionados con la restauración de los ecosistemas afectados y la recuperación de servicios ecosistémicos esenciales, como la provisión de agua, la regulación climática y la conservación de la biodiversidad (Hamilton, 2008; Cárdenas, 2013). Por lo cual, para prevenir o mitigar los daños potenciales ocasionados por los incendios forestales, se implementan diversas estrategias dentro de un plan de manejo integral. Este plan abarca la zonificación de áreas prioritarias contra incendios forestales, destacando la importancia de una gestión proactiva y preventiva para salvaguardar tanto los recursos forestales como los beneficios económicos y ambientales asociados.

Los planes de manejo del fuego son acciones realizadas, donde entre otras cosas se define en qué áreas se necesita enfocar los recursos existentes, para la definición de estas áreas existen diversas metodologías donde se utilizan diferentes criterios. Por lo tanto, es necesario la unificación de conceptos y criterios, dentro de estos últimos se cuentan con los propuestos por CONAFOR (riesgo,

peligro y valor), para definir estas áreas prioritarias de protección contra incendios forestales (Flores, Benavides, Casillas, *et al.*, 2016).

La comprensión integral de la problemática de los incendios forestales, abarcando sus causas, frecuencia e impactos en los ecosistemas, se vuelve esencial dado que no solo representan una amenaza para la biodiversidad y los hábitats naturales, sino también para la vida humana. La identificación precisa de las zonas de riesgo se convierte en un paso crucial para determinar las medidas preventivas, de contención y mitigación necesarias. En este contexto, las instituciones encargadas de la conservación de los ecosistemas deben adoptar herramientas que les permitan evaluar las áreas con probabilidad de ocurrencia de incendios forestales y reconocer aquellas de alto riesgo. Estas herramientas no solo son esenciales para la toma de decisiones relacionadas con la asignación de recursos financieros, sino también para el desarrollo de estrategias preventivas y la movilización eficiente de recursos destinados a combatir estos eventos. (Tien Bui *et al.*, 2017; Reyes & Balcazar, 2021).

Se consideran diversos criterios que establecen vínculos entre la aparición de incidentes de incendios forestales y características específicas del entorno. Estos aspectos abarcan la localización de los incendios, su comportamiento y repercusión en los ecosistemas, así como factores como la exposición, la pendiente del terreno, la precipitación, entre otros (Flores, Benavides, Leal, *et al.*, 2016). Sin embargo, de acuerdo Chuvieco *et al.* (2007) y Farfán *et al.* (2020), destaca que las variables de origen humano actúan como fuertes predictores de los incendios forestales. Por consiguiente, es común observar que las zonas con mayor probabilidad de sufrir incendios se encuentran en proximidad a caminos, carreteras o áreas pobladas. Además, estas áreas suelen caracterizarse por pendientes pronunciadas y ser destinadas al pastoreo o al aprovechamiento maderable (Cruz, 2016).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo espacialmente explícito de probabilidad a los incendios forestales para el Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS). El mapa de probabilidad de su ocurrencia representa una herramienta fundamental en el plan de manejo del fuego para el PNCS al proporcionar información crucial para la toma de decisiones y la planificación estratégica de acciones para la prevención y manejo de combustibles forestales. El identificar las zonas con mayor ocurrencia, permitirá implementar medidas de prevención física y

cultural fortaleciendo la gobernanza del manejo de fuego y así preservar la importante biodiversidad que alberga el PNCS.

1.2 Antecedentes.

En las estrategias de prevención de incendios forestales, la identificación de áreas prioritarias desempeña un papel crucial. La focalización de esfuerzos y recursos en lugares de mayor necesidad se vuelve esencial. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se destacan como herramientas sumamente útiles. Mediante el análisis de variables georreferenciadas, se puede generar una clasificación que identifique con precisión las áreas de mayor prioridad. Los SIG facilitan la administración, ordenación, análisis y procesamiento de información georreferenciada, permitiendo la creación de mapas temáticos. Estos mapas, que señalan las áreas prioritarias por riesgo de incendios forestales en una Área Natural Protegida (ANP) o región específica, son posibles gracias a la aplicación de métodos similares, como se evidencia en trabajos previos. Estos enfoques resultan adecuados y ofrecen un marco metodológico efectivo para estudios del riesgo a incendios forestales.

1.2.1 Internacional.

En la Microcuenca Las Marías, ubicado en los departamentos de León y Chinandega, Nicaragua, se llevó a cabo un estudio de susceptibilidad de incendios forestales mediante una encuesta que identificó los elementos influyentes. La muestra consistió en 31 viviendas encuestadas, evaluando 14 variables para cada indicador. Se realizó un análisis de áreas críticas basado en tres factores (riesgo, peligro y daños), utilizando cinco variables cada uno. La valoración de estas variables (1 al 5) se estableció mediante observación y conversatorios informales, y los datos se capturaron en un documento de Excel, elaborando mapas con el software SIG Arcview 3.1. Los resultados revelan que los productores implementan medidas para la prevención y control de incendios, con conocimiento sobre sus impactos ambientales y de salud, así como los factores que afectan su propagación. El análisis de susceptibilidad identificó dos grupos: uno de alta y media peligrosidad que abarca el 50.1% del territorio (22.89 Km²), y otro de niveles mínimo y bajo que ocupa el 49.9% (22.78 Km²). En conclusión, aproximadamente la mitad del territorio presenta riesgo significativo de incendios forestales (Gutiérrez, 2004)

En la cuenca del Río Tempisque en Costa Rica, se evaluó el riesgo de incendios forestales utilizando variables como la proximidad a carreteras, tipos de usos de la tierra, focos de incendios,

insolación y altitud sobre el nivel del mar. Estas variables fueron modeladas mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (ECM) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). El estudio demostró el potencial de riesgo de incendio en la cuenca del río Tempisque, y se validó el resultado del modelo de regresión logística contextualizando con la realidad observada. Se utilizaron 25 puntos de control en lugares que evidencian el impacto de los incendios, diferentes a los utilizados en la muestra. A través de una tabulación cruzada utilizando SIG, se determinó que 7 puntos se encuentran dentro de áreas de alto riesgo, 17 en áreas de riesgo moderado y 1 área de riesgo bajo. (Moraga, 2010).

Por otro lado, en el bosque Harena al suroeste de Etiopía (Suryabhagavan *et al.*, 2016) emplearon técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar y analizar la susceptibilidad a incendios forestales. La investigación se basó en datos fisiográficos y factores de proximidad, como altitud, pendiente, orientación, tipo de vegetación, asentamientos humanos y distancia desde los caminos. Mediante la técnica multicriterio, se generó un mapa de susceptibilidad al fuego para el bosque Harena. Este mapa dividió las áreas con riesgo de incendio forestal en cuatro categorías: riesgo muy alto (22,981 ha), riesgo alto (159,229 ha), riesgo moderado (252,327 ha) y riesgo bajo (1,022 ha, 0.15 %). Este enfoque permitió identificar las localidades de áreas susceptibles al fuego, facilitando la planificación de medidas de control en el bosque y en áreas de manejo de vida silvestre.

En otra investigación, Baquero (2019) llevó a cabo un análisis de peligro de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito utilizando sensores remotos. En este análisis, las variables independientes consideradas fueron la precipitación y la temperatura, mientras que la variable dependiente fue el peligro de incendio. La información se obtuvo mediante el uso de sensores remotos y el procesamiento de imágenes satelitales. Los resultados revelaron que el peligro de incendios forestales está vinculado a variables de vegetación y sequedad. Se concluyó que la presencia de vegetación no es la única condición que puede generar un incendio, ya que los factores de sequía tienen una fuerte influencia en la ocurrencia de este fenómeno. Se observó que los procesos realizados para determinar el peligro de incendios presentaron mejores resultados en las imágenes del 30 de agosto y 15 de septiembre debido a una mínima presencia de nubosidad y la facilidad de discriminación de áreas vegetales.

En una investigación realizada en el recinto Las Mercedes, comuna Sancán, cantón Jipijapa, en Ecuador, se llevó a cabo la zonificación de la susceptibilidad a incendios forestales. El mapa de susceptibilidad se elaboró utilizando el software SIG ArcGIS 10.5, evaluando factores y variables específicas y definiendo categorías correspondientes para cada caso. Los factores considerados incluyeron aspectos climáticos, tipo de combustible, relieve, accesibilidad y el comportamiento histórico de los incendios. Los resultados indicaron la ocurrencia de 33 incendios dentro del área de estudio durante el periodo 2010-2019. Se observó que las precipitaciones eran escasas, la vegetación mostraba una susceptibilidad alta y muy alta, y el relieve presentaba pendientes de medias a fuertes. El mapa de zonificación de la susceptibilidad permitió clasificar la mayor parte del territorio como de baja susceptibilidad de la vegetación a los incendios. La conclusión fue que estos mapas constituyen herramientas técnicas geográficas que definen zonas homogéneas con proyección a un manejo preventivo (Orlando, 2020).

Por otro lado, en ocho comunas de la Región de Valparaíso (Alegría, 2020) realizó un estudio para evaluar el riesgo de incendios forestales mediante la consideración de variables de amenaza y vulnerabilidad. La investigación incluyó la evaluación de subvariables físico-naturales y antrópicas, comparadas a través de un análisis multicriterio. El periodo de estudio abarcó los antecedentes de incendios ocurridos entre los años 2000 y 2017, donde la interfaz urbano-forestal se identificó como un nuevo escenario de riesgo ante este fenómeno. Los resultados señalan que las zonas de alto riesgo de incendios en la interfaz urbano-forestal están habitadas por una población socioeconómicamente vulnerable, con viviendas precarias. Además, estas áreas albergan al 13,9% de la población total del área de estudio y aproximadamente 54,813 viviendas expuestas. Esto plantea un desafío para los instrumentos de ordenamiento territorial, destacando la necesidad de contemplar integralmente el riesgo en la planificación del territorio.

En el municipio de El Rosal ubicado en el departamento de Cundinamarca, Colombia se realizó la zonificación de amenaza por incendios forestales, para ello (Amaya, 2021) identificó las variables que contribuyen a la generación de los incendios forestales en la zona con base al protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal propuesto por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en donde se integran factores de susceptibilidad de la vegetación relacionados con la cobertura vegetal del año 2020, factores climáticos, topografía, datos históricos y accesibilidad, procesándolos a través de un

SIG, generando una calificación y ponderación a cada variable. Se obtuvo como resultado que el grado de amenaza por incendios forestales es alto, con un porcentaje del territorio de 96.51%. La mayor parte de estas zonas están influenciadas por los factores de topografía y la vegetación, concentrando con esta última un grado de susceptibilidad alto con un 79.07%, indicando que la zona presenta condiciones aptas para la generación y propagación de un incendio forestal.

Calán (2022) llevó a cabo una investigación en la Sierra Norte del Ecuador para identificar zonas con susceptibilidad y amenaza a incendios forestales. En este estudio se consideraron variables categorizadas como internas (tipo de combustible, duración de combustible, carga de combustible y estado de vegetación) y externas (temperatura, déficit hídrico, pendiente, accesibilidad y frecuencia de incendios). Se utilizó una adaptación del Protocolo para la Realización de Mapas de Zonificación de Riesgos a Incendios, establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), junto con imágenes de satélite para obtener información sobre temperatura superficial, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y los incendios activos. Los resultados obtenidos indicaron que las zonas forestales, matorral seco y bosque plantado seco presentaron una mayor susceptibilidad y amenaza a incendios forestales. En contraste, las zonas de bosque plantado húmedo, matorral húmedo, vegetación herbácea húmeda, páramo herbáceo y bosque nativo mostraron niveles bajos de susceptibilidad y amenaza. Este análisis permitió identificar que la mayor parte del territorio presenta niveles bajos de susceptibilidad y amenaza a incendios forestales.

A través de un modelo, se generó un mapa de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Voivodato de Baja Silesia, Polonia. Para este propósito, se recopiló datos históricos de incendios y variables predictoras que abarcaban características topográficas, de vegetación, climáticas y antropogénicas. Se aplicaron los métodos de máquina potenciada por gradiente (GBM) y bosque aleatorio (RF) para evaluar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. La evaluación de las variables se llevó a cabo mediante el método de permutación de la plataforma H2O. Los resultados revelaron que las variables con mayor peso fueron la presencia de bosque de coníferas y la distancia a terrenos agrícolas, según los métodos GBM y RF, respectivamente. La validación del modelo se realizó mediante el análisis de características operativas del receptor (ROC) y las áreas bajo la curva (AUC), que fueron del 83,3 % y 81,3 % para los modelos GBM y

RF, respectivamente. Con base en estos resultados, se puede recomendar el modelo GBM para el mapeo de la ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio. (Milanović *et al.*, 2023).

1.2.2 Nacional.

En la Sierra Madre Oriental de México, se desarrolló un modelo para evaluar el peligro de incendios forestales en una porción de bosque de clima templado en Nuevo León. Se utilizó el método de análisis espacial multicriterio para integrar y evaluar, mediante un sistema de información geográfica, variables con alta influencia en el riesgo de incendios forestales. El índice de peligro de incendios forestales consta de tres componentes: el componente de combustibles forestales, derivado de la evaluación de la carga de combustibles forestales muertos; el componente meteorológico, estructurado mediante la integración de la temperatura media máxima mensual y la precipitación total mensual; y finalmente, el componente de causa, evaluado a través de aspectos socioeconómicos y rasgos geográficos. Se determinó que la variabilidad de los combustibles está relacionada con la intensidad de manejo forestal (Muñoz *et al.*, 2005).

En el estado de Durango, México (Pérez-Verdín *et al.*, 2013) se realizó un análisis espacio-temporal de la ocurrencia de los incendios forestales, tomando la base de datos de incendios de la CONAFOR. Se utilizó el índice de Moran para determinar un patrón de distribución espacial y se hizo un análisis de estacionalidad y autocorrelación temporal utilizando los datos colectados. Para determinar los factores más importantes que inciden en el tamaño de los incendios, se aplicó la regresión geográficamente ponderada cuya característica principal es la asignación de niveles de importancia (peso geográfico) en función de la distancia. Los resultados indicaron que los incendios forestales se distribuyen de manera agregada, son no-estacionarios y no están correlacionados temporalmente. La magnitud de los incendios se presenta de acuerdo con la densidad de población y vías de comunicación, lo que confirma el factor antropogénico como principal causa de dichos eventos.

León Rojas (2014) evaluó la susceptibilidad a incendios forestales en el estado de San Luis Potosí, considerando factores climáticos, topográficos (pendiente, orientación y altitud), agentes causantes (camino, localidades y áreas agrícolas) y el combustible (vegetación). La información recopilada se procesó a través de un sistema de información geográfica, generando dos modelos de susceptibilidad: uno basado en la regresión logística y otro mediante evaluación multicriterio. Ambas metodologías indicaron que las áreas más susceptibles se encuentran en las regiones Media

y Huasteca, mientras que el Centro y Altiplano presentan susceptibilidad de baja a media. Se identificaron zonas prioritarias para programas de gestión integral del fuego, con el objetivo de reducir el impacto de los incendios a través de acciones preventivas.

Gallegos *et al.*, (2016) generaron un manual detallado que explica los pasos necesarios en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para definir áreas con diferentes niveles de peligro de incendio (alto, medio y bajo), basándose en la ponderación proporcionada por CONAFOR. Este enfoque implica la suma de variables como el comportamiento del fuego, clasificación de los ecosistemas, pendiente, exposición, incidencia de huracanes, precipitación y temperatura. La obtención del mapa de peligro se logró mediante la sobreposición de capas utilizando el software SIG ArcGIS. Se caracterizaron tres grados diferentes de peligro, considerando que cada variable tiene un valor específico. Se generaron mapas temáticos correspondientes, y se sugiere que los mapas a nivel nacional no son adecuados para la toma de decisiones debido a su escala pequeña, ya que la representación cartográfica carece de detalle. Es esencial tener en cuenta que esto está condicionado por la escala de la información utilizada.

El Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) Ibarra-Montoya & Huerta-Martínez (2016) desarrollaron un modelo espacial para identificar las zonas potenciales de incendios. El modelo integró variables meteorológicas, paisajísticas, de combustibles, antropogénicas y las ocurrencias históricas de incendios entre 1998 y 2012. Según el modelo, las variables determinantes para las zonas de mayor potencial de incendios son la pendiente, la humedad relativa, el tipo de vegetación y el uso del suelo. Los resultados mostraron una capacidad predictiva significativa para cada variable, evaluadas de manera independiente (pendiente: AUC=0.91, humedad relativa: AUC=0.82, tipo de vegetación: AUC=0.83, uso del suelo: AUC=0.79). Concluyeron que, según el modelo, la parte central y noroeste del polígono del APFFLP tiene una alta probabilidad de incendios, con zonas potenciales más pequeñas y aisladas en el oriente del área.

García (2018) desarrolló un visualizador web que presenta información cartográfica temática sobre las zonas susceptibles a incendios forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca. Para esto, se llevó a cabo un análisis de susceptibilidad, identificando factores meteorológicos, físicos, de vegetación y antrópicos, a los cuales se les asignó un valor de importancia en relación con el peligro y sus interrelaciones. El resultado es un visualizador web

que representa las zonas susceptibles a incendios forestales, junto con registros de incendios del período 2013-2017. Este sitio web se diseñó para visualizar y representar espacialmente los registros y las áreas susceptibles a incendios forestales en el APFF Nevado de Toluca. Su propósito es facilitar la toma de decisiones orientadas a la mitigación de este fenómeno, ya que conocer las áreas susceptibles permite prevenir incendios forestales.

En la Reserva de la Biosfera de las Mariposas Monarca (RBMM) Farfán *et al.* (2018) desarrollaron un modelo espacial utilizando datos de incendios durante cinco años (2009-2013), la distribución espacial de la infraestructura antrópica y variables ambientales y topográficas como la biomasa forestal y la pendiente. Se observó un aumento en la ocurrencia de incendios asociado con la población total y la densidad de los bordes del bosque, según los modelos promediados. La precisión del modelo espacial fue aceptable, con un valor de área bajo la curva (AUC) de 0.71 para la ocurrencia de incendios basados en eventos de 2014 y 2015 utilizados para evaluar el modelo. Los resultados sugieren la necesidad de otorgar importancia a la influencia de estas variables, destacando que el aumento de la actividad humana incrementa la probabilidad de ocurrencia de incendios dentro de la RBMM.

En el estado de Guanajuato (Farfán *et al.*, 2020), desarrollaron un modelo espacial para generar la cartografía de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en dicho estado. El modelo integró datos cartográficos relacionados con actividades antrópicas, como la distancia a vías de comunicación, asentamientos humanos y densidad poblacional, así como la distancia a usos de suelo agrícolas, deforestación y al borde del bosque como variables potenciales. Estos datos se obtuvieron de los mapas de vegetación y uso del suelo de los años 2004, 2009 y 2014 a escala 1:50,000. El intervalo de tiempo de calibración fue de 2004 a 2009, y se utilizó la cartografía de áreas quemadas del año 2008 para definir la transición de cubierta forestal a incendios, derivada del procesamiento de imágenes satelitales Landsat TM. El resultado fue el mapa de probabilidad de incendios forestales, donde las probabilidades estimadas se reclasificaron en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta, mediante el método de rupturas naturales. El modelo se evaluó mediante la prueba estadística curva característica operativa del receptor (ROC), obteniendo un valor de área bajo la curva (AUC) de 0.7, lo que indica que el mapa es aceptable para predecir los incendios.

En un estudio realizado por Farfán *et al.* (2021) e determinó la probabilidad de incendios forestales bajo condiciones del Niño-Oscilación del Sur (ENSO en la región semiárida de Guanajuato. La

investigación exploró cómo las fases del ENSO afectan las condiciones climáticas, conduciendo a un alto Déficit de Presión de Vapor (VPD) sobre la ciudad de Guanajuato durante la temporada de estiaje (marzo-abril-mayo). Para llevar a cabo el estudio, se utilizaron datos de ocurrencia de incendios de MODIS (2000–2019) y Landsat 5 (1998–1999). Se desarrolló un modelo de probabilidad climática para la ocurrencia de incendios forestales utilizando los valores estimados de VPD obtenidos a partir de la reanálisis ERA5 para cada fase del ENSO. Los resultados indicaron que, durante el fenómeno del Niño, hubo una mayor ocurrencia de incendios forestales en comparación con los años de fases Neutras y La Niña.

En el mismo año Estrada *et al.* (2022) llevaron a cabo una investigación en el Campo Forestal Experimental "Las Cruces", ubicado en el municipio de Texcoco, con el propósito de priorizar los sitios forestales en función de su susceptibilidad a incendios. Para este fin, se empleó el análisis multicriterio PROMETHEE II, considerando indicadores de gran relevancia en la incidencia de incendios. La información fue recopilada a partir de registros en campo, bases de datos, cartografía y entrevistas con expertos en temas de incendios. Se definieron 22 criterios distribuidos en cuatro categorías: climatológicas, topográficas, susceptibilidad de la vegetación a incendios y socioeconómicas. Cada variable fue asignada con su respectivo valor de importancia, siendo algunos ejemplos: temperatura máxima anual (20%), prevención de incendios (20%), carga de combustible (10%) y distancia a vías de acceso (10%). Como resultado, se generó un mapa que identificó cinco sitios de alta susceptibilidad, veinte de susceptibilidad media y cinco de baja susceptibilidad a incendios.

1.2.3 Local.

Palacios *et al.*, (2009) determinó el peligro a incendios en el Parque Nacional Cañón del Sumidero con base en el uso de los sistemas de información geográfica recopilando información oficial para describir las causas, extensión, tipo de vegetación y los estratos afectados en los incendios registrados en la última década. A partir de dicha información se generó un mapa de peligro a partir de cuatro variables: el uso de suelo, las condiciones del clima, la proximidad a los asentamientos y vías de comunicación. Se encontró información de 52 incendios sucedidos en la zona de estudio en un intervalo de siete años (2003-2008). Obteniendo que el 67 % de la superficie que se afecta dentro del PNCS corresponden a las selvas bajas, el 27% a la vegetación secundaria y el 6% restante a las selvas medianas.

1.3 Planteamiento del problema.

La preservación de los ecosistemas en reservas naturales es crucial para la supervivencia de la flora, fauna y comunidades locales. En este contexto, la investigación se centra en la prevención de riesgos, especialmente los incendios forestales. Estos eventos representan amenazas significativas para la propiedad, el clima, la morfología del terreno, los suelos, la economía y la sociedad, además de tener impactos ambientales al modificar ciclos hidrológicos y procesos de erosión del suelo (Alegría, 2020; Chuvieco *et al.*, 1998). Las condiciones climáticas, como altas temperaturas, baja humedad y viento, aumentan la probabilidad de ocurrencia de incendios, generando riesgos ambientales (Díaz, 2011).

Cuando se aborda un incendio forestal se habla de un peligro inminente o dañino para la propiedad, el clima, la morfología, los suelos, economía, sociedad y el ambiente, ya que se han distribuido espacialmente en la vegetación, modificando ciclos hidrológicos y procesos de erosión del suelo (Alegría, 2020; Chuvieco *et al.*, 1998). Las condiciones climáticas imperantes, como altas temperaturas, baja humedad y viento, hacen que los ecosistemas se encuentre en un momento de máxima probabilidad de ocurrencia de incendios (Díaz, 2011).

Los incendios forestales generan impactos significativos en múltiples niveles, afectando la biodiversidad al destruir el hábitat de la fauna y causando la emisión de agentes contaminantes perjudiciales. Estos contaminantes, provenientes de la combustión de biomasa, incluyen material particulado, dióxido y monóxido de carbono (CO), así como en menor medida dióxidos de nitrógeno (NO₂) y azufre (SO₂). Estos elementos contribuyen a la degradación de la calidad del aire, fomentan el cambio climático, provocan la erosión del suelo y alteran el régimen hidrológico. Los impactos se extienden a esferas ecológicas, económicas, sociales y políticas, tanto a corto, mediano como largo plazo (Ursua & Cáceres, 2011); además representan una creciente amenaza para la salud pública global, especialmente para grupos vulnerables como niños, ancianos, embarazadas y aquellos con enfermedades cardiovasculares o respiratorias crónicas, que se ven expuestos a los efectos perjudiciales del humo y otros contaminantes del aire generados por estos eventos (Sandoval D. *et al.*, 2019).

De acuerdo a (Cuesta y Giraldo, 2013) nos mencionan que los efectos más relevantes que el fuego produce sobre el suelo, y que se analizarán con mayor detalle, son las modificaciones en las propiedades físicas y químicas, principalmente los cambios en la materia orgánica, acidez o pH,

afectaciones biológicas, estabilidad estructural, porosidad y modificaciones en los nutrientes totales del suelo (p.60), si bien ese cambio dependerá básicamente del tipo de vegetación y de las temperaturas alcanzadas y el grado de combustión de la materia vegetal, que determinan la composición de las cenizas (Mataix-Solera y Cerdà, 2009).

La frecuencia de incendios en las proximidades del Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS) se atribuye principalmente a prácticas agrícolas y costumbres locales, como quemas agropecuarias para limpiar y preparar terrenos destinados a la agricultura. Las malas prácticas, como la quema de residuos de desmontes y áreas para potrero, se llevan a cabo en selvas bajas caducifolias y pastizales cercanos. Además, la proximidad de las colonias de Tuxtla Gutiérrez y Chiapas de Corzo contribuye a la generación de incendios intencionales debido a actividades como quema de basura, pesca, cacería ilegal y extracción de especies maderables y no maderables. Estas actividades han resultado en cambios en el uso del suelo, modificaciones en el hábitat y alteraciones en la distribución de la fauna y flora local (Méndez, 2019). La temporada de mayor incidencia de incendios se extiende de diciembre a junio, coincidiendo con la época de estiaje y alcanzando su punto máximo entre marzo y mayo, cuando las condiciones climáticas adversas y la baja humedad de los combustibles favorecen la propagación de incendios superficiales y subterráneos, afectando los ecosistemas del parque (CONANP, 2023; Protección Civil Chiapas, 2023).

Si bien, el PNCS se enfrenta a un desafío significativo debido a la carencia de un mapa de riesgos que identifique de manera precisa las áreas más susceptibles a los incendios forestales. Esta falta de información estratégica se traduce en una situación en la que los incendios tienden a concentrarse con frecuencia en el parque, exacerbados por una combinación de factores, entre los que se incluyen las condiciones climáticas adversas, como altas temperaturas, baja humedad y vientos, así como también las actividades humanas. La ausencia de un enfoque proactivo para la gestión del riesgo de incendios implica una mayor vulnerabilidad para la propiedad, el medio ambiente y la comunidad local que depende del PNCS para su sustento y calidad de vida.

El comportamiento del fuego dentro del PNCS indica que, durante un periodo de 19 años, que abarca desde el 2003 al 2022 demuestra un total de 281 incendios, con un promedio de 7 a 36 incendios por año afectando 3443.4 ha. Se identificaron 17 sitios con mayor incidencia de incendios, principalmente relacionados con quemas agropecuarias. El año 2020 fue notable por altas temperaturas, resultando en un aumento significativo en el número de incendios,

especialmente en 2016 con 450.9 hectáreas afectadas y 2021 con 408.46 hectáreas. En 2022, el 72% de los incendios fue causado por la quema de pastos y basura en los límites del parque, seguido por un 28% debido a quemas agrícolas. Estos datos resaltan la importancia de abordar las prácticas de manejo del fuego en los alrededores del parque para reducir el riesgo de incendios forestales. (CONANP, 2023b).

A pesar de las diversas medidas preventivas, los incendios persisten como una amenaza constante, sugiriendo un escenario futuro con posibles incrementos en las pérdidas. En respuesta a esta preocupación, se vuelve cada vez más evidente la necesidad de contar con herramientas mejoradas para la comprensión y gestión de los incendios, es por esto que resulta crucial implementar medidas efectivas de prevención y manejo de incendios, así como también desarrollar e implementar un mapa de riesgos detallados que permita una planificación más efectiva y una respuesta rápida ante la eventualidad de futuros incendios forestales en el PNCS. En esta investigación, se propone evaluar las zonas con probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, desarrollando un modelo espacial explícito. La cartografía resultante facilitará la identificación de áreas con factores más severos, permitiendo que los programas de prevención se enfoquen específicamente en las zonas de alto riesgo. La ejecución de estos procesos se llevará a cabo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), que brindan nuevas oportunidades para adquirir y gestionar información espacial, mejorando así la toma de decisiones territoriales (Chuvienco *et al.*, 2007). El objetivo es obtener resultados que complementen las medidas de prevención cultural y física, contribuyendo a la reducción de los daños causados por los incendios forestales en el área de estudio.

1.4 Justificación.

Los incendios forestales representan un desafío significativo en nuestro país, siendo su ocurrencia principalmente atribuida a causas antrópicas durante la temporada de estiaje (Reyes, 2016). A pesar de los esfuerzos realizados para prevenir estos fenómenos a gran escala, las acciones no han resultado suficientes. Este problema persiste debido a la falta de percepción del riesgo como una parte inherente de nuestra convivencia y a la falta de integración de la percepción del riesgo como una herramienta efectiva de prevención (Burriel *et al.*, 2006). Anualmente, los incendios afectan extensas áreas, abarcando aproximadamente 350 millones de hectáreas, provocando daños a la propiedad, afectando los medios de subsistencia y, lamentablemente, conllevan a menudo la

pérdida de vidas humanas. Además, contribuyen al calentamiento global, la contaminación del aire, la desertificación y la pérdida de biodiversidad (FAO, 2009).

El área que comprende el PNCS, abarca diversos ecosistemas, entre ellos la selva baja y media caducifolia, selva mediana perennifolia, así como bosques de pino y encino (CONANP, 2012), estos ecosistemas desempeñan un papel crucial al proporcionar servicios ambientales valiosos, tales como la captura de carbono, la reserva hídrica y la regulación climática (Pozo, 2022), mismos que para su conservación, es necesario cumplir con las actividades de protección, conservación y uso sostenible, para evitar su degradación, así como lo marca el objetivo 15, de los Objetivos de Desarrollo sostenible, como parte de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2018). Estas medidas son esenciales para contrarrestar las presiones significativas derivadas del cambio de uso de suelo y el crecimiento demográfico, que amenazan la integridad de este valioso patrimonio natural.

La modelación espacial explícita de incendios forestales reviste una importancia fundamental, ya que posibilita la identificación de áreas con mayor probabilidad de inicio y propagación de incendios, permitiendo así detectar zonas de alto riesgo. Es imperativo incorporar innovaciones tecnológicas junto con estrategias y políticas integrales para optimizar recursos y obtener resultados de manera eficiente. La justificación de esta investigación radica en la necesidad de desarrollar un modelo espacial explícito de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales específicamente PNCS. Esta medida preventiva busca establecer una vigilancia efectiva, identificar áreas prioritarias para la gestión comunitaria del fuego, mejorar las alertas tempranas y respaldar la toma de decisiones en intervenciones y evaluación de impacto. Disponer de modelos y productos que faciliten la toma de decisiones para minimizar las consecuencias se considera esencial para una gestión eficiente del territorio y sus áreas naturales.

1.5 Hipótesis.

H1. Mediante el análisis de información de campo y la aplicación de un Sistema de Información Geográfica es posible identificar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas relacionadas con los incendios forestales y evaluar los patrones de distribución espacial.

H2. La probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Cañón del Sumidero está influenciada por variables antropogénicas, tales como la proximidad a áreas pobladas, el uso de suelo agrícola y caminos. Se espera que la presencia de estos factores contribuya significativamente al incremento de la probabilidad de incendios forestales en el parque.

1.6 Objetivos de la investigación.

1.6.1 Objetivo general.

Estimar y evaluar las zonas de probabilidad a incendios forestales en el ANP Parque Nacional Cañón del Sumidero empleando un enfoque de modelo espacial explícito para contribuir a la prevención y el manejo del fuego.

1.6.2 Objetivos específicos.

- Estimar el mapa de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales considerando las causas antrópicas de ignición.
- Identificar y caracterizar las zonas de alto riesgo a incendios de acuerdo con el tipo de vegetación.
- Evaluar la probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales con el estadístico de la curva característica operativa del receptor (ROC).

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1 Área Natural Protegida (ANP).

Al hablar de un Área Natural Protegida (ANP) hacemos referencia a la porción de territorio (terrestre o acuático) cuyo fin es conservar la biodiversidad representativa de los distintos ecosistemas para asegurar el equilibrio y la continuidad en los procesos evolutivos y ecológicos, es así como la (CONANP, 2023) menciona que:

Las Áreas Naturales Protegidas son las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas, su objetivo principal es la protección de especies de flora y fauna silvestres, muchas de ellas endémicas o consideradas bajo algún esquema de protección.

Así mismo, las ANP tienen como fin vigilar que el aprovechamiento de los recursos dentro de la zona se realice de manera sustentable, preservando la flora y la fauna particular del ecosistema, con el objetivo de generar conocimiento y transmitir aquellas prácticas o tecnologías que faciliten el aprovechamiento sustentable de los mismos. Estas se crean mediante un decreto presidencial y las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).

Las ANP se encuentran en el territorio nacional con una jurisdicción que ejerce para que no sufran alteraciones por actividades humanas, con decretos de ley de equilibrio ecológico, que menciona el programa de actividades con el fin de mantener y conservar las áreas naturales y las planeaciones de su protección que permitan cumplir con la ley de equilibrio ecológico, con ello podemos analizar distintos procesos de trabajo y decretar en que puede haber un fallo del plan de manejo y conservación o mejorar algunas iniciativas mediante un análisis de cambio de uso de suelo (Periódico Oficial del Estado, 1999)

Al impulsar las acciones de planeación y conservación del área natural protegida, se elaboran actividades como la vigilancia o el monitoreo de las zonas, llevando un control y un análisis descriptivo de los cambios causados por el ser humano. Por ello es necesario incrementar el manejo de la reserva natural, con esquemas de análisis de cambio de uso de suelo, y así fortalecer la zona ecológica para su preservación (Pisanty *et al.*, 2016)

Las iniciativas de ANP, tienen como propósito reducir los factores que dañan la zona ecológica, con un monitoreo constante, esto es posible por los procesos de percepción remota, obteniendo los resultados de cambio de uso de suelo, para determinar y difundir la gran importancia de las áreas naturales protegidas.

En algunos casos de estudio, es necesario la cartografía de vegetación y el uso de suelo del área natural protegida, utilizando las técnicas de percepción remota analizando las imágenes satelitales con base a mejorar o elaborar un plan de control de la zona ecológica, así como la elaboración de una cartografía.

En congruencia con LGEEPA (Periódico Oficial del Estado, 1999) es necesario señalar que las áreas naturales protegidas se dividen en seis categorías de carácter federal, clasificadas de acuerdo con sus características fisiográficas, biológicas, socioeconómicas, objetivos y modalidades de uso, es así como dentro de las áreas naturales de competencia federal se encuentran:

- Reservas de la biosfera: Son áreas representativas, de uno o más ecosistemas, no alterados por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en las cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción
- Parques nacionales: Áreas con uno o más ecosistemas que destaquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o por otras razones análogas de interés general. En estos parques está prohibido el aprovechamiento de los recursos naturales y el asentamiento de grupos humanos.
- Monumentos nacionales: Estas áreas contienen uno o varios elementos naturales, además, por su carácter único, valor estético, histórico o científico, se debe incorporar a un régimen de protección absoluta. No tienen la variedad de ecosistemas ni la superficie necesaria para ser incluidos en otras categorías de manejo.
- Áreas de protección de recursos naturales: Son áreas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos preferentemente de aptitud forestal.
- Áreas de protección de flora y fauna: Son áreas establecidas de conformidad con las disposiciones generales de la LGEEPA y otras leyes aplicables en lugares que contiene

los hábitats de cuya preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de especies de flora y fauna silvestres.

- Santuarios: Son áreas establecidas en zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora o fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitats de distribución restringida. Abarcan cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas u otras unidades topográficas o geográficas que requieran ser preservadas o protegidas.

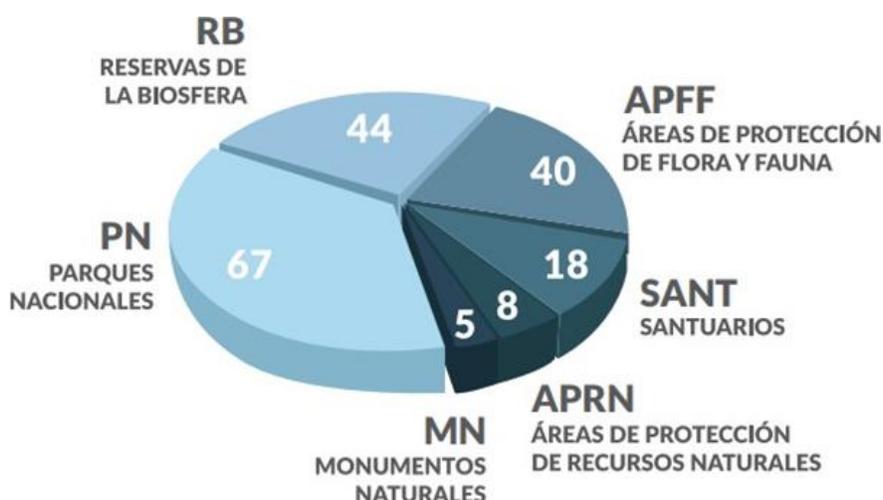


Figura 1: Clasificación de las Área Naturales Protegidas en México. Fuente: Sistema de Información, Monitoreo y evaluación para la conservación “SIMEC”, CONANP. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2018).

Además de las áreas de competencia estatal y municipal como pueden ser:

- Reservas ecológicas estatales: Son áreas representativas de uno o más ecosistemas no alterados significativamente por la acción del ser humano, o que requieran ser preservados y restaurados, en los cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional y estatal, incluyendo a especies endémicas, amenazadas o en peligro de extinción.
- Parques estatales: Representaciones biogeográficas y ecológicas a nivel estatal de gran belleza escénica; con valor científico, histórico, educativo y de recreo; c o n existencia de flora y fauna, protegidas por su aptitud para el desarrollo del turismo o bien por otras razones análogas de interés general. En los parques estatales sólo podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna, la preservación de los

ecosistemas y de sus elementos, la investigación, recreación, turismo y educación ecológica.

- Jardines históricos: Áreas aledañas a monumentos históricos de interés de la Federación o del Estado, pobladas por flora no nativa.

Finalmente, el patrimonio natural son todos los monumentos naturales constituidos por la formación física y biológica, por ende, en México y el mundo se posee una sociedad cada vez más comprometida con la conservación y el cuidado de los recursos naturales

2.2 Incendios forestales.

Los incendios han llegado a convertirse en serios problemas ambientales debido a la emisión de gases y partículas a la atmósfera, es decir, dichas emisiones intervienen en los procesos de circulación atmosférica, estas emisiones de gases tienen un efecto invernadero o mejor conocido como GEI, los cuales contribuyen de gran manera al aumento del cambio climático.

La actuación del fuego ya sea como elemento natural, o inducido por el hombre para transformar el uso del suelo, es multiseccular como lo demuestra la adaptación de la mayor parte de las especies vegetales de nuestro entorno a este fenómeno

Se calcula que las actividades humanas ocasionan el 99% de estos incendios y solo el resto tiene como causa fenómenos naturales como descargas eléctricas y la erupción de volcanes (CNPC, 2019). De acuerdo con el promedio de los últimos años, las actividades agropecuarias y la urbanización son las causas principales que generan un incendio, además de algunas prácticas de los cazadores furtivos y de quienes llevan a cabo cultivos ilícitos, junto con las acciones intencionadas y los descuidos de personas que no apagan bien sus cigarrillos o fogatas, provocando que se modifique los índices de amenaza y aumente el riesgo de desastres para la humanidad (CONAFOR, 2022). Es así como estos incendios afectan en gran magnitud a los diferentes componentes del medio ambiente, uno de ellos es la calidad del aire debido a las emisiones de contaminantes que se producen durante la quema de la biomasa. Es por esta razón Vicente (2015) nos menciona que:

Diariamente se queman miles de hectáreas de bosques, sabanas, pastizales, matorrales, desiertos, humedales y campos agrícolas en alguna parte del globo. El fuego desempeña

un rol importante dentro del ciclo vital de los ecosistemas forestales adaptados al fuego, pero se convierte en problema a partir de la intervención humana.

Es por esta razón que el impacto ecológico que generan los incendios en los ecosistemas forestales tiene muchas repercusiones sobre la diversidad biológica, debido a que existe mayor probabilidad de que se produzca nuevos episodios de incendios del mismo tipo en los años subsiguientes, por consecuencia de la disposición de los combustibles forestales que se producen, es decir, que al caer los árboles, permite que la luz del sol reseque el bosque y se produzca una acumulación de combustibles con un aumento de especies susceptibles a los incendios, como por ejemplo, la flora y fauna, la contaminación del agua y sus efectos sobre la salud y la seguridad humana, así como además “la pérdida de biodiversidad y la degradación del sitio a nivel del paisaje, lo que lleva a la desertificación, la erosión del suelo o las inundaciones” (FAO, 2007) .

2.2.1 Tipos de incendios forestales.

Un incendio forestal se concibe como la propagación libre y no dispuesta del fuego sobre las superficies forestales, tales como: bosques, selvas, pastizal, matorrales, etc. Es por esta razón que la CONAFOR (2010, p.7) considera tres tipos fundamentales de incendios forestales:

- Superficiales: son los más comunes y queman el sotobosque. Su velocidad de propagación dependerá del tipo y condición del combustible, topografía y tiempo atmosférico. Se producen cuando el fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del terreno y alcanza hasta metro y medio de altura. Éstos afectan combustibles vivos y muertos como pastizales, hojas, ramas, ramillas, arbustos o pequeños árboles de regeneración natural o plantación, troncos y humus.
- Copa o aéreos: las llamas alcanzan las copas de los árboles, son los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar debido a que el fuego consume toda la vegetación. También comienzan en forma superficial, pero en este caso, las llamas avanzan primero sobre el nivel del suelo y se propagan por continuidad vertical, es decir, escalan vegetación dispuesta hacia arriba que sirve de combustible en escalera hacia las copas de los árboles.

- **Subterráneos:** Cuando un incendio superficial se propaga bajo el suelo. En este caso llega a quemarse la materia orgánica acumulada y las raíces, la capa de humus del suelo y la micro-fauna. Se caracteriza por una combustión sin llamas. La velocidad de propagación en este caso es lenta. E incluso puede alcanzar los afloramientos rocosos. Generalmente éstos no producen llamas y emiten poco humo.

Es necesario resaltar, que, aunque la quema de vegetación en ocasiones parezca provechosa deja tras de sí muchos procesos ambientales desencadenantes de problemas, en pocas palabras cuanto más grande es el incendio más grande es el problema ambiental que genera, esto ha generado un deterioro de los recursos naturales y a pérdidas económicas ya sea de manera directa o indirecta, así como además de vidas humanas. Es por ello que Ressler & Cruz (2012) mencionan que:

En México, esta situación no es la excepción; de acuerdo con las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes. De 1970 a la fecha han ocurrido, en promedio, unos 7 000 incendios forestales por año, afectándose en promedio unas 221 179 hectáreas (p.12).

2.2.2 Causas principales de los incendios forestales.

Una de las principales causas de los incendios forestales en México es atribuibles principalmente a las actividades humanas en un 98% de total nacional y el resto se debe a causas naturales derivadas de fenómenos como descargas eléctrica o erupciones de volcanes. Es de esta manera como la SEMARNAT (2016) las divide en cuatro principales causas:

- **Accidentales:** Rupturas de líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos.
- **Negligencias:** Quemadas agropecuarias no controladas, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales.
- **Intencionales:** Quemadas por conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios.
- **Naturales:** Caída de rayos o erupciones volcánicas.

En efecto se calcula, que las actividades agropecuarias representan el 41% de las causas que originan los incendios forestales; le siguen las causas desconocidas con el 13%, fumadores con el 12%, fogatas con el 11% y el resto con el 13% (Ressl & Cruz, 2012).

Por ellos los bosques tropicales están sometidos a incendios causados por los seres humanos con el fin de talar árboles para practicar la agricultura. La deforestación es más común en los bosques alterados donde se queman árboles en pie, maleza e incluso quemar completamente el bosque, dejando el suelo totalmente descubierto.

Por otro lado, Parra (2011) menciona que además existen otros factores que configuran directa o indirectamente las condiciones para el desarrollo de incendios de la cobertura vegetal (ICV) en un ecosistema determinado son:

- Condiciones meteorológicas locales como, humedad ambiental, temperatura y vientos.
- Características de los combustibles involucrados (humedad, cantidad, compactación, distribución horizontal y vertical, inflamabilidad, relación de combustibles vivos/muertos).
- Características físicas del sitio (pendiente, orientación, ubicación en el paisaje, suelo).
- Características del ecosistema afectado (fase sucesional, estructura y composición. Grado de fragmentación, tamaño, forma y conectividad de los fragmentos. Características y demandas ecológicas de las especies vegetales presentes en el área afectada, adaptación de las especies al fuego).
- Antecedentes de eventos meteorológicos, eventos ecológicos locales graves o catastróficos (huracanes, tormentas, deslizamientos de tierra, vulcanismo y plagas).
- Régimen histórico de perturbaciones (dinámica espacio-temporal y sus tendencias, recurrencia espacial, alteración antrópica del régimen natural de fuego).
- Prácticas culturales asociadas a procesos productivos (uso no racional del fuego, manejo descuidado de desechos forestales).
- Proximidad a centros poblados, a sitios de interés arqueológico y a infraestructuras de servicios o de producción (pp. 23 – 24).

De acuerdo con el autor es de suma importancia tener en cuenta que cualquier tipo de incendio, espacio. Temporalidad y cobertura por fuera de los límites históricos puede provocar pérdida de biodiversidad, un incremento de la probabilidad de recurrencia y hasta la transformación del ecosistema en uno totalmente distinto.

2.2.3 Factores que determinan un incendio forestal.

El Comportamiento de la mayoría de los incendios forestales que ocurren es fácilmente predecible, siempre que se conozcan adecuadamente los factores ambientales, que influyen en la ignición y en la propagación del fuego (Julio A. & Giroz G., 1975). Una vez que un incendio forestal se ha iniciado, la propagación y el comportamiento del fuego está determinado por tres factores: topografía, tiempo atmosférico y combustibles. A estos tres factores se les conoce como la gran triada (CENAPRED, 2008).

- a) **La topografía:** Incluye elementos de pendiente, elevación y orientación de la ladera. Las variaciones que existan en este componente pueden causar cambios en el comportamiento del fuego sobre el terreno. Una pendiente muy pronunciada acelera la propagación del incendio debido a que los combustibles forestales se encuentran más cerca de las llamas; la elevación tiene una gran influencia, en las partes más bajas, las temperaturas son menores y generalmente hay mayor cantidad de combustibles (CENAPRED, 2008)
- b) **Tiempo atmosférico:** Son los factores climáticos y meteorológicos determinan los períodos y horas críticas de ocurrencia y propagación de incendio. Entre las variables más importantes cabe señalar a: Temperatura y Humedad Relativa del Aire, Velocidad del Viento y Precipitaciones (Julio y Giroz, 1975).
- c) **Combustibles:** Los combustibles o la vegetación, es uno de los factores más importantes y muchas veces es decisivo para el comportamiento del incendio, además es uno de los componentes del “triángulo de fuego”; las propiedades extrínsecas más importantes y que afectan la intensidad y velocidad de propagación son: la carga de combustible, forma y tamaño del combustible, compactación y densidad, disposición del combustible,

2.2.4 Daños y efectos de los incendios forestales.

Es necesario tener en cuenta los daños que pueden causar los incendios forestales, así mismo conocer los efectos que traen consigo, es por esta razón que Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2011), las clasifica en dos grandes categorías:

- **Daños Directos:** Corresponden a las pérdidas, totales o parciales, de bienes tangibles, de fácil valoración económica, cuya identificación y evaluación es factible efectuarla inmediatamente o en un breve lapso después de producida la acción del fuego. En esta

categoría cabe señalar las pérdidas de maderas y otros productos forestales, cultivos agrícolas, cercos, ganado, aserraderos y otras instalaciones rurales.

- Daños Indirectos: Corresponden a las pérdidas de carácter intangible, difíciles de identificar y evaluar, incluso a veces en el mediano plazo, con secuelas que generalmente se manifiestan en valores que no estuvieron directamente afectados por la acción del fuego. Cabe aquí destacar la pérdida de fertilidad de los suelos, la iniciación de procesos erosivos, el embancamiento de cursos de agua, las alteraciones en el equilibrio biológico y en los ecosistemas, el deterioro de la belleza escénica y la higiene ambiental e, incluso, la secuela de problemas económicos y sociales que se originan en comunidades, cuyo sustento se basa principalmente en el aprovechamiento de los recursos forestales.

Posteriormente, es necesario tener en cuenta los efectos, como lo es la calidad de los daños, o las alteraciones que se originan en la dinámica de los diferentes procesos relativos a los recursos naturales renovables, así mismo, incluyendo las funciones que estos cumplen en el desarrollo económico y social.

Es así como la Corporación Nacional Forestal [CONAF] (2014) , divide a estos efectos en dos aspectos importantes:

- Socioeconómicos:

A las personas: Contaminación de suelos, agua y aire, deterioro del paisaje o belleza escénica, limitaciones para la recreación, esparcimiento y prácticas deportivas. accidentes de vehículos. El humo que genera el fuego puede ocasionar accidentes de tránsito, debido a que la visibilidad para la conducción se reduce considerablemente.

Al desarrollo comunitario: Daños a la propiedad, deterioro o detención de procesos productivos, reducción de fuentes de trabajo, limitaciones al desarrollo rural y al comercio local, deterioro del turismo y, por lo tanto, de los ingresos que genera, pérdida de valores culturales e históricos, perjuicios a obras públicas e infraestructura de comunicaciones y empobrecimiento de una población que habita paisajes muy destruidos. (p. 16)

- Ecológicos:

Clima: Cambio en los regímenes de vientos, disminución de la humedad ambiental, incremento de la temperatura ambiental, aumento de la radiación solar y efecto invernadero.

Suelo: Deterioro de las propiedades físicas del suelo, cambio de las propiedades químicas del suelo, con pérdida frecuente de los nutrientes, pérdida de las propiedades biológicas del suelo, destrucción del estrato de materia orgánica no incorporado al suelo mineral y erosión de los suelos.

agua y cuencas hidrográficas: Alteración en los cursos de agua, incremento del escurrimiento superficial de agua, alteración del ciclo hidrológico, deterioro en la calidad del agua. En el período de lluvias, crecidas de ríos por embancamiento y con la consiguiente generación de inundaciones.

Vida silvestre: Destrucción de formaciones vegetales o alteraciones en la composición de las especies, migraciones de animales mayores, aves, insectos y microorganismos, desequilibrios ecológicos o rupturas en la cadena biológica, fragmentación y con ello debilitamiento de los ecosistemas.

Aire y la atmósfera: Alteraciones físico-mecánicas de la atmósfera, incorporación de emisiones contaminantes y producción de humo (pp. 16 – 17).

Así mismo otros estudios relacionados a los efectos de los incendios forestales sobre la flora es el fomento de las condiciones necesarias para la emergencia de especies invasoras en zonas quemadas, donde los incendios forestales es un impacto negativo a las especies nativas ya que promueven la germinación de especies exóticas y reducen la biodiversidad en bosques naturales. (García *et al.*, 2007) y una oposición afirma que estas especies fomentan la generación de incendios forestales (Speziale *et al.*, 2014).

2.2.5 Manejo integral del fuego.

El manejo del fuego se define como la gama de posibles decisiones técnicas y acciones favorables para prevenir, mantener, controlar o usar el fuego en un paisaje determinado (Moscovich *et al.*, 2014), teniendo en cuenta que el fuego es un elemento que también puede traer un beneficio a los ecosistemas (cuando estos son adaptados al fuego), se trata de visualizar el problema de los incendios forestales bajo una nueva visión, con perspectivas integradoras para la atención a fondo, lo cual implica un gran esfuerzo institucional que incluso rompe con paradigmas. De acuerdo a

Myers (2006) el manejo del fuego se proyecta como un triángulo cuyos lados son la prevención, la supresión y el uso del fuego.



Figura 2: Triángulo de manejo del fuego (Myers, 2006).

No obstante, el manejo del fuego no deriva a ser la única solución para enfrentar la amenaza que representa la probabilidad de ocurrencia de incendios, ya que actualmente se puede observar modificaciones en los ciclos del fuego que ha sido alterado o modificado por el ser humano, debido, al crecimiento de la población, que deriva a la obtención de diferentes servicios públicos que conlleva al desarrollo urbano, la explotación minera y el cambio climático, además del cambio de uso de suelo de lo forestal hacia lo agrícola o urbano.

Es por ello que es importante incluir en la integración de estrategias de factores como la comprensión de los regímenes de fuego en los ecosistemas, las causas del fuego, los riesgos que estos implica y las soluciones sostenibles, mediante el desarrollo de planes para el manejo de incendios, que permita determinar nivel necesario de protección forestal, el costo de las actividades relacionadas con el fuego y la tecnología de los fuegos prescritos en la programación del uso múltiple (Ramos, 2010), por tanto, el desarrollo de un mapa de probabilidad a incendios forestales bajo un enfoque antrópico nos ayuda a fortalecer estas actividades.

Myers (2006) define al Manejo Integral del Fuego como

Un enfoque para hacer frente a los problemas y a las preocupaciones causados por los incendios, tanto dañinos como beneficiosos, dentro del contexto de los ambientes naturales y de los sistemas socioeconómicos en los que ocurren, mediante la evaluación y el balance de los riesgos relativos planteados por el fuego con los papeles ecológicos y económicos

beneficiosos o necesarios que puede jugar en un área de conservación, región o paisaje determinado (p.9).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente el Manejo Integral del Fuego considera lo siguiente:

- 1) Los tres componentes técnicos del manejo del fuego: prevención, supresión y uso del fuego con.
- 2) Los atributos ecológicos del mismo, es decir, el régimen de fuego ecológicamente adecuados.
- 3) Las necesidades socioeconómicas y culturales del uso del fuego junto con los impactos negativos que el fuego puede tener sobre la sociedad.

Estos tres aspectos del manejo integral del fuego pueden representarse por medio de otro triángulo: el Triángulo del Manejo Integral del Fuego (figura 3) donde informa la noción de que las decisiones de manejo del fuego deben ser tomados en cuenta dentro de los contextos ecológicos y socioeconómicos/culturales en los cuales hay probabilidad de que los incendios ocurran o sean excluidos. Esta integración ayudará a asegurar que se opongán las causas subyacentes del fuego y la propensión ecológica y la necesidad de ciertos ecosistemas de quemarse. De lo contrario, los resultados no serán los esperados y generará cambios en la vegetación, un aumento en los incendios destructivos de origen natural así como de manera antropogénica ocasionando la pérdida de biodiversidad, todos éstos con un alto costo económico (Myers, 2006).



Figura 3: Triángulo del Manejo Integral del Fuego (Myers, 2006)

El manejo del fuego es parte de la gestión de un territorio y se efectúa siempre en un contexto social, donde involucra aspectos como la ocupación del ser humano dentro del espacio

geográfico, los usos que se le dan al suelo y los recursos, los cambios demográficos (no solo en la cantidad de la población, sino también en su distribución), la economía (los recursos materiales de la sociedad, personas con empleo o desempleadas, la forma en que las personas obtienen su sustento e intercambian bienes y servicios básicos), la cultura (que comprende las percepciones, ideas, valores, creencias, conocimiento y medios técnicos de los grupos sociales) y las instituciones (las normas, las leyes y las normas, las formas de organización social) (Jardel, 2010).

El manejo del fuego debe de ser planificado, pensando con una visión de largo plazo no solo se debe basarse en acciones de prevención física, aplicación eventual de quemas controladas, combate de incendios, etc. Se necesita un programa coherente, compatible e integrado con otras actividades que se realizan dentro de la unidad de manejo, con objetivos claros, metas específicas, acciones programadas y previsión de los medios humanos y materiales necesarios para ponerlo en práctica (Jardel *et al.*, 2014).

2.4 Sistema de información geográfica (SIG).

2.4.1 Definición.

De acuerdo al (INEGI, 2014) define como SIG: “Al conjunto de herramientas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real” (p. 4).

Los SIG son una herramienta que brinda labores de uso y representación de información geográfica que el operador manipulará de acuerdo con las exigencias que se le propone. Por consiguiente, está diseñada para trabajar con este tipo de información y así representarla en un modelo cartográfico, además los datos obtenidos de un área en específico son analizados e interpretados con la ayuda de software o hardware para la captura de información de uso de datos cartográficos.

El SIG se aplica en estudios de impacto ambiental, mediante sistemas de información que complementa los datos para su análisis, llevando una distribución adecuada en los componentes a utilizar como lo es la organización, información geográfica normas y procedimientos, y un software adecuado para el estudio (INEGI, 2014)

De igual manera los SIG se caracterizan por ser una herramienta que desarrolla datos referenciados en una base de datos, como un sistema que integra y agrupa los distintos datos de la misma zona de estudio relacionándose entre sí, para caracterizar al SIG como una base de datos aún más que

una simple cartografía o mapas, sino un conjunto de fórmulas que se convierten en un complemento de información para tener características en específico del análisis del territorio (Olaya, 2011).

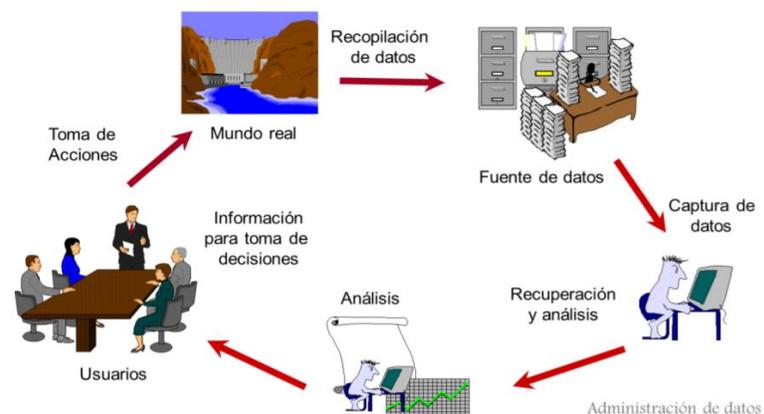


Figura 4: Ciclo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) (INEGI, 2014)

2.4.2 Componentes de un SIG.

Una forma de entender los SIG es conocer como está formado a través de subsistemas, cada uno encargado de llevar distintas funciones particulares (Olaya, 2011). Los subsistemas se describen a continuación:

- Subsistema de datos: Se encarga de las operaciones de entrada y salida de los datos y ayuda a gestionarlos dentro del SIG.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica: Crea representaciones (mapas) a través de los datos recolectados y así interactuar entre ellos, también cumple con las funciones de edición.
- Subsistema de análisis: Contiene los métodos para poder interpretar y analizar los datos ya representados.

Los SIG no solamente son un programa en el cual se procesan datos georreferenciados, sino que necesita un conjunto de componentes como lo son los tecnológicos (software, hardware, etc.), datos, métodos, personal capacitado e ideas, sin los cuales no podría llevarse a cabo su desarrollo (Plana *et al.*, 2011).

2.4.2.1 Datos.

Los datos son la materia prima necesaria para hacer que el resto de los componentes de los SIG cobren sentido y los que contienen la información geográfica vital para su propia existencia (Olaya,

2011). Teniendo en cuenta el papel que juegan los datos se puede comprender la función que tienen dentro del sistema para que funcione con plenitud.

El INEGI (2014) menciona que:

Los datos se refieren a descripciones básicas de cosas, acontecimientos, actividades y transacciones que se registran, clasifican y almacenan pero que no se organizan de acuerdo con ningún significado específico. Los elementos datos pueden ser numéricos, alfanuméricos, figuras, sonidos e imágenes (p. 11).

2.4.2.2 Procesos.

Un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Estas formulaciones representan procesos que pueden ser sencillos o muy complejos que pueden resultar de aplicación de uno u otro campo o de carácter muy general (Olaya, 2011). El análisis requiere de métodos bien definidos y consistentes para producir resultados correctos.

Las funciones incorporadas a cualquier SIG comercial suelen ser herramientas para poder llevar a cabo por buen camino una investigación, por lo contrario, los objetivos son más específicos y es importante contar con herramientas para sistematizar el procedimiento. (Taboada y Cotos, 2006).

2.4.2.3 Visualización.

Gran parte de la información puede ser representada de forma gráfica lo cual facilita su interpretación, la mayor parte de la información es más fácil de ser estudiada cuando se apoya de un elemento visual. En el caso particular de la información geográfica, la visualización no es solo una forma de trabajar, sino que resulta la más fácil e intuitiva para su visualización. La información geográfica tiene una inherente naturaleza visual, ya que el espacio en si es entendido de forma gráfica por el ser humano (Olaya, 2011).

2.4.2.4 Tecnología.

Dentro de este elemento se incluye tanto el hardware sobre el que se ejecutan las aplicaciones SIG, como las aplicaciones, es decir el software. Ambos forman un binomio tecnológico en el que encontramos diversas alternativas, y que se enriquece diariamente con la rápida evolución del mercado tecnológico (Olaya, 2011).

Olaya (2011) comenta que: “El hardware es el elemento físico del SIG, conforma el equipo o la plataforma sobre la que tiene el lugar del trabajo. Los SIG funcionan en un amplio rango de ordenadores, desde equipos centralizados hasta configuraciones de la red” (pág. 20).

Para la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se habrán de prever las necesidades en cuanto almacenamiento de datos, velocidad, procesador, dispositivos e entrada y salidas requeridas, etc. Mientras “el software es la parte visible del SIG” (Taboada y Cotos, 2006), el encargado de operar y manipular los datos (Olaya, 2011).

2.4.2.5 Factor organizativo.

El SIG requiere de una completa organización y una correcta coordinación entre sus distintos elementos. El factor organizativo ha ido ganando progresivamente dentro de los SIG, a medida que su evolución ha dejado en un sistema más complejo y un mayor número de relaciones e interrelaciones de los componentes que lo conforman. Especialmente la relación de los usuarios que lo manejan, así como la relación del resto de los elementos con los datos, sobre los cuales actúan de algún modo (Olaya, 2011).

Los usuarios juegan un papel importante al igual que el resto de los elementos, aunque no el menos importante, ya que un SIG modifica el modo de trabajo de una organización. La base cartográfica puede estar más completa en manos de un personal calificado, sin embargo, una incorrecta manipulación de la información puede terminar en obtención de conclusiones erróneas que imposibiliten la finalización del proceso en la toma de decisión (Taboada y Cotos, 2005).

2.5 Conceptualización del riesgo.

El riesgo se conceptualiza como la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural específico, caracterizado por su extensión, intensidad y duración, con potenciales consecuencias adversas (Moraga, 2010). En el contexto de los incendios forestales, este concepto se refiere a la probabilidad de que se desate un incendio en un lugar y momento determinados, teniendo en cuenta tanto las características naturales del entorno como los factores desencadenantes, así como las variables históricas que revelan patrones de comportamiento del fuego (Baquero, 2019).

La evaluación de las condiciones de riesgo de incendio requiere tener en cuenta una variedad de aspectos (Chuvieco, 2009). Para ello, resulta fundamental calcular la probabilidad de ocurrencia

de incendios forestales, lo que permite identificar las áreas del territorio con mayor susceptibilidad a este tipo de eventos. No obstante, la gestión efectiva del riesgo de incendios forestales demanda un enfoque dinámico que, a partir del análisis continuo de la probabilidad de incendio forestal, permita una adecuada adaptación a las condiciones cambiantes del entorno

2.5.1 Amenaza.

Las amenazas que potencialmente enfrenta la sociedad son muy amplias y tiende a aumentar constantemente en un contexto de calentamiento global. Incluye las que son propias del mundo natural, como son las asociadas con la dinámica geológica, geomórfica, atmosférica y oceanográfica (por ejemplo, sismos, deslizamientos de tierra, huracanes y tsunamis); “las que son de naturaleza socio-natural, producidas como resultado de la interacción o relación del mundo natural con las prácticas sociales, como son muchos casos de inundación, deslizamiento y sequía” (Lavell, 2001). En estas, la deforestación, cambios en los patrones de uso del suelo u otros procesos sociales, crean o amplían las condiciones de amenaza; y las antropogénicas, “producto de la actividad humana, como son los casos de explosiones, conflagraciones, derrames de materiales tóxicos, contaminación de aire, tierra y agua por productos industriales, etc.”(Lavell, 2001). Con relación a lo mencionado anteriormente, es evidente notar que a pesar de los diversos orígenes de los fenómenos que se clasifican como amenazas, es importante destacar que toda amenaza es construida socialmente, debido a la poca conciencia ambiental que se tiene en torno a las consecuencias de la explotación de la flora y fauna, sin tener en cuenta que a largo plazo dichas afectaciones nos llegarán a afectar directamente en nuestro bienestar

Como se ha venido diciendo, constantemente nos encontramos expuestos al peligro latente, ya sea de un evento físico de origen natural o bien causado e inducido por la acción humana de manera accidental, los cuales pueden causar pérdida de vidas, lesiones u otros daños a la salud o bien la pérdida de bienes o inmuebles, infraestructura, etc. Es de esta manera como Waskrey (1993) reafirma que la amenaza:

Es representada por un peligro latente asociado con un fenómeno o la combinación de varios fenómenos de origen natural, social o tecnológico, o provocados por el hombre, que puede manifestarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente.

Con relaciona lo antes mencionado, es importante tener en cuenta a qué clase de amenazas nos encontramos expuestos y la manera en la cual se suscitan cada una de ellas, debido a que no siempre nos encontramos preparados ante dichas amenazas, es por esta razón que Wilches-chaux, (1998) expone tres tipos de amenaza:

- Naturales: Tienen su origen en la dinámica propia del planeta y los seres humanos no influyen ni tampoco intervienen en la ocurrencia de este tipo de eventos.
- Socio-naturales: Su manifestación es a través de eventos que parecen de origen natural, sin embargo, es la acción del ser humano la que interviene en su ocurrencia y/o agrava sus impactos.
- Antrópicas: Son sin duda producto de la intervención del ser humano sobre la naturaleza y/o la población.

2.5.2 Vulnerabilidad.

Fundamentalmente otro de los conceptos relevantes en esta investigación es la vulnerabilidad que no solo se encuentra asociada a las condiciones del individuo, sino, cada vez más, con las condiciones del medio (ambientales, sociales o de otro tipo) en que su vida se desarrolla, es así como Blaikie *et al.*, (1996) define a la vulnerabilidad como “las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural”. De ahí que se hable, frecuentemente, de poblaciones vulnerables, para referirse a aquellos grupos de personas que, a consecuencia de las condiciones del medio en que viven, están en una situación de mayor susceptibilidad al daño.

Al mismo tiempo, cabe resaltar que la vulnerabilidad se refiere “a una serie de características diferenciadas de la sociedad, o subconjuntos de la misma, que le predisponen a sufrir daños frente al impacto de un evento físico externo, y que dificultan su posterior recuperación”(Lavell, 2001). Y en donde está relacionado un espacio y un tiempo determinado, implicando procesos sociales, económicos, culturales ambientales y la sinergia de los mismos, papel que intervienen las políticas y las capacidades de las instituciones para adaptarse, reducir la pobreza y la inequidad (Kelly & Adger, 2000).

Como hasta el momento hemos notado durante el paso de los años diversos han sido los autores quienes sean enfocado a encontrar una definición exacta acerca de la vulnerabilidad, el cual, ha tomado cada vez más importancia debido a que constantemente nos encontramos expuestos al

peligro, los cuales pueden llegar a ser desde los accidentes más mínimos como los más grave, no solo de manera personal sino que grupal o colectivo, es así como tomando él cuenta la opinión de quien define dicho concepto como “el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0, o sin daño, a 1, o pérdida total”(Waskrey,1993). En términos generales, la "vulnerabilidad" puede entenderse, entonces, como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.

Aproximémonos al análisis de la vulnerabilidad global desde distintos puntos de vista, para entender que no estamos hablando de una característica absoluta o estática de una comunidad, sino de un proceso complejo, dinámico y cambiante, que determina que esa comunidad quede expuesta o no a la ocurrencia de un desastre, o que tenga más o menos posibilidades de recuperación. A esos puntos de vista vamos a darles el nombre de factores de vulnerabilidad:

- Factores ambientales son aquéllos que se relacionan con la manera cómo una comunidad determinada "explota" los elementos de su entorno, debilitándose a sí misma y debilitando a los ecosistemas en su capacidad para absorber sin traumatismos los fenómenos de la naturaleza. Por ejemplo, la deforestación incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas y de las comunidades frente a los aguaceros, que normalmente no tendrían por qué convertirse en desastres, pero que al caer sobre el suelo desnudo provocan erosión, deslizamientos o derrumbes, inundaciones y avalanchas. Asimismo, y por las mismas razones, la deforestación aumenta la vulnerabilidad frente a las sequías.
- Factores físicos tienen que ver, entre otros aspectos, con la ubicación física de los asentamientos o con las calidades y condiciones técnicas-materiales de ocupación o aprovechamiento del ambiente y sus recursos. Los campesinos que cultivan las laderas de volcanes activos, atraídos por la gran fertilidad de los suelos (abonados a través de los siglos por la actividad volcánica), son altamente vulnerables frente a las erupciones, precio que "pagan" a cambio de los beneficios que les otorga la tierra.
- Factores económicos se refieren tanto a la ausencia de recursos económicos de los miembros de una comunidad (que los obliga, por ejemplo, a invadir zonas de amenaza o a

construir sin la técnica o los materiales adecuados), como a la mala utilización de los recursos disponibles para una correcta "gestión del riesgo".

- Factores sociales se refieren a un conjunto de relaciones, comportamientos, creencias, formas de organización (institucional y comunitaria) y maneras de actuar de las personas y las comunidades que las coloca en condiciones de mayor o menor exposición. Dentro de estos factores pueden destacarse los siguientes: los factores políticos o ideológicos y culturales.
- Factores educativos en general, constituyen lo que se conoce como "calidad de la educación". Cuando la comunidad está sometida a distintos tipos de amenazas, una educación "de buena calidad" debe incluir el aprendizaje de comportamientos tendientes a enfrentar esas amenazas, a prevenir los desastres y a actuar de manera adecuada en caso que de todas maneras éstos se produzcan.
- Factores instituciones hace referencia a los obstáculos formales (prevalencia de los requisitos de forma sobre las urgencias de fondo, politización y corrupción en el Estado y los servicios públicos, excesivas normas y trámites legales, proliferación de controles innecesarios, burocratización de la vida cotidiana) que impiden una adecuada adaptación de la comunidad a la realidad cambiante del ambiente, y una rápida respuesta de las instituciones en caso de desastre. (Wilches-chaux, 1998, pp. 29- 32).

2.5.3 Riesgo.

Antes de comenzar es importante tener en cuenta a que nos referimos cuando hablamos de riesgo que no solo se limita a situaciones sociales a las que se puede encontrar expuesta, sino que también a las económicas, políticas, ambientales, etc. Es así como (Lavell, 2001) menciona que el riesgo se refiere "a un contexto caracterizado por la probabilidad de pérdidas y daños en el futuro, las que van desde las físicas hasta las sicosociales y culturales". Esta noción de riesgo implica la posibilidad y probabilidad de sufrir daños asociados con ciertas condiciones presentes en la sociedad, lo que expone a individuos, familias, comunidades, ciudades, viviendas, entre otros, a potenciales pérdidas en el futuro. Por lo tanto, el riesgo representa una condición latente que señala la posibilidad de sufrir pérdidas en el futuro. Es crucial tener presente esta amplia comprensión del riesgo al abordar cualquier análisis o estrategia relacionada con la gestión de riesgos, incluyendo la gestión de incendios forestales.

De igual forma “el riesgo es entendido como las potenciales pérdidas que pueden afectar a un grupo humano como respuesta a la acción conjunta de la amenaza y la vulnerabilidad, así el riesgo puede representarse matemáticamente como una probabilidad que excede los niveles económicos, sociales o ambientales de resistencia de un lugar en un tiempo determinado” (Tardón & Espinoza, 2017). Y Valencia (2006) define al riesgo como la “probabilidad de ocurrencia de un evento natural o antrópico en un área específica dentro de un periodo de tiempo, que afecte desfavorablemente de manera directa o indirecta, a una comunidad o a los bienes de ésta”.

Con relación a lo que nos señala el autor, es evidente cómo la imprudencia humana puede desencadenar consecuencias de gran magnitud, no solo poniendo en riesgo la integridad física de las personas, sino también su estabilidad económica, vivienda, y entorno familiar, entre otros aspectos. Un ejemplo claro de esto es el uso negligente del fuego, especialmente durante períodos de sequía, cuando la quema de ramas o hojas secas al limpiar terrenos es más común. Asimismo, la irresponsabilidad de algunas personas al arrojar colillas de cigarrillos en áreas con pastizales secos aumenta significativamente el riesgo de desencadenar incendios forestales, los cuales, de no ser controlados a tiempo, pueden expandirse rápidamente y poner en peligro tanto la flora como la fauna del área afectada. Es por esta razón que el riesgo “puede construirse socialmente, ya que el desastre, en sus causas se genera por la interrupción del ser humano en la naturaleza, al realizarse, este olvida el medio natural y sus procesos, llegando a producir altos costos humanos y materiales” (Ferrando, 2003). Por lo tanto, la identificación de diferentes factores de riesgo asociados a la actividad humana, tales como el uso del territorio (como carreteras, vertederos y áreas protegidas) y aspectos socioeconómicos (como la ocupación agrícola, nivel de ingresos y tasa de desempleo), es fundamental para desarrollar modelos predictivos confiables. Estos modelos pueden proporcionar información valiosa para la planificación y la implementación de estrategias de prevención y gestión de incendios forestales (Chuvienco *et al.*, 2007).

Por lo consiguiente el nivel de riesgo de una sociedad está estrictamente relacionado con sus niveles de desarrollo y la capacidad de modificar los factores de riesgo que pudiesen afectar potencialmente. Por lo cual los desastres son “riesgos mal manejados”. El desastre es para la sociedad un impacto o unas pérdidas cuyos niveles significan una condición de incapacidad de esta para enfrentarlas, absorberlas, y recuperarse de ellas empleando sus propios recursos y reservas (Briones, 2005).

Finalmente cabe resaltar que para que exista un riesgo debe haber tanto una amenaza (o, como algunos dirían, un peligro) como una población vulnerable a sus impactos, siendo la "vulnerabilidad" la propensión de sufrir daños que exhibe un componente de la estructura social (o la naturaleza misma). "El riesgo es, en consecuencia, una condición latente o potencial, y su grado depende de la intensidad probable de la amenaza y los niveles de vulnerabilidad existentes" (Rodríguez *et al.*, 1996). En este sentido, la vulnerabilidad es una expresión del desequilibrio o desajuste, en igual medida, entre la estructura social (ampliamente concebida) y el medio físico-constructivo y natural que lo rodea. La vulnerabilidad, entonces, nunca puede tener un valor absoluto, sino que depende siempre del tipo e intensidad de la amenaza. A nuestro modo de ver, la amenaza y el riesgo nunca deben considerarse sinónimos, por otra parte, el grado de riesgo siempre está en función de la magnitud de la amenaza y de la vulnerabilidad, es, entonces, una condición dinámica, cambiante y teóricamente controlable.

2.5.4 Gestión de riesgos.

Con el transcurso de los años, la sociedad ha ejercido una presión considerable sobre el medio ambiente, aumentando significativamente su vulnerabilidad. Esta relación entre la gestión de riesgos y la globalización demuestra que los riesgos no conocen fronteras nacionales, como lo evidencia el cambio climático, cuyos efectos se expanden a nivel mundial, requiriendo una respuesta activa y coordinada ante dichos riesgos (Giddens, 2007 citado por Rojas, 2017). En otras palabras, estamos constantemente expuestos a una amplia gama de riesgos que afectan tanto a nivel personal como social, ambiental, económico y más. Esta interconexión entre los riesgos locales y globales destaca la necesidad de una gestión integral y colaborativa de los riesgos, que aborde tanto las causas subyacentes como las consecuencias de estos, y que promueva la resiliencia de las comunidades y los ecosistemas frente a estos desafíos emergentes.

Cabe resaltar que la Secretaría para Asuntos de Vulnerabilidad (SAV) menciona que "la gestión del riesgo se enmarca en una visión de Desarrollo Sostenible, materializada en una política de desarrollo con el fin de contribuir con la seguridad, calidad de vida y los derechos/deberes colectivos con una participación ciudadana activa" (Tardón & Espinoza, 2017). Por otro lado la UNISDR (2009) señala que la gestión del riesgo:

Abarca la evaluación y el análisis del riesgo, al igual que la ejecución de estrategias y de acciones específicas para controlar, reducir y transferir el riesgo. Esta es una práctica

generalizada de diversas organizaciones para minimizar el riesgo en las decisiones de inversión y para abordar riesgos operativos, tales como la interrupción de los negocios, las fallas en la producción, el daño ambiental, los impactos sociales y los daños como consecuencia de los incendios y de las amenazas naturales.

Por lo consiguiente, la gestión del riesgo cuenta con componentes principales, estos se estructuran en base a Tardón & Espinoza (2017):

- **Identificación y evaluación:** Se debe generar estudios y evaluaciones de los riesgos potenciales que se pueden desarrollar en una región determinada, acompañado de un proceso de observación del territorio y un monitoreo constante, identificar la percepción social del riesgo de los habitantes (individual) y el imaginario social de la comunidad (grupal).
- **Reducción del riesgo:** Consta de obras e infraestructura que mejore la resistencia de la población frente a un evento de desastre, reforzamiento y mantenimiento de las obras ya existentes. Generar una conciencia colectiva del riesgo e incorporar los estudios de riesgo a la planificación del territorio y el ordenamiento territorial mediante la zonificación e incluir en los códigos de construcción infraestructura resiliente.
- **Protección financiera:** Corresponde a medidas de respaldo frente a eventos de riesgo tanto de los núcleos familiares como regiones y países mediante la transferencia del riesgo, que consiste en adquirir seguros que cuiden y velen por la protección de los bienes materiales si se ven involucrados en pérdidas.
- **Preparativos y respuestas a desastres:** Pone atención a la respuesta de la emergencia, generando sistemas de alerta-alarma eficientes, busca planificar la respuesta a los eventos de desastre por medio de protocolos establecidos y probarlos previos a un desastre mediante simulacros.
- **Recuperación post-desastre:** Debe existir una organización institucional de los organismos que se encargan de las labores de recuperación, rehabilitación y reconstrucción post-desastre incluyendo a la comunidad afectada y articulando las redes de apoyo.

El objetivo final de la gestión es el de garantizar que los procesos de desarrollo impulsados en la sociedad se dan en las condiciones óptimas de seguridad posible y que la atención dado al problema de los desastres y la acción desplegada para enfrentarlos y sus consecuencias promueven hasta el

máximo el mismo desarrollo. Es la continuación lógica, la forma más articulada de fortalecer las nociones expuestas en la idea de la transición (o “puente”) entre la respuesta humanitaria y el desarrollo y en la idea de la reconstrucción con transformación y desarrollo.

2.5.5 Gestión correctiva y prospectiva.

La gestión correctiva se planea como el conjunto de acciones tendientes a reducir el riesgo ya existente, ya sea que este resulte de prácticas y decisiones inadecuadas de uso y ocupación de territorio y por cambios ambientales o sociales que tuvieron lugar con posterioridad al desarrollo originalidad de una comunidad (Narvaéz *et al.*, 2009). Algunos ejemplos de la Gestión Correctiva del Riesgo de Desastre pueden ser: la construcción de diques para proteger poblaciones ubicadas en zonas de inundación, la adecuación de edificios para hacerlos sismo-resistentes, los cambios en los esquemas agrícolas para adecuarlos a condiciones ambientales adversas o la reforestación de cuencas de ríos para disminuir la erosión.

Mientras que la gestión prospectiva, es un proceso del cual se prevé un riesgo que podría construirse asociándose con procesos de desarrollo e inversión, tomando en cuenta las medidas que puedan garantizar que nuevas condiciones de riesgo no surjan con las iniciativas de construcción, producción, circulación, comercialización. Es así como Campos (2009) señala que dicha gestión “debe verse como un componente integral de la planificación del desarrollo y del ciclo de planificación de nuevos proyectos, sean éstos desarrollados por el gobierno, sector privado o sociedad civil” (p.51). es necesario tener en cuenta que su principal objetivo es evitar nuevos riesgos, así mismo garantizar adecuados niveles de sostenibilidad de las inversiones.

Así mismo, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2016) define la gestión correctiva (GC) como “el conjunto de acciones que se planifican y realizan con el objeto de corregir o mitigar el riesgo existente” (p. 3). Mientras que la gestión prospectiva (GP) como “el conjunto de acciones que se planifican y realizan con el fin de evitar y prevenir la conformación del riesgo futuro que podría originarse con el desarrollo de nuevas inversiones y proyectos en el territorio” (CENEPRED, 2016, p. 3). Por su naturaleza está íntimamente relacionada con los procesos de planificación del desarrollo y la oportunidad de incidir a partir de ella en la visión y estrategias de desarrollo, así como en la adecuación de la inversión.

Cabe resaltar que la gestión prospectiva y correctiva se implemente mediante la elaboración de instrumentos técnicos, así como en su incorporación en los instrumentos institucionales, estratégica y planificación territorial y los cuales están conformados de la siguiente manera:

- Proceso de estimación: para implementar este proceso se elaboran estudios que permiten determinar los niveles de riesgo de desastres por tipo de peligro, como: Escenarios de riesgos (describen, de manera general, las condiciones probables de daños y pérdidas que puede sufrir la población y sus medios de vida ante la presencia de un evento originado por un fenómeno natural, teniendo en cuenta su intensidad, magnitud y frecuencia.) y evaluaciones de riesgos (Es un procedimiento metodológico que permite determinar los niveles de riesgo. Es realizado por un profesional formado y acreditado como Evaluador del Riesgo).
- Proceso de prevención: Para implementar este proceso se elaboran planes para prevenir los riesgos; es decir, instrumentos orientados a evitar la generación de nuevos riesgos, tales como: plan de prevención y reducción del riesgo de desastres (PPRRD), declaratoria de intangibilidad, declaratoria de zona de muy alto riesgo no mitigable y determinación de fajas marginales.
- Proceso de reducción: para implementar este proceso se elaboran planes orientados a reducir el riesgo que ya existe, se identifican actividades y proyectos, tales como: limpieza y descolmatación de cauces, defensas ribereñas, disipadores de energía, Entre otros.
- Proceso de reconstrucción: Para implementar este proceso se elabora el Plan Integral de Reconstrucción que identifica proyectos de inversión pública para reconstruir o construir. Asimismo, está orientado a la recuperación social y económica de la zona afectada (CENEPRED, 2018, pp. 20 - 22).

La Gestión de Riesgos aplicado a los incendios, se traducen en la presencia de un contexto legal e institucional, que permita su operación, tomando en cuenta el enfoque de manejo integral del fuego, estos componentes mencionados por Myers (2006), para la inclusión de este enfoque, abordando políticas públicas y planes tanto a nivel central como local, donde se encargan de fortalecer institucionalmente en acciones de la gestión prospectiva (Planes Sectoriales, Regionales, Municipales y Distritales de Gestión del Riesgo de Desastres de incendios forestales, Programas presupuestales en el marco de presupuestos contemplando el riesgo a incendios forestales, planes

de educación y sensibilización comunitaria, implementación del Sistema de Comando de Incidentes de incendios forestales, planes de rehabilitación, mecanismos de supervisión, evaluación, control y sanción a la población que no cumpla la Gestión de Riesgos por incendios forestales), correctiva (estimación del riesgo: generación del conocimiento del peligro de los incendios forestales, análisis de la vulnerabilidad, valoración y escenario de riesgos, difusión del riesgo por incendios forestales y sistemas de alerta temprana; prevención del riesgo: planes de desarrollo territoriales que consideren la generación de nuevos riesgos de incendios forestales, indicadores de prevención; reducción del riesgo: diagnóstico e intervención, información y seguimiento, gestión de recursos; seguimiento de los planes de gestión de riesgos de incendios forestales cumpliendo con los objetivos de mitigación y adaptación) y reactiva, que implica la atención de la emergencia (Manta, 2017) para la planificación del desarrollo sostenible de un territorio.

2.6 Desarrollo sustentable.

Dentro de la sustentabilidad los ecosistemas naturales puede ser definida como el equilibrio dinámico entre la inversión y el rendimiento, modificado por eventos externos como el cambio climático y los desastres (Fresco & Kroonenberg, 1992) basado dentro de tres enfoques (social, ambiental y económico) (Salcido, 2017), que deben ser adecuadamente gestionados a través de una institucionalidad (gobernanza) que proporcione los recursos necesarios para reducir el riesgo de incendios, como así también impulsar una alianza público-privada y un mayor compromiso de la comunidad para hacer frente a esta problemática que es de competencia para todos.

El impacto social de los incendios se presenta a través de la destrucción de hogares que se encuentran en zonas en riesgo, personas heridas, hasta el límite de pérdida de vidas humanas, un impacto ambiental que se puede observar a través del aumento de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, generando un incremento de los gases de efecto invernadero y aumentando la crisis ambiental provocada por el cambio climático (Sandoval *et al.*, 2019), y el impacto económico que produce un incendio forestal es significativo, por la pérdida de biomasa y fuente de materia prima para las distintas actividades económicas que dependen de ello (Ursua & Cáceres, 2011).

Para ello las Naciones Unidas (2018) en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, cuyo objetivo número 15 mencionan la necesidad de conservar los bosques en el mundo, promover la gestión sostenible de los mismos, detener la deforestación y recuperar los bosques degradados,

rehabilitar los suelos afectados, conservar los ecosistemas y detener la pérdida de biodiversidad, promoviendo el acceso adecuado a esos recursos naturales satisfaciendo las necesidades de las generaciones presentes, sin afectar las generaciones futuras. Es por eso que la sustentabilidad involucra, el desarrollo de instrumentos que aporten a la planeación local de las gestiones sostenibles de los bosques, haciendo énfasis a la atención de los impactos generados por los incendios forestales y asegurar la conservación de los ecosistemas, tal como lo marca el objetivo 15 de la Agenda 2030 de la ONU.

Aunque el fuego es un elemento natural de muchos ecosistemas, pueden ocasionar daños en grandes extensiones, y con ello a la capacidad del bosque de producir niveles sostenibles de bienes y servicios (Ramos, 2010). El manejo integrado de los incendios forestales es un componente integral de la gestión forestal sostenible y puede ayudar a conservar la biodiversidad, detener la deforestación, reducir la degradación del suelo y promover la restauración de tierras, para poder enfrentar dicha amenaza planteada por los regímenes alterados del fuego, es importante hallar soluciones sostenibles mediante el desarrollo de enfoques integrales para el manejo de incendios que ocurren, o que son necesarios, en las áreas naturales protegidas, en las zonas de conservación y en comunidades inmersas, adyacentes o localizadas en zonas aledañas (Myers, 2006). En este ámbito es necesario un mayor compromiso social de prevención, a través de la educación y sensibilización de la población de un problema del cual todos debemos ser parte. La prevención de incendios forestales es un conjunto de medidas, acciones, normas o trabajos cuyo objetivo es evitar que se produzcan los incendios (CENAPRED, 2008), además de que estas acciones son eficientes para que pueda llevar a cabo un organismo o una comunidad. La prevención de incendios perjudiciales no deseados es siempre menos costosa que su extinción, ya que no solo disminuyen los costos y el daño a los recursos, sino que también promueven el conocimiento sobre la función y el efecto del fuego en los ecosistemas (FAO, 2007).

De acuerdo al (CENAPRED, 2008), para la prevención se tiene que evitar la integración del triángulo de fuego, o bien la acumulación de los combustibles. La prevención de incendios forestales se establece en: cultural (educación y divulgación), física o ingenieril y legal (aplicación de leyes y reglamentos).

- **Prevención cultural:** Son las acciones cuyo objetivo es crear conciencia forestal, mediante la difusión de información en torno al valor que presentan los recursos forestales, desde el

punto de vista de producción de madera, como reguladores del clima y productores de oxígeno. Mediante la educación se procura que las personas adopten una conducta más conservacionista y protectora de recurso forestal, a través de campañas de difusión e información, capacitación y asistencia técnica para el uso del fuego (CENAPRED, 2008).

- **Prevención física:** Reduce el riesgo sobre las personas y o actividades específicas que causen incendios forestales, esto consiste en eliminar el material combustible o modificar su continuidad, tanto en forma horizontal como vertical, con el objetivo de evitar la combustión, o bien, impedir que el fuego se pueda propagar y presente mayor dificultad para su control, puede ser a través de: brechas cortafuego, líneas negras, podas, apilamiento, aclareos, quemas controladas y quemas prescritas, estos últimos nos mencionan sobre el uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario definidos por la norma oficial mexicana NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2009).
- **Prevención legal:** Aplicar y verificar que se cumplan las leyes, reglamentos y normas relativas al uso del fuego en el territorio nacional (CONAFOR, 2010).

Las medidas de protección son, parte fundamental de la ordenación forestal, si se quiere garantizar niveles sostenibles de bienes y servicios. Dando a entender que el manejo del fuego es un componente importante del orden con vistas al desarrollo forestal sostenible.

2.7 Modelo espacialmente explícito.

Los modelos espacialmente explícitos constituyen una herramienta esencial en la comprensión y representación de fenómenos geoespaciales complejos. Estos modelos, mediante la integración de datos geográficos detallados con algoritmos y técnicas avanzadas de análisis espacial, ofrecen una visualización más precisa y una interpretación más profunda de los procesos que tienen lugar en el espacio geográfico (Jaafari *et al.*, 2017).

La descripción de patrones (seres vivos como las personas, la flora y la fauna), a través de modelos estadísticos, junto con la experimentación y el contraste de hipótesis, constituye uno de los fundamentos centrales en la investigación contemporánea. No obstante, el análisis de patrones y la falsificación de hipótesis por sí solos no son suficientes para una comprensión completa de las causas o mecanismos que subyacen a estos patrones o regularidades espacio-temporales observadas. Es aquí donde los modelos representan una pieza fundamental del método hipotético-

deductivo, permitiéndonos evaluar las consecuencias lógicas de principios generales o mecanismos subyacentes.(Zavala *et al.*, 2006).

El análisis de patrones es una parte fundamental en diversas disciplinas científicas, tales como ecología, geología, geografía, biología e ingeniería, entre otras. En cada una de estas disciplinas, el análisis de datos espacialmente explícitos, es decir, aquellos que contienen información sobre su ubicación en el espacio, cobra una relevancia especial. El análisis espacial abarca un conjunto de técnicas destinadas a analizar de manera cuantitativa este tipo de datos, permitiendo examinar la distribución y la relación entre variables en el espacio geográfico, lo que brinda información valiosa para comprender patrones y procesos naturales, así como para tomar decisiones informadas en la gestión y planificación de recursos.

En el ámbito de la elaboración de mapas de riesgos de incendios forestales, la relevancia de estos modelos es incuestionable. Al considerar una amplia gama de variables, como la topografía, la vegetación, los datos históricos de incendios en una región específica, así como factores antropogénicos (Farfán *et al.*, 2020), los modelos espacialmente explícitos pueden prever con mayor exactitud las zonas con mayor probabilidad de sufrir incendios y los posibles patrones de propagación.

La topografía y la vegetación son elementos cruciales en la generación de modelos de incendios forestales. La inclinación del terreno afecta la velocidad y dirección del fuego, mientras que la vegetación influye en la combustibilidad del área. Los modelos espacialmente explícitos consideran estos factores, permitiendo identificar las áreas más susceptibles a la ignición y prever el comportamiento del fuego. Además, al integrar datos históricos de incendios, estos modelos proporcionan información valiosa para predecir futuros eventos. Esta combinación de elementos permite a gestores de riesgos y autoridades locales tomar decisiones informadas en la prevención, respuesta y mitigación de incendios forestales (Flores *et al.*, 2016).

Los modelos espacialmente explícitos son una herramienta poderosa y versátil en la gestión de riesgos de incendios forestales. Su capacidad para integrar datos geoespaciales detallados con análisis avanzados proporciona una comprensión más completa de los procesos que influyen en la propagación del fuego, lo que a su vez permite una toma de decisiones más eficaz y estratégica para proteger tanto a las personas como a los ecosistemas vulnerables.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA.

3.1 Características del Parque Nacional Cañón del Sumidero.

3.1.1 Ubicación geográfica.

El PNCS, se encuentra ubicado en los límites de dos zonas fisiográficas, la depresión por donde nace el Río Grijalva, y la altiplanicie de Chiapas; también limita con las Montañas del Norte en el Estado de Chiapas, entre en los municipios de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Fernando, Osumacinta y Soyalo. Situado entre las coordenadas geográficas 16° 44' 00" latitud Norte, 93° 00' y 93° 11' de longitud Oeste, y con una superficie de 21,789 ha (Méndez, 2019).

El establecimiento del PNCS se fundamentó en la valoración de su riqueza vegetal, fauna y flora silvestres, así como en las condiciones climáticas, topográficas y su significativo valor geológico. Además, se consideraron los vestigios arqueológicos presentes, los cuales forman parte esencial del patrimonio cultural de la Nación. Por ello que en el decreto publicado el 08 de diciembre de 1980 en el Diario oficial de la Federación establece lo siguiente (CONANP, 2012):

A fin de que se integre y forme parte del Sistema de Parques Nacionales para la Recreación, a efecto de tomar, desde enfoques multidisciplinarios, normas de regulación y control para evitar la modificación del ecosistema y aprovechar el sitio para esparcimiento, regulando la entrada a visitantes bajo especiales condiciones, con fines educativos, culturales y de recreación; todo lo cual será sin detrimento del adecuado aprovechamiento de los recursos hidrológicos de la zona, para generar energía eléctrica, lo que resulta también de evidente utilidad pública.

Fue elegido humedal de importancia internacional por la Convención 31 Ramsar (Número 1,344 además de ser reconocido como una Región Terrestre Prioritaria (RTP-141) y un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA 191). Esta distinción se debe a sus características únicas en términos de biodiversidad. Además de su valor ecológico, el humedal proporciona una amplia gama de servicios ecosistémicos, incluyendo hábitat para diversas especies, regulación del clima, saneamiento del agua superficial y subterránea, protección contra la erosión, control de sedimentos y producción de biomasa (CONANP, 2012).

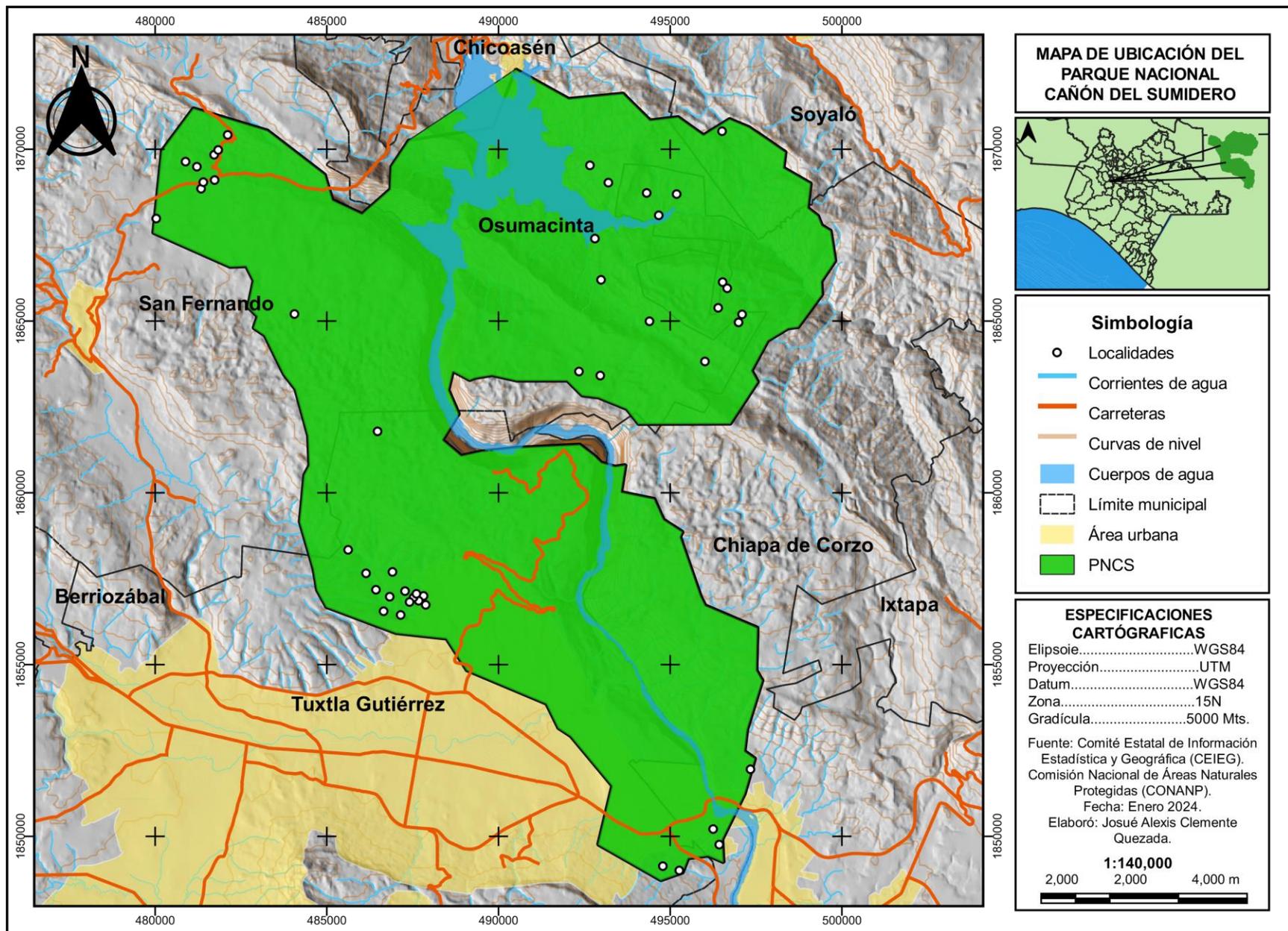


Figura 5: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

3.1.2 Tipos de suelo.

De acuerdo al Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica (CEIEG), el PNCS incide en sobre diez tipos de suelo, leptosol eutríco, leptosol lítico, leptosol mólico, leptosol réndzico, luvisol crómico, luvisol endoléptico, phaeozem háplico, regosol calcárico, regosol endolético, regosol epiléptico (INEGI, 2014).

3.1.3 Geología.

La geología del PNCS está caracterizada por la presencia de rocas atravesadas por el Río Grijalva, siendo predominantemente calizas del Jurásico y Cretácico. Se observan también depósitos fluviales en las proximidades de la presa de Chicoasén y a lo largo de varios cursos de agua dentro del parque (CONANP, 2003).

Con base en lo indicado en la Carta Geológica Escala 1:250 000 del INEGI (2008), se determinó el tipo de rocas presente en la superficie del PNCS.

Tabla 1: Tipos de Rocas en el PNCS (INEGI, 2008).

Clave	Tipo de roca
al	Aluvial
cz	Caliza
cz(lu)	Caliza-Lutita
lm(ar)	Limolita-Arenisca
lu(ar)	Lutita-Arenisca

Así, se determina que el PNCS está mayormente compuesto por rocas calizas, las cuales consisten principalmente en carbonato de calcio (más del 80% CaCO_3). Estas rocas carbonatadas son la entidad geológica dominante en el área y juegan un papel crucial en la configuración del paisaje y la biodiversidad del parque (Ruíz, 2022).

3.1.4 Clima.

De acuerdo con el Instituto Estatal del Agua (2013) el Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS) se encuentra situado en dos unidades climáticas identificadas como Aw1 y Awo, según la clasificación climática de Köppen, ajustada por E. García.

La unidad climática Aw1 se caracteriza por un clima cálido húmedo, con una temperatura media anual superior a 22 °C y lluvias distribuidas a lo largo de todo el año. El índice de precipitación del mes más seco es menor a 60 mm, y el porcentaje de lluvia invernal varía entre el 5% y el 10.2% en comparación con la precipitación anual. En contraste, la unidad climática Awo presenta un clima cálido subhúmedo, con características similares en cuanto a temperatura y distribución de lluvias, pero con un rango de precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm. Durante el período de estiaje, que abarca de diciembre a junio, se registra la precipitación más baja, alcanzando los 200 mm. Este fenómeno se atribuye a la presencia de las Montañas del Norte de Chiapas y la Sierra Madre de Chiapas al Sur de la Depresión Central del Estado, las cuales actúan como barreras orográficas para las masas de aire cargadas de humedad provenientes del Golfo de México y del Pacífico. Como resultado, los vientos predominantes en la zona provienen del noroeste. (CONANP, 2012).

3.1.5. Topografía.

El PNCS presenta una topografía accidentada que lo ha protegido de deterioros causados por la actividad humana. Las cotas altitudinales máximas y mínimas dentro del ANP van de los 600 msnm (metros sobre nivel del mar) en Chiapa de Corzo, a los 1200 msnm en el mirador El Roblar (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2015), donde las paredes del cañón, se observa una verticalidad casi total. Desde estas alturas, es posible avistar afloramientos de agua en forma de cascadas en algunos puntos de los muros. Estas cascadas provienen de canales subterráneos y, tras filtrarse a través del suelo cárstico característico de la zona, se vierten al cauce del río Grijalva.

3.1.6 Uso de suelo y vegetación.

De acuerdo al Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SAMOF, 2016) la vegetación predominante es la selva mediana subcaducifolia, con una superficie de 8827.80 ha; le siguen el pastizal inducido, con 4294.91 ha; la selva baja caducifolia, con 3828.03 ha; la vegetación secundaria, con 194.5 ha; el bosque de pino, con 79.09 ha, y el bosque de encino, con 29.51 ha (CONANP, 2012).

Tabla 2: Descripción de los tipos de vegetación que se encuentran en el PNCS (Mendez, 2020).

Tipo de vegetación	Descripción
Selva mediana subcaducifolia	Ubicada principalmente en las paredes del Cañón del Sumidero, al Norte y Este del parque hacia San Fernando y en la Cañada Muñiz, se encuentra a altitudes que oscilan entre los 150 y 1,250 metros

	sobre el nivel del mar, con presencia ocasional hasta los 1,000 msnm. Esta vegetación se desarrolla sobre rocas basálticas o graníticas, así como en áreas con afloramientos de calizas.
Selva baja caducifolia	Se ubica en la región Sur y Sureste del parque, aproximadamente a la altura de los miradores "La Ceiba" y "La Coyota". Su extensión se extiende hacia el Este hasta la cañada La Chacona y al Sur hasta Tuxtla Gutiérrez. Caracterizada por la baja altura de sus árboles, que generalmente alcanzan entre 4 y 10 m, ocasionalmente llegando hasta los 15 m. El estrato herbáceo es limitado y suele ser más visible durante el inicio de la época de lluvias.
Bosque de pino – encino.	Este tipo de vegetación se observa principalmente hacia el Noroeste del parque, en las áreas de mayor altitud, extendiéndose hacia la región de Soyaló. La especie más común en esta área es el roble (<i>Quercus conspersa</i>), que frecuentemente se encuentra mezclado con selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia
Bosque de pino	Es una comunidad perennifolia compuesta principalmente por árboles del género <i>Pinus</i> . Con alturas promedio que oscilan entre los 15 y 30 m, estos bosques presentan un estrato inferior relativamente escaso en arbustos, pero con una presencia abundante de gramíneas.
Pastizal inducido	Este tipo de vegetación que se encuentra en las laderas tanto al norte como al sur del Cañón, y está asociado con la vegetación secundaria de diversas edades.
Vegetación secundaria.	Comunidades que emergen como resultado de la degradación de la vegetación primaria. Estas áreas pueden experimentar procesos de regeneración que las conducen hacia un estado más similar al original, aunque en otros casos, muestran una composición y aspecto florístico diferente.

3.1.7 Tipos de ecosistemas forestales.

La relación entre el fuego y los ecosistemas varía según el tipo de ecosistema en cuestión, dividiéndose en dos categorías principales: los sensibles al fuego, altamente susceptibles a los incendios y que requieren más tiempo para recuperarse, y los adaptados al fuego, donde los incendios son recurrentes y las especies han desarrollado adaptaciones para sobrevivir y regenerarse.

En el estado de Chiapas, que abarca 7,361,186.28 ha, las áreas forestales comprenden 4,199,189.39 ha, lo que representa el 57.05% de la superficie estatal. Las 3,161,996.89 ha restantes corresponden a áreas no forestales, que incluyen zonas agrícolas, pastizales cultivados, asentamientos humanos, cuerpos de agua y áreas sin vegetación (Protección Civil Chiapas, 2022).

Según la CONAFOR (2021), en el PNCS, aproximadamente el 48% de los ecosistemas son sensibles al fuego, cubriendo una superficie de 10 533 ha, mientras que los ecosistemas adaptados al fuego ocupan una porción menor del 4%, abarcando 946.76 ha. El resto de la superficie del área de estudio corresponde a uso de suelo agrícola, urbano y áreas de pastizales con una superficie de 10 414.71, que representa el 48% restante. Esta distribución refleja que la mitad de la vegetación presente es altamente susceptible a los incendios forestales, lo cual se debe a su elevado grado de inflamabilidad, influenciado por la sequía y la extensión de su área de distribución.

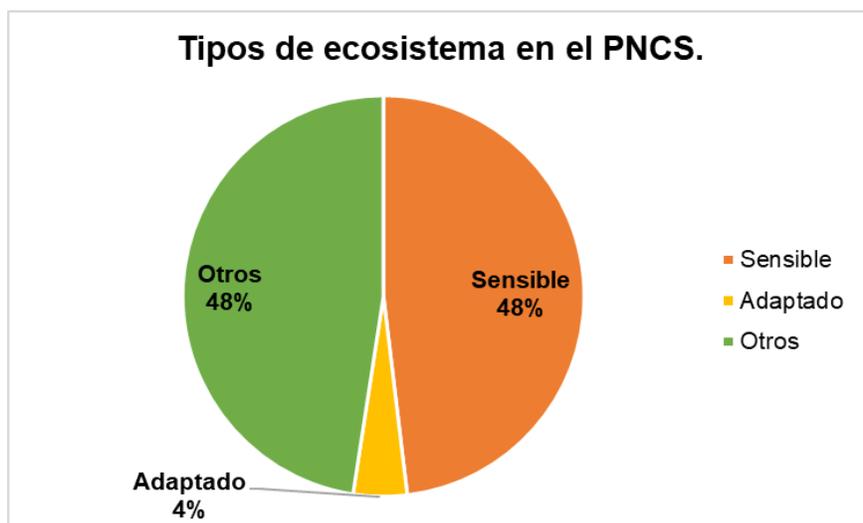


Figura 6: Grafica de la clasificación de los ecosistemas forestales de acuerdo con el régimen de fuego que poseen en el PNCS. Elaboración propia.

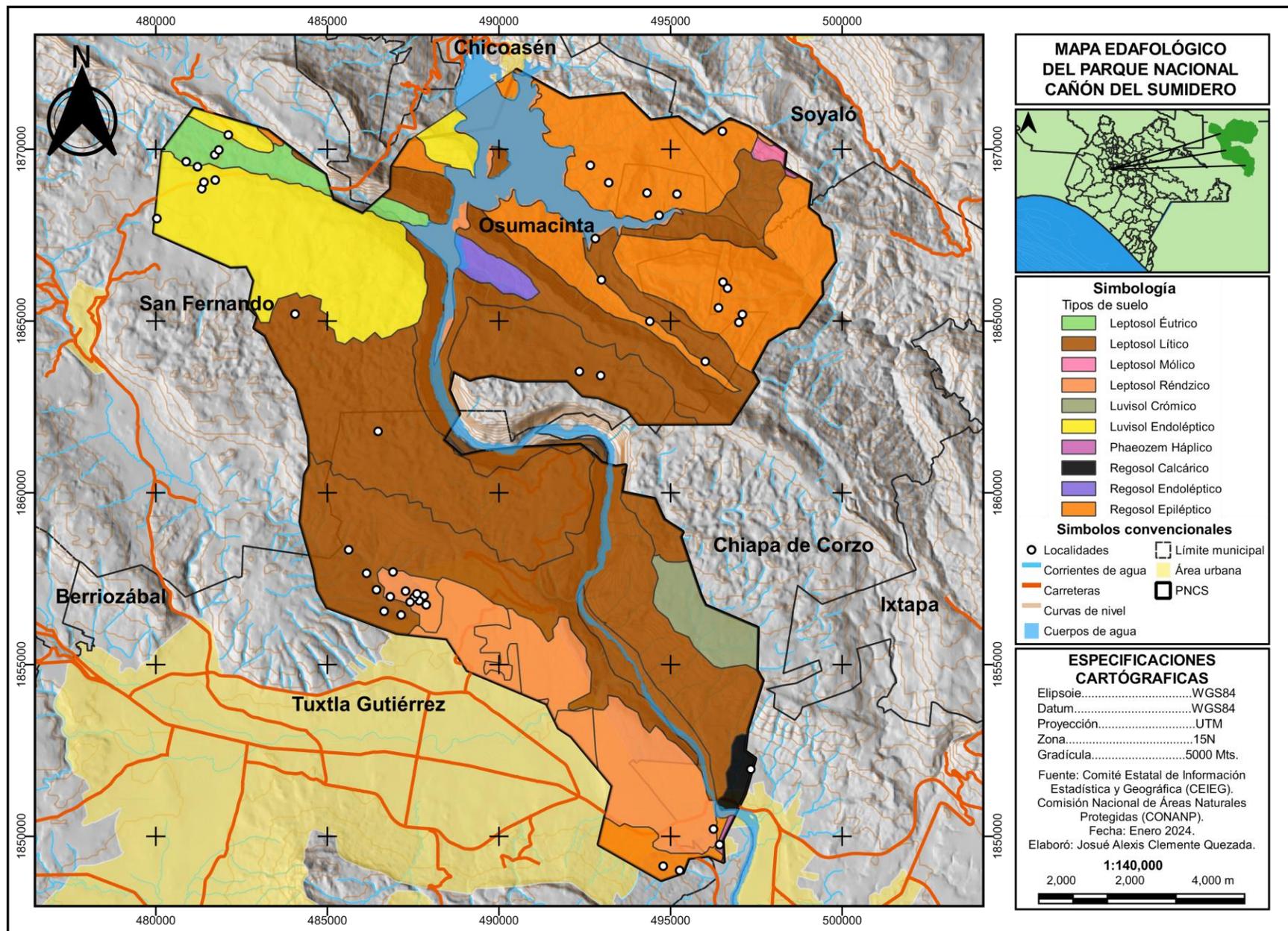


Figura 7: Mapa edafológico del PNCS.

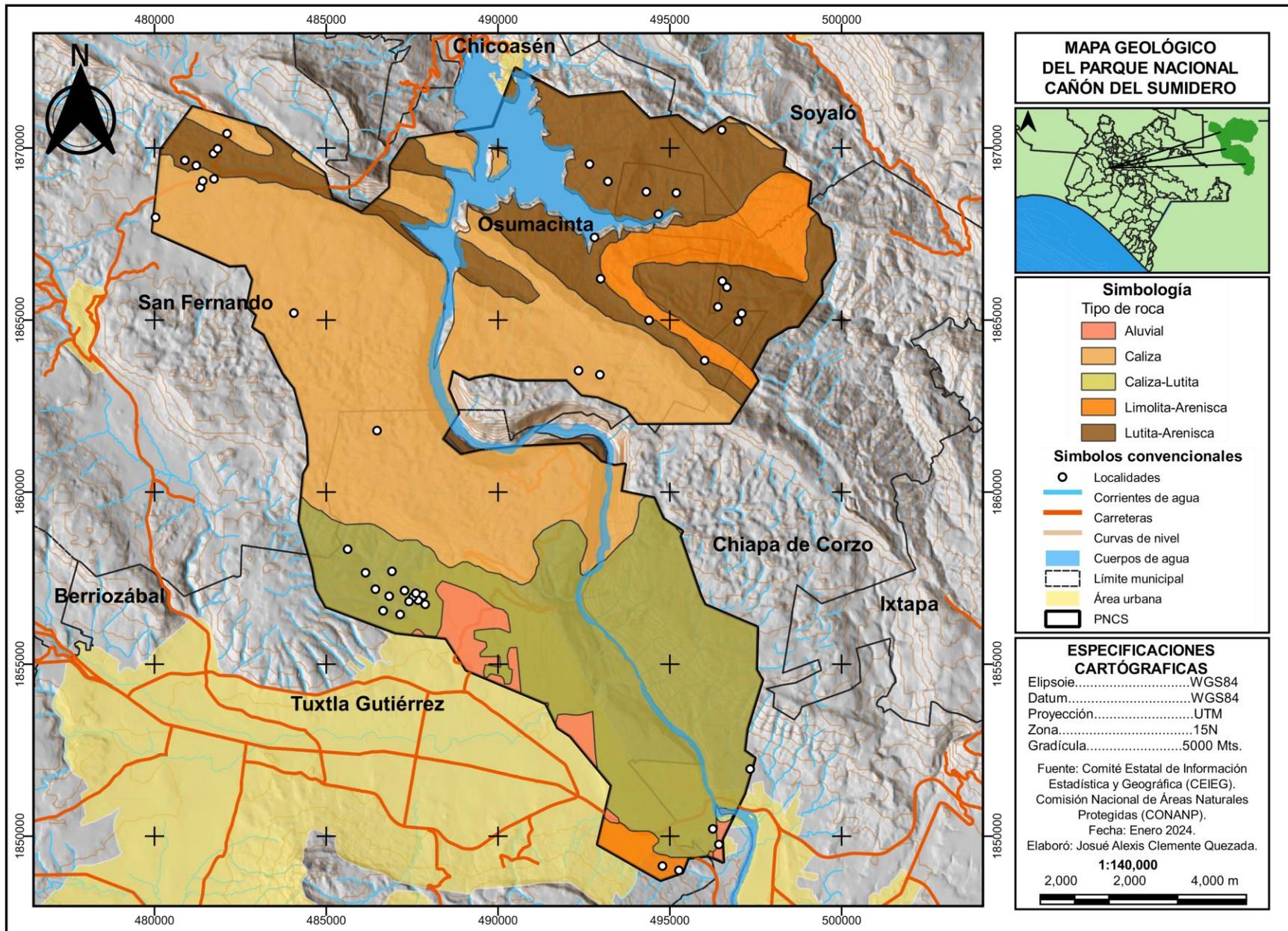


Figura 8: Mapa geológico del PNCS.

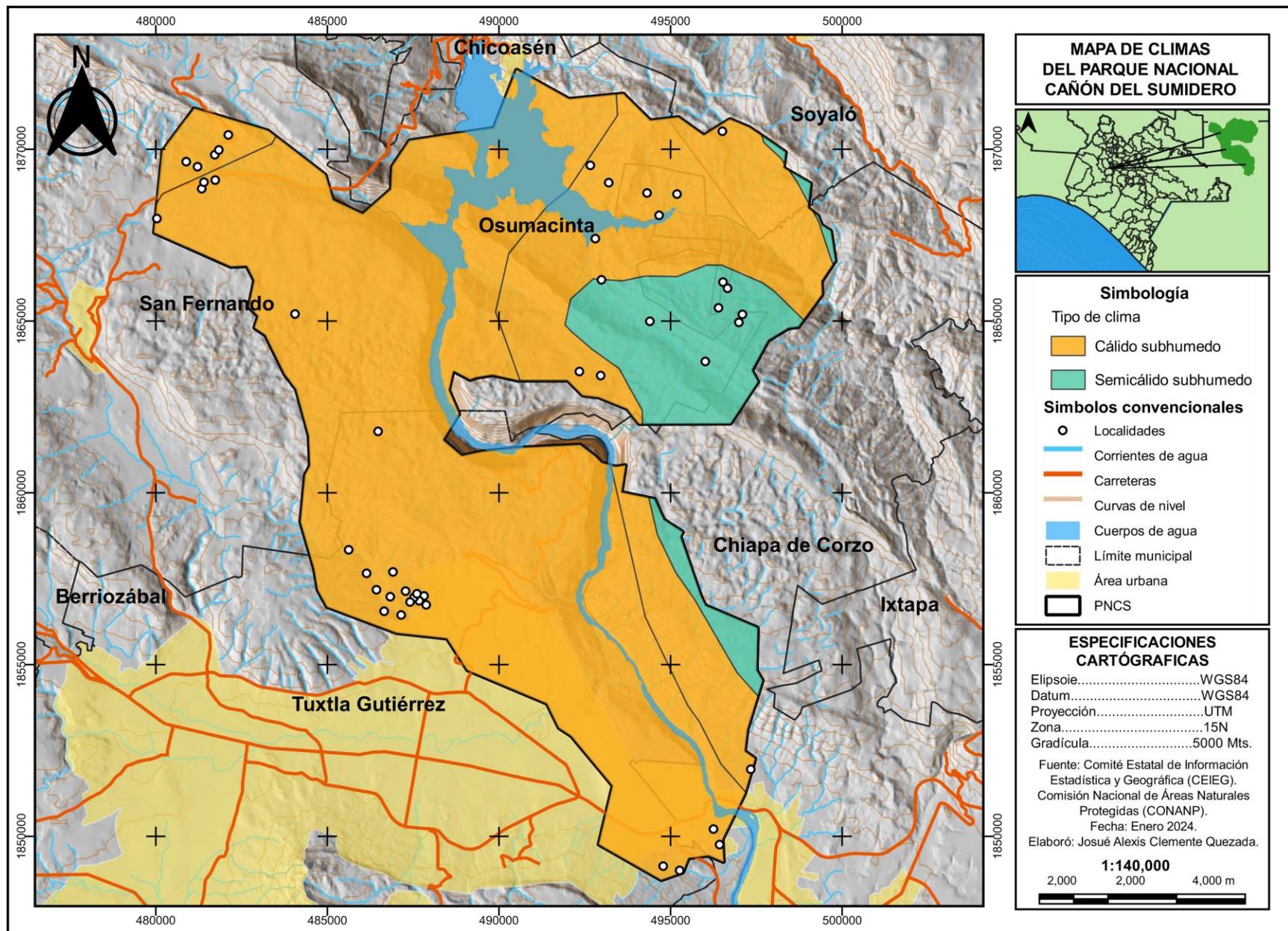


Figura 9: Mapa de climas del PNCS.

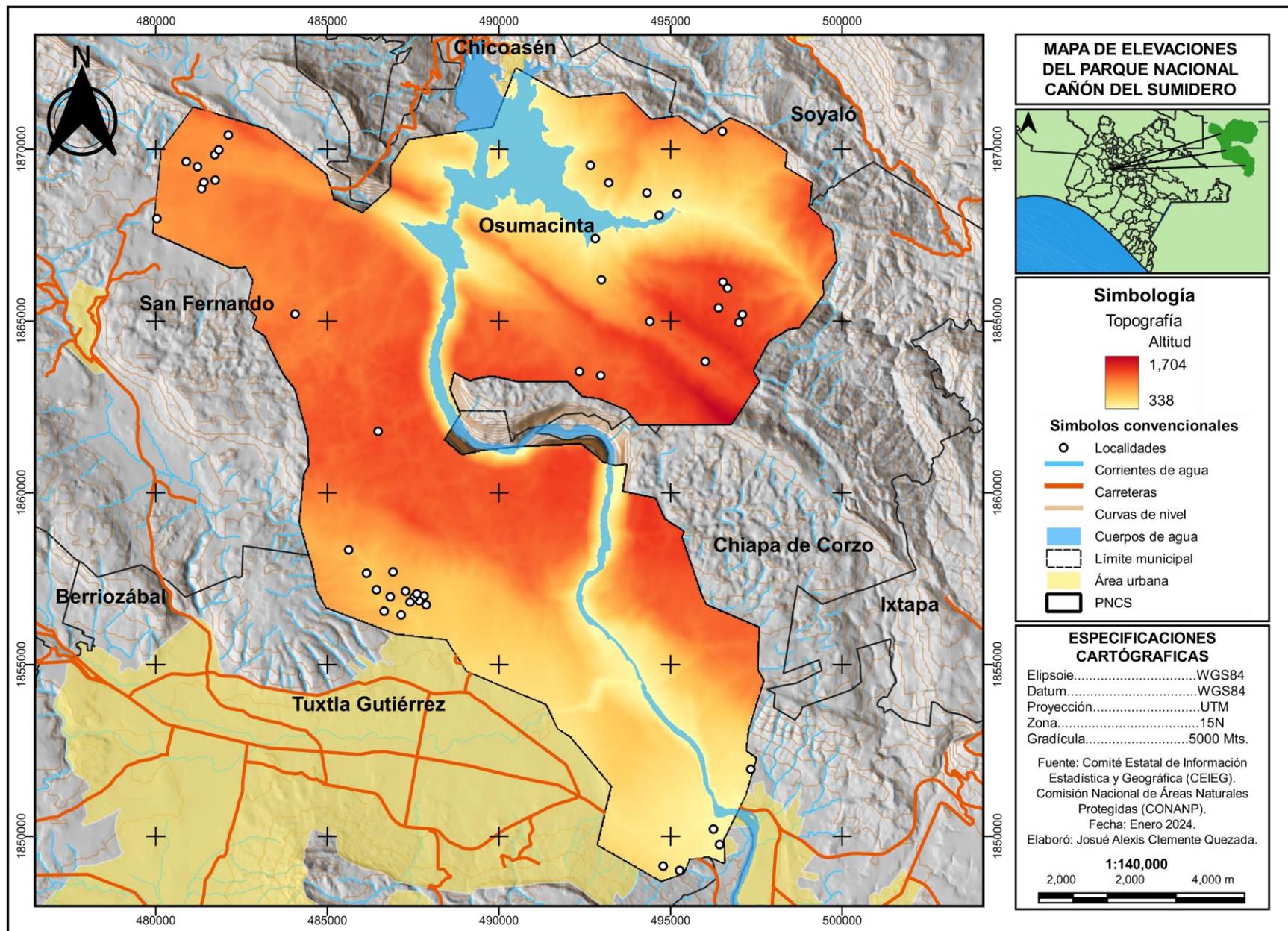


Figura 10: Mapa topográfico del PNCS.

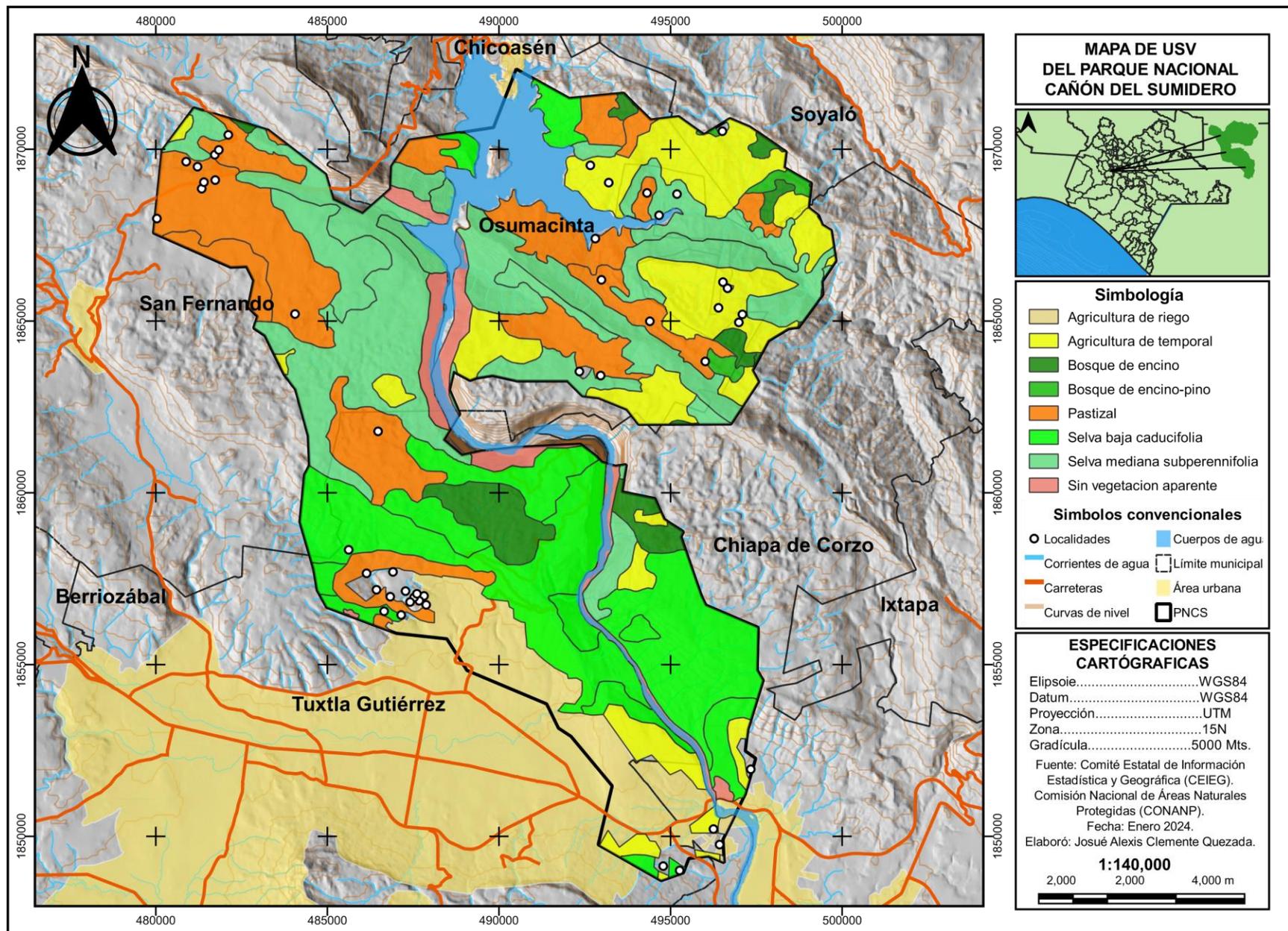


Figura 11: Mapa de uso de suelo y vegetación del PNCS.

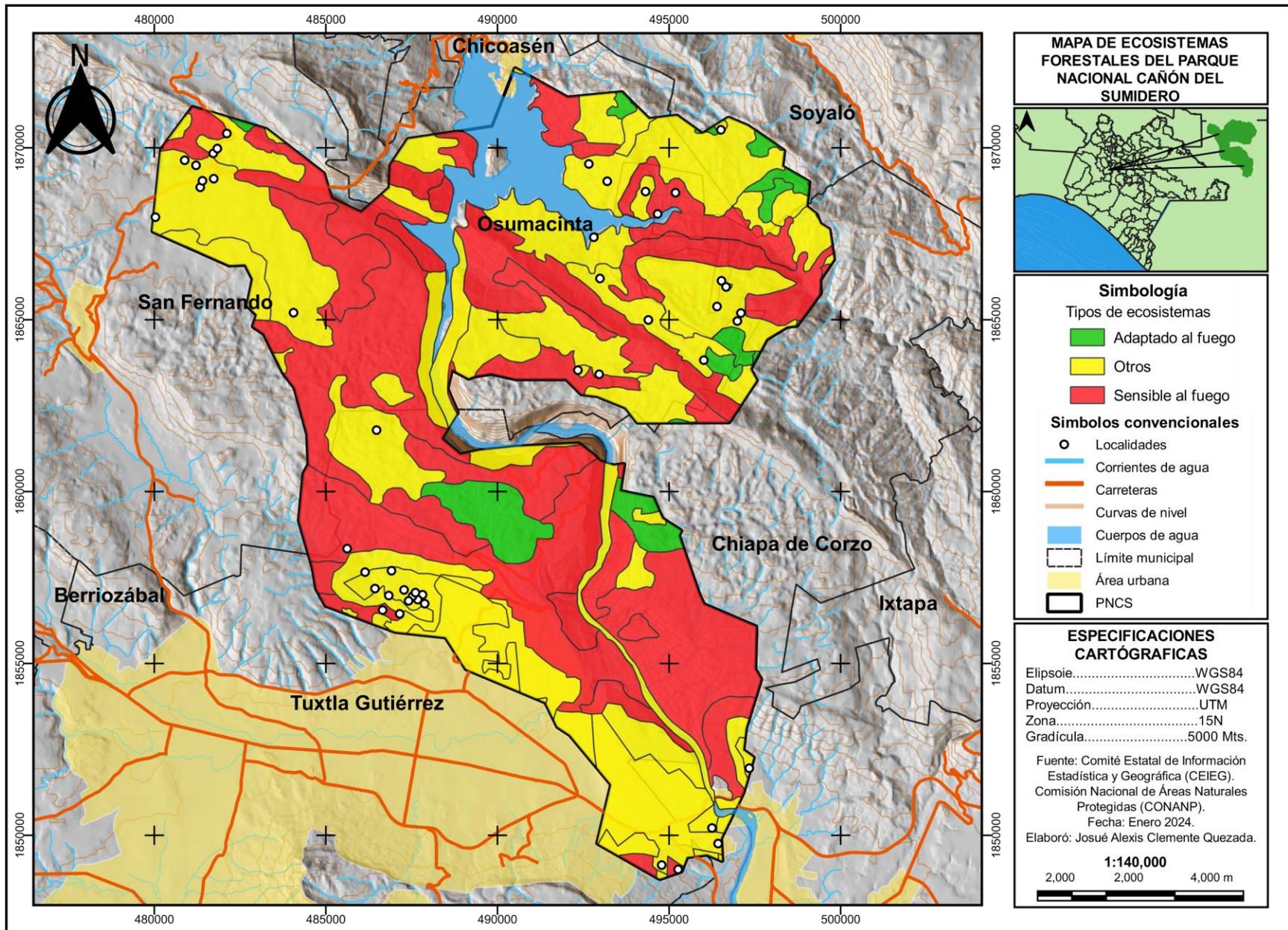


Figura 12: Mapa de ecosistemas forestales en presencia del fuego del PNCS.

3.2 Registro histórico de incendios ocurridos.

La CONANP cuenta con un registro histórico a partir del 2003 hasta el 2022 en el área de estudio. De acuerdo con dicha base de datos, se han presentado un total de 281 incendios, con un promedio anual de 14 incendios por año en los meses de enero a mayo, con una superficie total siniestrada de 3 443 ha, con un promedio anual de 172 ha afectadas (CONANP, 2023).

Tabla 3: Incidencias de incendios forestales dentro del PNCS (CONANP, 2023).

Año	Tipo de vegetación	No. de incendios forestales	Tipo	Superficie (has).
2003	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	7	Superficial	147
2004	Selva baja caducifolia	14	Superficial	98
2005	Selva baja caducifolia	12	Superficial	32
2006	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	13	Superficial	197
2007	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	17	Superficial	277
2008	Selva baja caducifolia	12	Superficial	75
2009	Selva baja caducifolia	36	Superficial	108
2010	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	25	Superficial	46.5
2011	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	20	Mixto	85.22
2012	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	6	Superficial	33
2013	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	12	Mixto	128
2014	Selva baja caducifolia	9	Superficial	48.5
2015	Selva baja caducifolia	15	Superficial	85
2016	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	20	Mixto	450.9
2017	Selva baja caducifolia	9	Superficial	82
2018	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	6	Superficial	197
2019	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	14	Mixto	401.4
2020	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	10	Mixto	272.75
2021	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	11	Mixto	408.46
2022	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	13	Mixto	270.669

La accesibilidad frecuente de los seres humanos a las zonas forestales incrementa significativamente la probabilidad de sufrir incendios forestales (CONAFOR, 2010). Tras un análisis de los registros de incendios forestales de los últimos 19 años, se han identificado 17 áreas con una alta incidencia de incendios, los cuales están estrechamente vinculados a las prácticas de quemas agropecuarias. Esta presencia recurrente de incendios representa un riesgo latente para la cobertura vegetal del parque.

Tabla 4: Comunidades donde se presentan con mayor frecuencia los incendios forestales (CONANP, 2023).

Municipio	Ejido y/o comunidades.
Chiapa de corzo	El Palmar
	Nuevo Bochil
	El Refugio
Tuxtla Gutiérrez	Tierra colorada.
	Loma larga
	Loma del tesoro
	Nueva Esperanza
	Tierra blanca
	Emiliano Zapata
	Yukis
Concepción Copalar	
Osumacinta	Triunfo Agrarista
	Osumacinta
San Fernando	16 de septiembre
	Benito Juárez

En el año 2022, se identificó que el 72% de los incendios forestales en el Parque Nacional Cañón del Sumidero fueron causados por la quema de pastos y basura en los límites del parque. Asimismo, un 28% de los incendios fueron atribuidos a quemas agrícolas, mayormente relacionados con la quema de pastizales como parte de las actividades agropecuarias (CONANP, 2023).

3.3 Identificación de áreas quemadas.

Para generar la cartografía de áreas quemadas en el PNCS, se emplearon imágenes con una resolución espacial de 10 y 20 metros provenientes del sensor Sentinel, obtenidas de la plataforma Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>). Se utilizó el cálculo del Índice Espectral de Quema Normalizado (Normalized Burn Ratio, NBR) y la composición de color falso. Este proceso permitió evaluar el impacto de los incendios en la cobertura forestal durante los años 2019, 2020 y 2021. Además, se incorporan imágenes de 30 metros del satélite Landsat correspondientes a los años 2009 y 2016, también descargadas de la plataforma mencionada anteriormente.

Para detectar las áreas afectadas después del incendio, se aplicó un código de colores en rojo y magenta sobre el compuesto de falso color para Sentinel 2. Este compuesto se realizó utilizando las bandas 8-4-3, en donde el rojo (r) se ha aplicado a la banda 8; infrarrojo medio, el verde (g) a la banda 4; infrarrojo cercano y azul (b) a la banda 3. Para Landsat 8 con las bandas 7-5-4 en donde el rojo (r) se ha aplicado a la banda 7; infrarrojo medio, el verde (g) a la banda 5; infrarrojo próximo y azul (b) a la banda 4.



Figura 13: Composición de una imagen a falso color basada en el infrarrojo cercano para Sentinel 2 (en la banda 8) generando composiciones RGB (843) respectivamente para permitir realzar la vegetación de manera análoga.

Las cicatrices dejadas por los incendios son visibles a simple vista, pero su clasificación automática resulta desafiante debido a las variaciones espaciales y espectrales causadas por la diversidad en la intensidad del fuego (Chuvienco, 2008; García, 2019).

Es relevante señalar que la obtención de las áreas quemadas se comparó con los datos reportados por la CONANP, con el propósito de entender la relación entre ambos datos. Para lograr esta comparación, se implementó la prueba estadística de ANOVA. Esta prueba permite realizar un análisis de la varianza para contrastar la hipótesis nula (H_0), que sostiene que las medias de ambas variables son iguales, frente a la hipótesis alternativa (H_A), que sugiere que al menos una de las medias es diferente a las demás en cuanto a su valor esperado (Menéndez y Jamed, 2023)

$$H_0: \alpha_1 - \alpha_2 = \dots = \alpha_l = 0$$

$$H_A: \text{Al menos } \alpha_i \neq \text{ para } i = 1, 2, \dots, l$$

Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de N 'factores' con respecto a la variable dependiente o de interés y un estudio del coeficiente de correlación que es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

3.4 Insumos cartográficos para la calibración del modelo de riesgo.

Para este estudio se consideró la influencia de once variables cartográficas, que han sido empleadas en otros estudios de modelación espacial explícita de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en México y en Brasil). A continuación, se presentan: 1) Elevación; (2) Orientación; (3) Pendiente; (4) Vegetación forestal; (5) Distancia a vías de comunicación; (6) Distancia a tierras agrícolas; (7) Distancia a pastizales; (8) Distancia de localidades urbanas; (9) Distancia de Ejidos; (10) Densidad de población y (11) Distancia a áreas quemadas (tabla 5).

Se llevó a cabo la generación de mapas tipo raster para evaluar variables asociadas a la ocurrencia de incendios forestales. Para ello, se utilizaron inicialmente mapas de vegetación y uso del suelo de los años 2016 y 2022 a una escala de 1:50.000, elaborados por el Sistema Satelital de Monitoreo Forestal (SAMOF). Para actualizar el mapa del año 2022, se aplicó el método de clasificación visual interdependiente propuesto por la FAO (1996), este método implica el uso de los polígonos del primer año como base para interpretar las imágenes del año siguiente, modificando únicamente aquellas áreas donde se observan cambios. Este enfoque ayuda a reducir los errores de posición y clasificación (López *et al.*, 2018) este procedimiento nos ayudó para la actualización de la capa de USV del 2022, empleando dos imágenes satelitales del sensor SENTINEL 2A de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) del mes de marzo.

Los usos del suelo seleccionados fueron tierras agrícolas y pastizales inducidos, y se calcularon las distancias euclidianas a cada uno de ellos utilizando el programa de acceso gratuito DINAMICA EGO (Soares-Filho *et al.*, 2002). También se calcularon las distancias a caminos, brechas, veredas y asentamientos urbanos a partir de los mapas de vías obtenidos del Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG). Los datos de densidad poblacional se obtuvieron a partir de la capa del censo de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se empleó el método de la distancia inversa ponderada (IDW) con un radio variable, una distancia máxima de 10 km y una potencia de 2. Finalmente, se generó el mapa de exposición y pendiente del terreno a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) obtenido de la plataforma del CEIEG. Todas las variables se estandarizaron al sistema de referencia de coordenadas WGS 84, con proyección geográfica UTM para la Zona 15 Norte en formato raster, con un tamaño de píxel de 15 metros, y se procesaron en el programa de acceso gratuito QGIS 3.22.14.

Tabla 5: Variables seleccionadas para explicar la ocurrencia de incendios forestales en el PNCS.

Insumo cartográfico	Resolución	Fuente
Áreas quemadas 2009, 2016, 2020, 2021	15m	Elaboración propia con base de imágenes SENTINEL 2A
Modelo Digital de Elevación (MDE)	15m	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013)
Orientación	15m	Elaboración propia con base en MDE
Pendiente	15m	Elaboración propia con base en MDE
Vegetación Forestal 2016 y 2022.	15m	Elaboración propia, producto derivado del Mapa de uso de suelo y vegetación (SAMOF, 2016).
Distancia a vías de comunicación	15m	Elaboración propia con base en el mapa de carreteras (CEIEG, 2008).
Distancia a tierras agrícolas	15m	Elaboración propia con base en Mapa de uso de suelo y vegetación (SAMOF, 2016).
Distancia a pastizales	15m	Elaboración propia con base en Mapa de uso de suelo y vegetación (SAMOF, 2016).
Distancia de localidades urbanas	15m	Elaboración propia con base en el mapa de ejidos (CEIEG, 2020).
Distancia de Ejidos	15m	Elaboración propia con base en el mapa de localidades urbanas (CEIEG, 2020).
Densidad de población	15m	Elaboración propia con base en el censo población y vivienda (INEGI, 2020).

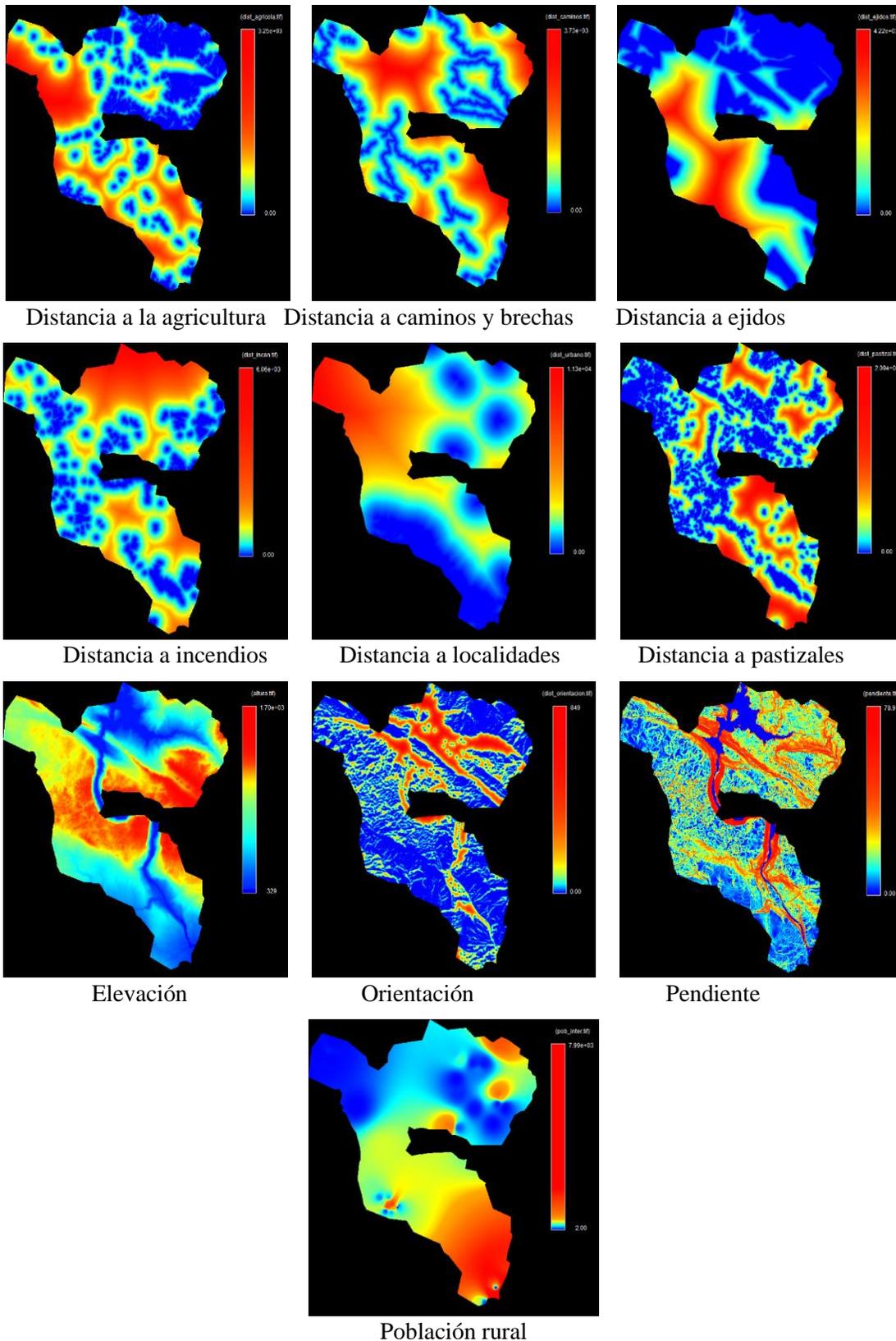


Figura 14: Variables utilizadas en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Elaboración propia.

3.5 Aplicación de geoprocesos y calibración del modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales.

3.5.1 Construcción del modelo.

Para iniciar la generación del modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, se llevó a cabo un proceso de procesamiento de datos basado en variables y mapas. Esta fase implicó la homogeneización de la información raster, asegurando que cada variable y mapa tuvieran el mismo número de filas y columnas, manteniendo una resolución de 15 metros, que fue la resolución utilizada en este modelo. Es importante destacar que el software utilizó una clasificación numérica para identificar las diferentes clases de mapas de cobertura a través de códigos.

En este sentido, se especifican categorías específicas para la clasificación de tipos de cobertura y uso del suelo. Estas categorías se definieron de la siguiente manera: (1) Cuerpos de agua; (2) Bosques; (3) Pastizales; (4) Selva baja; (5) Selva mediana; (6) Tierras agrícolas; (7) Áreas urbanas; y (999) Áreas quemadas. Este proceso de clasificación numérica proporcionó una base sólida para el análisis e interpretación de los datos, permitiendo una identificación precisa y clara de las diversas categorías de cobertura y uso del suelo, así como de las áreas previamente afectadas por incendios, lo cual es esencial para el desarrollo del modelo.

Tabla 6: Clasificación numérica utilizada por Dinámica EGO.

Número que identifica la clase	Clase
1	Cuerpos de agua
2	Bosques
3	Pastizales
4	Selva baja
5	Selva mediana
6	Tierras agrícolas
7	Urbano
999	Áreas quemadas

3.5.2 Cálculo de la matriz de transición de Markov.

El empleo de un modelo de Markov integrado con datos del Sistema de Información Geográfica (SIG) emerge como un enfoque altamente efectivo para el análisis del cambio temporal,

fundamentado en matrices de transición (Kamusoko *et al.*, 2009). Esta matriz de transición caracteriza las modificaciones en un sistema a lo largo de intervalos discretos de tiempo (figura 15), donde el valor de cualquier variable en un periodo dado se determina mediante la suma de porcentajes predefinidos del valor de las variables en el periodo anterior (Rodrigues *et al.*, 2007). Es importante destacar que la suma de las fracciones a lo largo de las columnas de la matriz de transición siempre equivale a uno. En el marco de la Dinámica EGO, no resulta necesario especificar la línea diagonal de la matriz de transición, dado que esta metodología no modela los porcentajes de celdas que permanecen inalteradas ni las transiciones con probabilidad nula (Carranza, 2017).

Las matrices de cambio utilizadas en Dinámica EGO se clasifican en dos tipos: simples y múltiples. Las matrices de cambio simples, también denominadas de un solo paso, describen las tasas de transición para un periodo específico entre un estado inicial y final. En contraste, las matrices de cambio múltiples representan las tasas anuales de cambio, reflejando las variaciones anuales durante un período determinado (Espinoza, 2016). En Dinámica EGO, el intervalo de tiempo puede ser cualquier período, ya que la unidad de tiempo es simplemente una referencia externa.

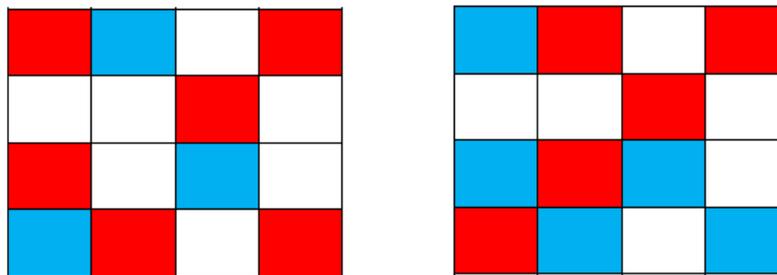


Figura 15: Cálculo de la matriz de transición: El número de píxeles que pasan de azul a rojo son 2 de 3 píxeles y los que pasan de rojo a azul son de 4 a 6.

La fase de modelado empleó datos cartográficos de cobertura y uso del suelo para los años 2016 y 2022, combinados con información de áreas quemadas durante los períodos 2016 y 2020-2021. Estos conjuntos de datos fueron cruciales para generar matrices de probabilidad o proporción de ocurrencia de incendios forestales en las categorías de análisis, utilizando el enfoque estadístico de cadenas de Markov, según la metodología propuesta por (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015) con el objetivo de estimar la probabilidad de transición entre las categorías de vegetación forestal y la categoría de áreas quemadas. La matriz de Markov, tanto a nivel anual como abarcando el periodo completo de 2016 a 2021, fue calculada utilizando el software DINAMICA EGO, en concordancia

con el periodo de observación de seis años (Soares Filho *et al.*, 2009). La ecuación que rige el cálculo de la matriz markoviana es la siguiente:

$$P^t = HV^t - H^{-1}$$

Donde P representa la matriz de probabilidad de transición original, H denota la matriz de vectores propios, V es la matriz de valores propios, y 't' representa el número de años correspondiente al periodo de la matriz original. Las tasas de transición calculadas se utilizarán para determinar la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje o las unidades de área que experimentarán una transición hacia otro estado. Este enfoque analítico proporciona una evaluación cuantitativa fundamental para comprender las dinámicas y cambios en las categorías de vegetación forestal y áreas quemadas a lo largo del periodo de estudio (Soares Filho *et al.*, 2009).

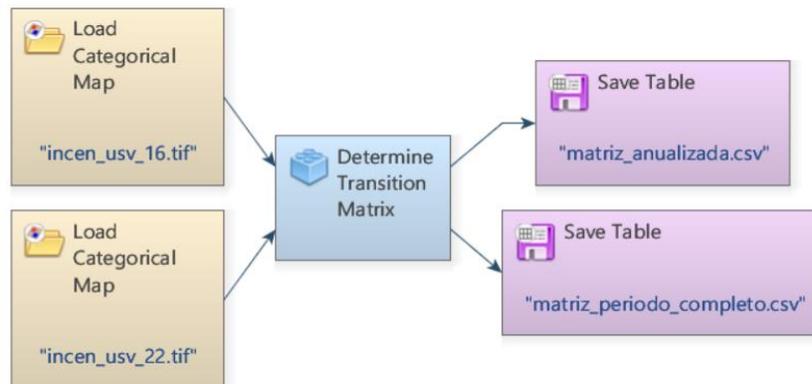


Figura 16: Diagrama modelo de cálculo de las matrices de transición.

3.5.3 Calibración del modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales.

Para calibrar el modelo, se empleó la cartografía de las áreas quemadas generada del año 2016, con una superficie quemada total de 1858 ha. Este año se eligió el tiempo 1 (t_1) para que existiera una proximidad temporal con la capa de vegetación y uso del suelo del año 2016 descargada de la página de SAMOF (<https://snmf.cnf.gob.mx/cobertura-del-suelo/>). Posteriormente se utilizó la cartografía de áreas quemadas de los años 2020 y 2021, que se unió con la capa de vegetación y uso del suelo del año 2022, el cual se le asignó como el tiempo 2 (t_2) esto debido a que fueron dos años con una superficie afectada elevada, de acuerdo con los datos proporcionados por la CONANP.

La identificación de los patrones de relación entre las variables cartográficas explicativas y la localización de la probabilidad de cambios se realizó mediante el método de pesos de evidencia

(Bonham-Carter, 1994). El cálculo de los coeficientes para los pesos de la evidencia, permitió la combinación de evidencias que respaldan una hipótesis, utilizando la información de las variables definidas. Esto facilitó la comprensión de la influencia de las variables en la transición de cubierta forestal a áreas quemadas (J. F. Mas, 2018). Para calcular la influencia de las variables seleccionadas, el software calcula los pesos de evidencia de cada variable para cada transición, lo que posibilita la generación de un mapa de probabilidad de transición (Sahagún Sánchez *et al.*, 2022).

Los pesos de evidencia se calcularon mediante el método bayesiano de probabilidad condicional (Soares Filho *et al.*, 2009). Se le denomina probabilidad condicional a la probabilidad de que un suceso se cumpla habiéndose cumplido uno previo (Mas y Flamenco, 2011). Los pesos de evidencia representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición (Soares Filho *et al.*, 2009). El peso positivo de evidencia, w_+ , asociado a la presencia de la condición considerada, se calcula según la ecuación:

$$w_+ = \ln \left(\frac{P(C/D)}{P(C/D)} \right)$$

donde $P(C/D)$ corresponde a la probabilidad de ocurrencia del evento C, dado un patrón espacial D, mientras que w_+ es el correspondiente peso de la evidencia.

La relación entre la presencia de una condición y la probabilidad de un evento incendiario se refleja en el valor del peso w_+ . Cuando la presencia de la condición tiende a disminuir la probabilidad del evento, este valor es negativo (Soares-Filho *et al.*, 2002). El cálculo de la probabilidad condicional puede resultar sencillo tomando en cuenta varias condiciones, ya que se suman los pesos de evidencia. Para esto, es necesario que previamente se calcule el supuesto de independencia condicional entre las variables (López *et al.*, 2018), determinado a través del grado de correlación entre las variables como posibles detonantes a la probabilidad de ocurrencia de incendios.

Para evaluar la correlación espacial se calculó el coeficiente de Cramer (Bonham-Carter, 1994) Este coeficiente opera sobre los valores reales de las áreas de superposición de diferentes categorías de dos mapas, con el propósito de validar la existencia de correlación o asociación entre ambos. Este cálculo se realiza para todas las posibles combinaciones de pares de mapas respecto a un mismo tipo de transición y para todas las transiciones calculadas de la matriz de probabilidad de transición (Farfán, 2015). El coeficiente de Cramer varía en un rango de cero a uno, donde cero

indica variables totalmente independientes y uno indica variables totalmente correlacionadas. Un valor del coeficiente mayor a 0.45 sugiere una correlación suficiente entre ambas variables, lo que implica que una de ellas debería ser descartada (Soares Filho *et al.*, 2009).

3.6 Mapa de probabilidad a incendios forestales.

Finalmente, el software realiza el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de incendios, empleando los pesos de evidencia asociados a cada variable de influencia considerada. Posteriormente, genera un mapa detallado que identifica las zonas con mayor riesgo de ser afectadas por incendios dentro del Parque Nacional del Sureste (PNCS). Este mapa, elaborado mediante el modelo, se divide en cinco categorías que reflejan la probabilidad de ocurrencia de incendios: (1) Bajo, (2) Medio, (3) Alto y (4) Muy Alto. Este proceso de clasificación se llevó a cabo utilizando el método de rupturas naturales.

Tabla 7: Rangos de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales.

Probabilidad	Valor
Baja	0 – 0.25
Media	0.25 – 0.50
Alta	0.50 – 0.75
Muy alta	0.75 – 1.0

3.6 Evaluación de la probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales con el estadístico de la curva ROC.

El mapa resultante fue evaluado mediante el análisis de las características operativas del receptor (ROC) en el software Dinámica EGO, en concordancia con el enfoque metodológico propuesto por Mas *et al.* (2013) que menciona que el análisis ROC es un método cuantitativo ampliamente aplicado para medir la eficacia de la probabilidad de ocurrencia en los mapas, a través del rendimiento de los métodos de clasificación binaria con orden de rango o valores de salida continuos. La construcción de la curva ROC es un proceso que se aplica al umbral de idoneidad y se cataloga en dos categorías para obtener un modelo binario, donde los valores del modelo original que están por debajo del umbral indican falta de idoneidad mientras que los iguales a o por encima del umbral indican idoneidad (Sahagún Sánchez *et al.*, 2022).

El resultado de un análisis ROC aceptable tiene un rango de valores de 0.6 a 1 (Farfán *et al.*, 2020; Mas *et al.*, 2013) trazando los cambios en las tasas de predicción positiva verdadera versus tasas de predicción de falsos positivos. La curva ROC pasa por el punto de (0,1) donde el área bajo la curva (AUC) = 1 representa una sensibilidad del 100 % (sin falsos negativos; la proporción de igniciones se predice correctamente) y 100% de especificidad (sin falsos positivos; la proporción de no incendios se predijo correctamente) (Jaafari *et al.*, 2017).

Los resultados en una curva ROC se pueden interpretar de esta forma: sí el modelo tiene resultados que están por debajo del valor de la diagonal de 0.5, representa un modelo fallido y es peor que el azar; de 0.6 a 0.7 indican que el modelo tiene una capacidad moderada de predicción; de 0.7 a 0.8 indican una buena capacidad del modelo; si los resultados van de 0.8 a 0.9, el modelo tiene muy buena capacidad de predicción; y si son de 0.9 a 1, el modelo tiene una excelente capacidad predictiva (Farfán *et al.*, 2020; Milanović *et al.*, 2023). La tasa de éxito de una curva ROC indica qué tan bien el modelo predice la probabilidad de ocurrencia de incendios con la ocurrencia del evento (Jaafari *et al.*, 2017). Por tanto, cuanto más alto sea el valor, mejor será el modelo en términos de precisión y capacidad predictiva.

CAPITULO 4. RESULTADOS.

4.1 Cálculo de áreas quemadas.

La metodología empleada para adquirir datos sobre las cicatrices de incendios, mediante la composición de falso color RGB, condujo a la generación de la cartografía de áreas quemadas. Con el fin de mejorar los resultados obtenidos, se integró la capa de cobertura vegetal y uso del suelo proporcionada por el Sistema Satelital de Monitoreo Forestal (SAMOF). Esta integración facilitó la discriminación de elementos como cuerpos de agua, áreas urbanas, zonas sin vegetación y otros factores que no eran relevantes para este proyecto.

La cartografía de áreas quemadas obtenida permitió la identificación de las zonas afectadas por incendios durante un periodo de 6 años, comprendidos entre 2016 y 2021. Durante este periodo se registró una superficie quemada de 6 369.61 ha, de acuerdo con la figura 2 donde se representa la cartografía de áreas quemadas obtenida a través de imágenes de satélite. Este valor representa el 29.23% del área total del Parque Nacional Cañón del Sumidero. La media anual de la superficie afectada se situó en 931 ha.

Es crucial destacar que el PNCS cuenta con una superficie de 10,533.03 ha de vegetación sensible al fuego. Al analizar las áreas quemadas, se observó que el año 2019 registró la mayor ocurrencia de incendios, con 165 áreas quemadas que abarcaron una superficie de 2,115.77 ha. En orden de magnitud, le siguió el año 2016, con 300 áreas quemadas que cubrieron una superficie de 1,858.35 ha. Posteriormente, en 2020 se identificaron 85 áreas quemadas, afectando una superficie de 1,040.80 ha, mientras que en 2021 se registraron 65 áreas quemadas, cubriendo una extensión de 575.09 ha. El año 2017 presentó 97 áreas quemadas que abarcaban 420.07 ha, y finalmente, el año 2018 reportó 103 áreas quemadas y una superficie afectada de 359.64 ha.

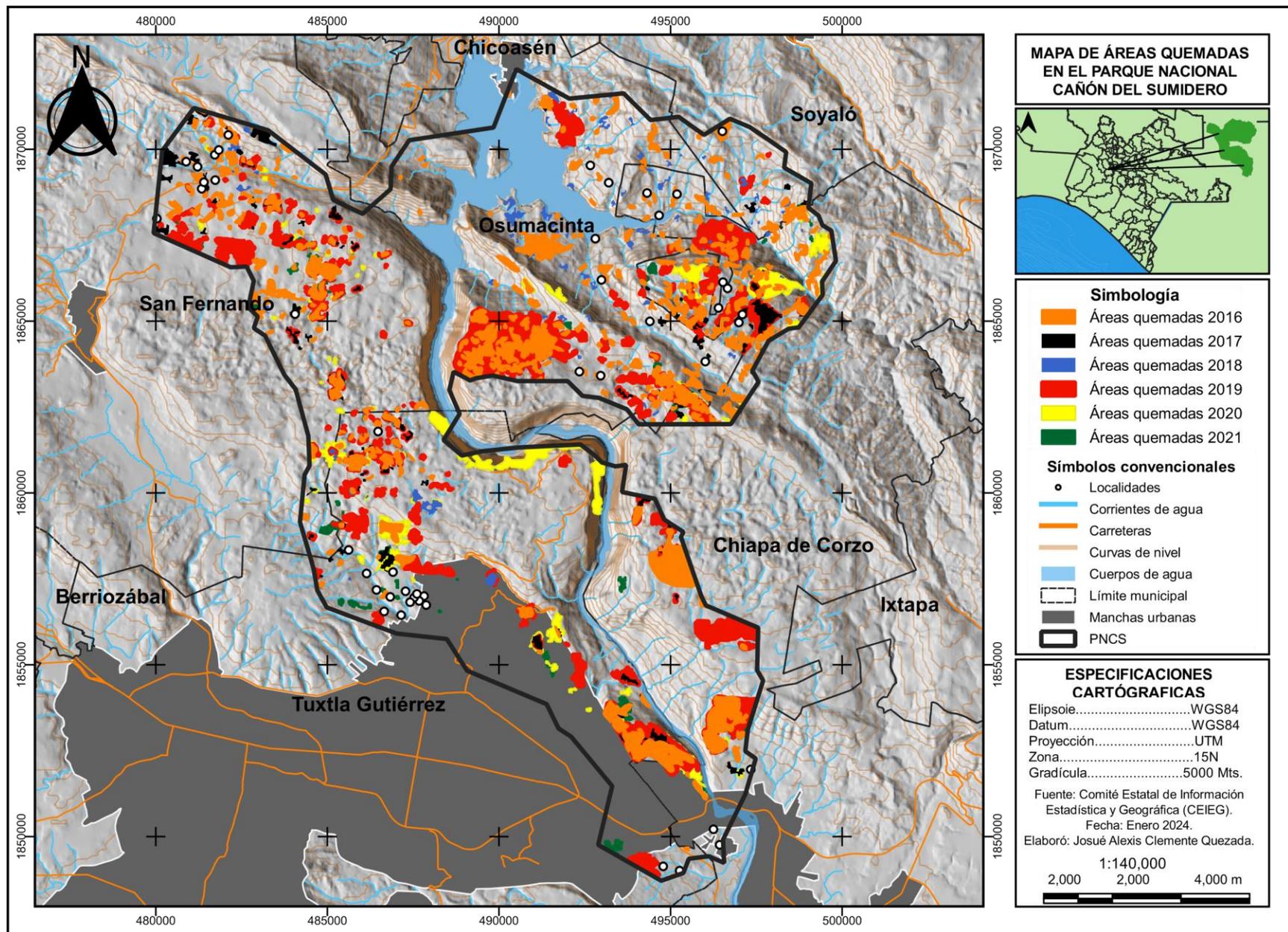
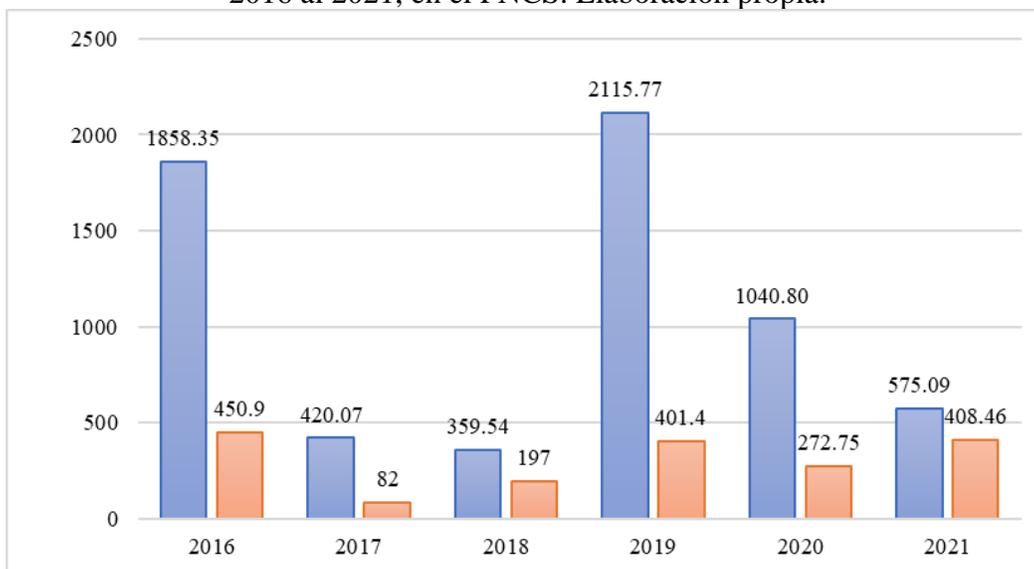


Figura 17: Mapa de áreas quemadas del 2016 al 2021 dentro del PNCS.

En la figura 18 se presentan las superficies estimadas en color azul en comparación con las superficies estimadas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), de color naranja. Se observó una diferencia significativa de 4 557.11 ha, equivalente a un porcentaje promedio de diferencia del 55.7% entre las áreas reportadas y las identificadas mediante el análisis satelital, este resultado sugiere una subestimación en las superficies reportadas por la CONANP.

Figura 18: Superficies quemadas cartografiadas y superficies reportadas por la CONANP del 2016 al 2021, en el PNCS. Elaboración propia.



Los resultados obtenidos encuentran respaldo en el análisis de varianza. Según los datos presentados en la tabla 3, se determinó la suma de los cuadrados en el estudio y los grados de libertad con el propósito de identificar el número de tratamientos realizados. Es esencial destacar que el punto crítico de la función es de 4.96, mientras que el valor del punto calculado es de 5.78. Estas cifras nos permiten verificar las hipótesis previamente formuladas. Además, se ha creado la figura 5 para facilitar una comprensión más clara de los datos relevantes.

Tabla 8: Análisis de varianza de las variables de las áreas quemadas generadas por imágenes de satélite y los datos proporcionados por la CONANP. Elaboración propia.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1730601.56	1	1730601.56	5.78538552	0.0369803	4.96460274
Dentro de los grupos	2991333.18	10	299133.318			
Total	4721934.74	11				

La interpretación del análisis de varianza, presentado en la tabla 3, indica una significancia en la variable de área quemada con los datos de la CONANP. Con un Valor P de 0.0369803 y considerando un nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula, que sugiere que no hay diferencia significativa entre las superficies quemadas obtenidas. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe una diferencia entre ambos conjuntos de datos. Al examinar la figura 4, podemos diagnosticar que el valor encontrado de la función, $F = 5.78538552$, es mayor al punto crítico para $(f) = 4.96460274$.

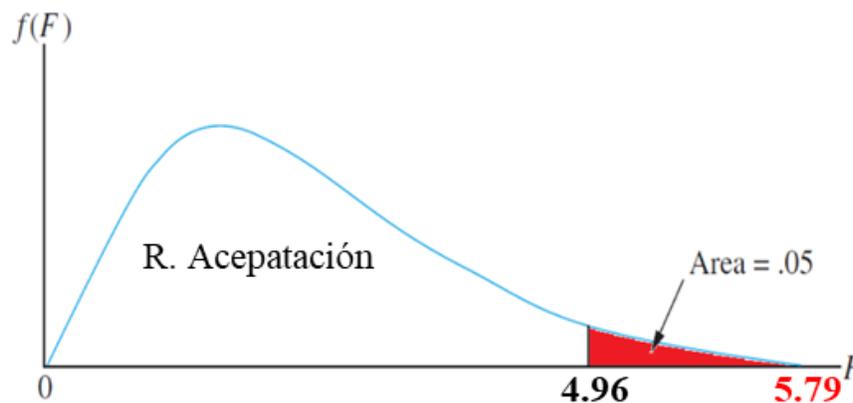


Figura 19: Diagrama de Prueba de Hipótesis.

4.2 Estadísticas de superficies afectadas por incendios forestales.

La cartografía detallada de las áreas quemadas no solo permitió el conteo preciso de las zonas afectadas, sino que también permitió un análisis exhaustivo de los impactos en distintos tipos de cobertura, tales como bosques, selvas medianas, selva baja, pastizales y tierras agrícolas. Esta información detallada y diferenciada proporcionó una visión más profunda sobre la dinámica y el comportamiento del fuego en cada tipo específico de superficie identificada. Asimismo, ayudó a determinar patrones de vulnerabilidad y la adaptabilidad de cada cobertura frente a los incendios.

En la figura 20 se observa una mayor extensión de bosque afectado por incendios durante el año 2016, con un total de 112.23 ha, seguido del año 2019 con 63.46 ha afectadas. Por otro lado, se identifican los años 2020 y 2021 como aquellos con menor superficie impactada, presentando 17.35 y 1.68 ha respectivamente.

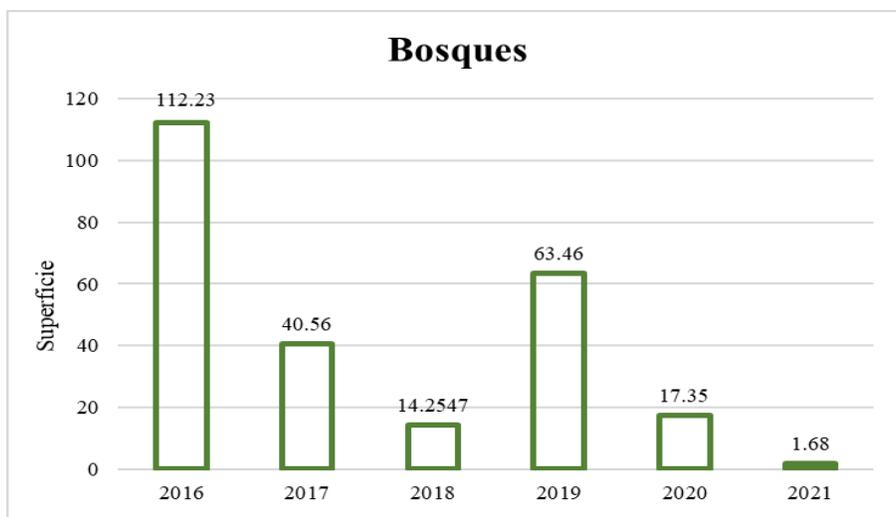


Figura 20: Superficie (en ha) de bosques afectados por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.

En relación a las selvas bajas, se evidencia una mayor extensión afectada por incendios durante el año 2016, abarcando 341.64 ha, seguido por el año 2020 con un área de 254.24 ha. El año 2019 también presenta una considerable afectación con 212.75 ha, seguido por el año 2021 con 62.94 ha. Por otro lado, se identifican los años 2017 y 2018 con menor extensión impactada, registrando 54.15 y 40.23 ha respectivamente (figura 21).

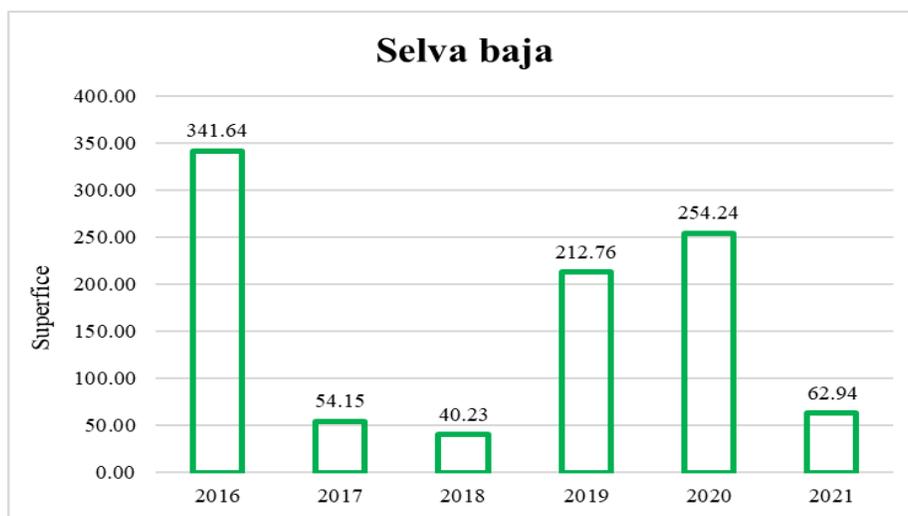


Figura 21: Superficie (en ha) de selva baja afectada por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.

En cuanto a la cubierta forestal de selva mediana, se observa una tendencia similar a la de los bosques, con las áreas más afectadas por incendios en los años 2019 y 2019, registrando 212.76 ha y 156.26 ha respectivamente. Posteriormente, se encuentran los años 2017 con 79.22 ha y 2021

con 72.02 ha afectadas. Los años con menor extensión afectada por incendios fueron los años 2020 con 63.73 ha y 2018 con 6.35 ha, siendo este último año notable por la significativa disminución en la afectación comparada con los demás años del análisis (figura 22).

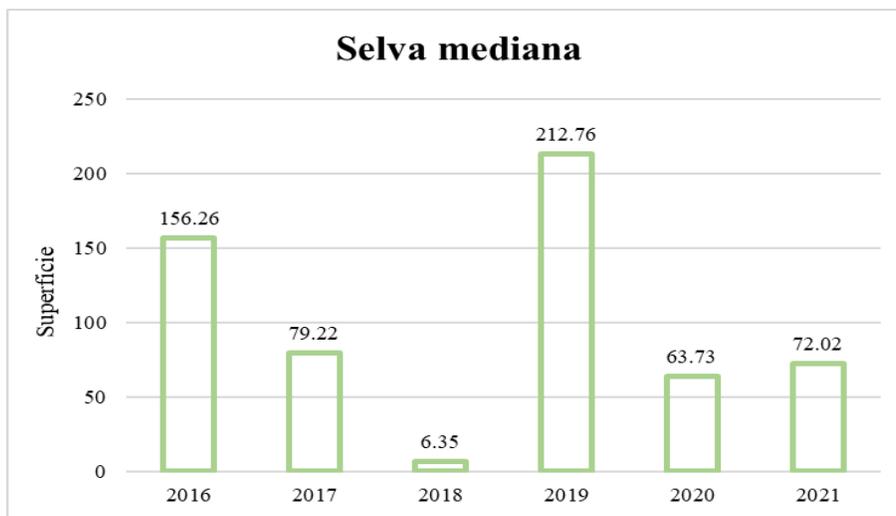


Figura 22: Superficie (en ha) de selva mediana afectada por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.

Los pastizales cultivados e inducidos fueron la cobertura más afectada por los incendios forestales. Se registró una superficie considerablemente afectada en el año 2019, alcanzando 845.36 ha. Le siguieron los años 2016 con 738.40 ha, el año 2020 con 445.72 ha y el 2021 con 325 ha quemadas. Por otro lado, los años con menor impacto fueron 2017 y 2018, presentando 264.14 ha y 175.06 ha afectadas respectivamente (ver figura 23).

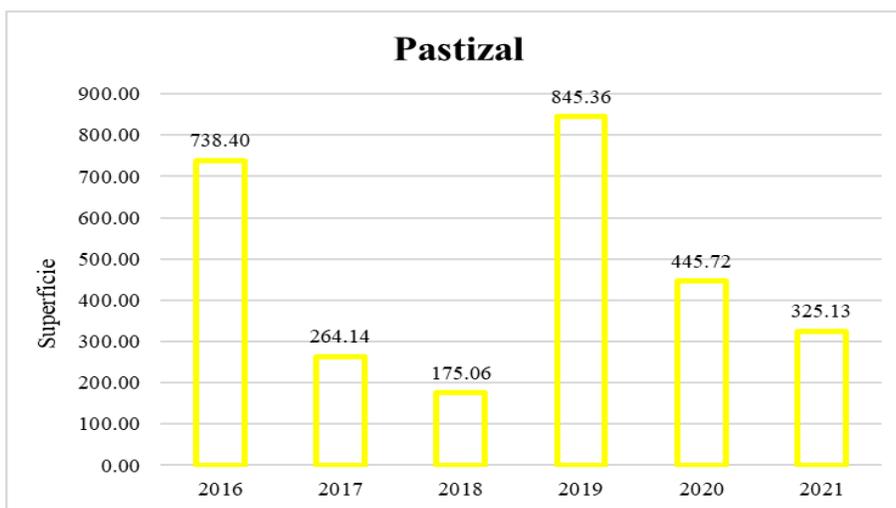


Figura 23: Superficie (en ha) de pastizales afectados por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.

En la figura 24, se evidencia que las tierras agrícolas muestran patrones similares de afectación por incendios comparables a los pastizales. El año con la mayor superficie quemada fue el 2019, registrando 527.67 ha afectadas, seguido por el año 2016 con 485.87 ha, el 2020 con 252.28 ha, el 2021 con 94.13 ha, el 2017 con 78.32 ha y, por último, el año 2018 con 73.24 ha.

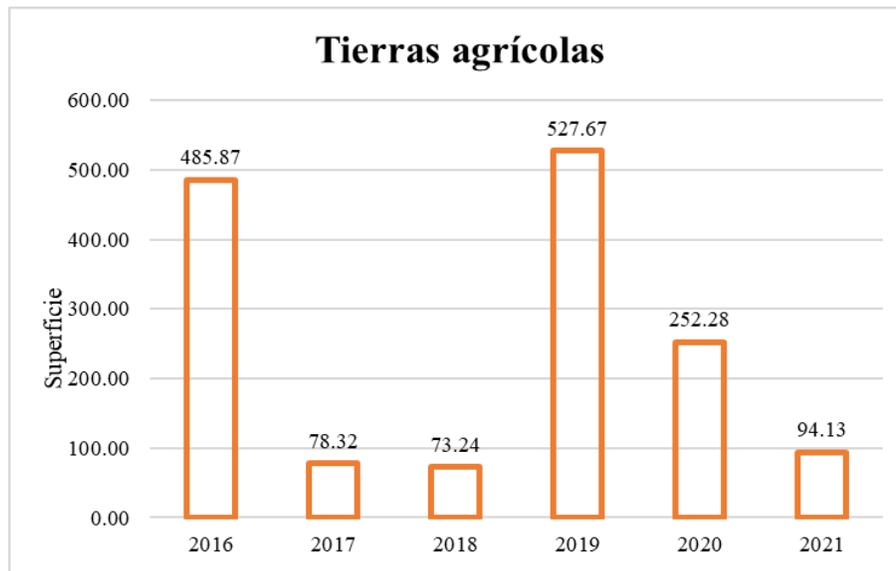


Figura 24: Superficie (en ha) de tierras agrícolas afectadas por incendios del 2016 al 2021. Elaboración propia.

4.3 Matrices de transición.

El análisis del impacto del fuego sobre los patrones de uso del suelo y la dinámica de la cobertura forestal se ha abordado mediante la aplicación de modelos basados en matrices de probabilidad de Markov expresadas en porcentaje. Dos enfoques modelísticos fueron empleados: la matriz anualizada y la matriz que abarca el periodo completo. Esta metodología ha sido crucial para comprender la evolución del fuego en sus diferentes transiciones dentro de los diversos ecosistemas presentes en la región de estudio.

En la figura 25, se presentan las probabilidades de transición de Markov anualizadas de los tipos de vegetación y usos del suelo con respecto a las áreas afectadas por los incendios. Se observa que la transición de tierras agrícolas a áreas quemadas tiene la probabilidad más alta del 0.031. Lo que puede deberse a que los incendios son mayormente originados por el uso del fuego en actividades agropecuarias, especialmente en la preparación de áreas para uso agrícola y la renovación de pastizales en zonas de pastoreo de ganado. También se registró una superficie afectada en los pastizales inducidos, con una probabilidad de transición de 0.02, causada típicamente por incendios

en la zona de interfaz urbano-forestal. En cuanto a las selvas bajas y medianas, presentan probabilidades de transición a zonas quemadas de 0.01 y 0.007 respectivamente. Por otro lado, los bosques de pino y encino no muestran afectación por el fuego debido a su ubicación marginal al noreste del cañón y su distancia de las áreas agrícolas y de pastizales.

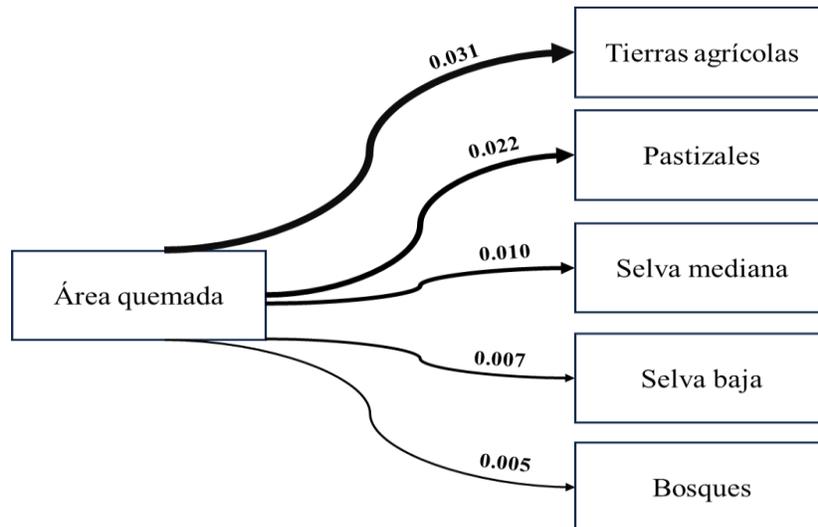


Figura 25: Diagrama de flujo que representa las transiciones de la cubierta forestal y usos de suelo a áreas quemadas que fueron definidas en el modelo de manera anual. Elaboración propia.

En la figura 26 se visualiza la probabilidad markoviana durante el periodo de calibración comprendido entre 2016 al 2021 en porcentaje, relacionando diversas coberturas forestales con áreas afectadas por incendios. Dentro de este intervalo de seis años, se observa un patrón predominante de afectación en tierras agrícolas con un índice de 0.097. Le siguen en nivel de probabilidad los pastizales inducidos, la selva mediana y la selva baja, con cifras de 0.076, 0.039 y 0.031, respectivamente. En última instancia, se encuentra la cobertura boscosa con una probabilidad de 0.02 de transición hacia áreas quemadas.

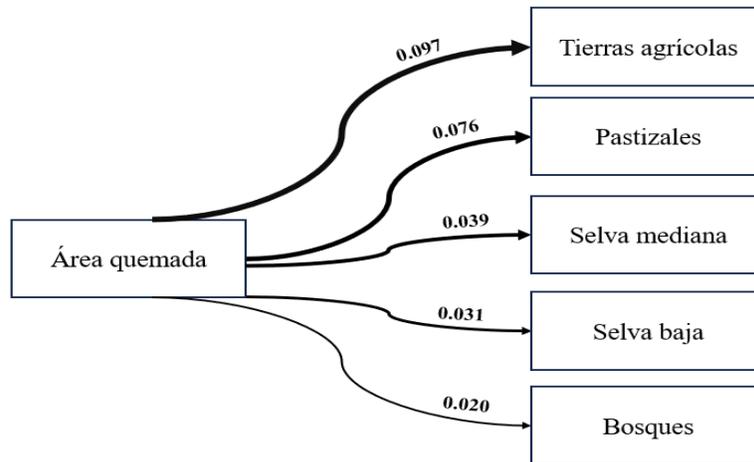


Figura 26: Diagrama de flujo que representa las transiciones de la cubierta forestal y usos de suelo a áreas quemadas que fueron definidas en el modelo en la etapa de calibración. Elaboración propia.

4.4 Generación de mapa de calor.

El mapa de calor que se presenta es el resultado de un detallado análisis de datos sobre incendios forestales que abarcan el período de 2009 a 2022. Esta representación geoespacial se fundamenta en una recopilación minuciosa de información que detalla cada incidente registrado durante este intervalo de tiempo. A pesar de contar con registros de superficies quemadas desde el año 2003, estos datos no pudieron ser integrados debido a la ausencia de información precisa sobre su ubicación geográfica. La base de datos recopilada, que detalla cada incendio forestal, se representó en forma vectorial tipo punto, utilizando coordenadas UTM. Antes de emplear estos datos, se llevó a cabo un riguroso proceso de verificación y depuración. Esta fase implicó una validación de la precisión geográfica de cada punto recopilado, eliminando aquellos registros que no cumplieran con los criterios de exactitud espacial, de esta forma, se garantizó la fiabilidad y coherencia de los datos geoespaciales utilizados.

La representación cartográfica se llevó a cabo empleando herramientas especializadas en el Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS. Esta herramienta permitió integrar y visualizar la densidad y distribución de los puntos de incendios forestales a lo largo del parque, proporcionando una representación gráfica detallada y comprensible de las áreas con mayor concentración de eventos de fuego. Asimismo, este mapa de calor no solo muestra la distribución geoespacial de los incendios, sino que también los patrones temporales, áreas de mayor actividad y zonas potencialmente críticas con una mayor incidencia de incendios forestales.

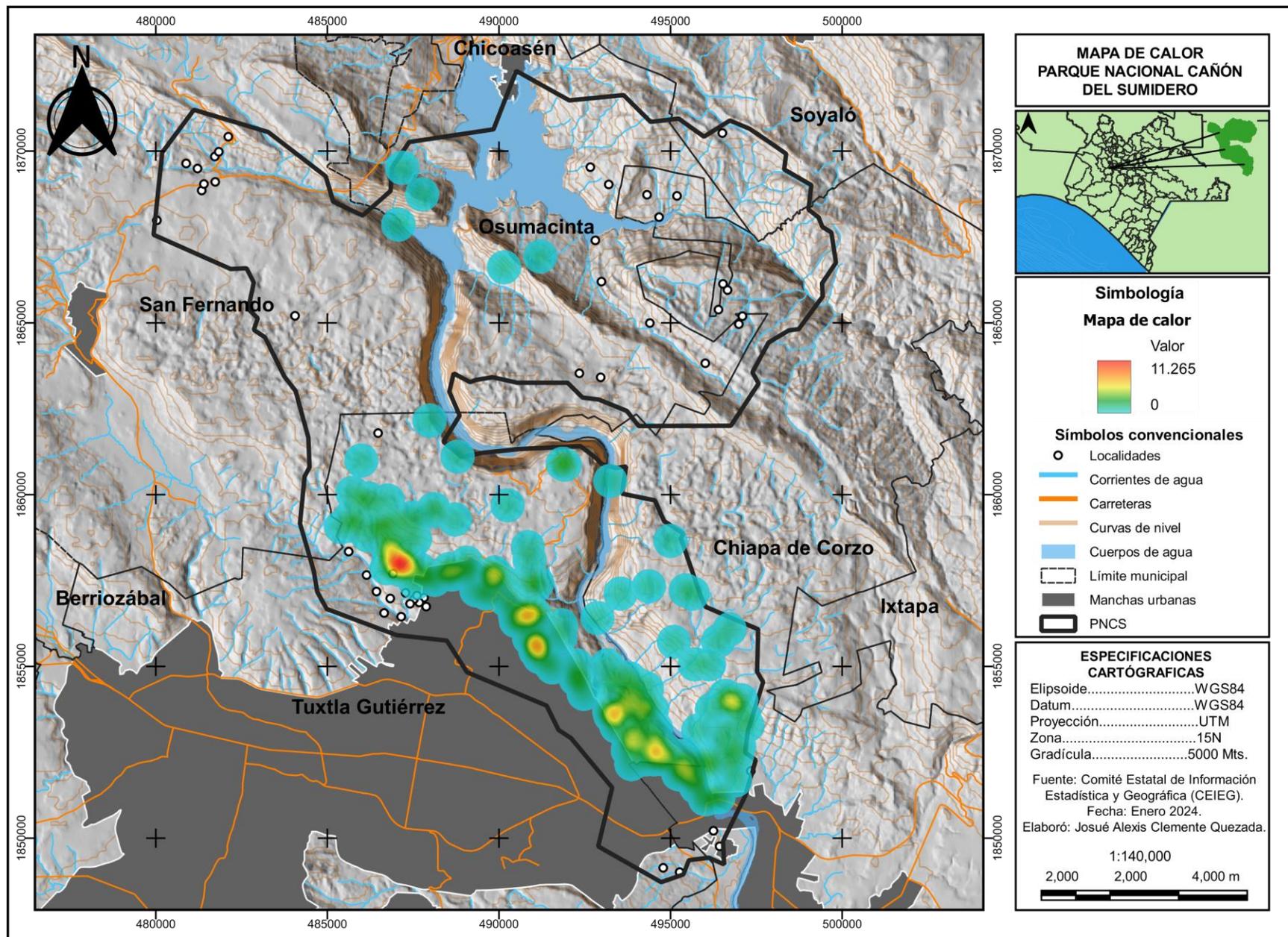


Figura 27: Mapa de calor generado por los puntos de incendios forestales en el PNCS.

4.5 Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Mediante la aplicación de la metodología, se ha logrado desarrollar un mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS) a través de un modelo espacialmente explícito (ver Figura 28). Este mapa representa los valores utilizando una escala de colores, donde los tonos rojos representan las probabilidades más altas cercanas a 1 mientras que los valores cercanos a cero se observan en color azul-morado oscuro

A partir de las probabilidades obtenidas, se clasificaron en cuatro categorías: bajo, medio, alto y muy alto, conformando el mapa de riesgo de incendios forestales (figura 29). La cuantificación de la superficie correspondiente a cada categoría y su proporción con respecto al área total del parque se presenta en la tabla 9. Esta representación cartográfica proporciona una visión detallada de las áreas con mayor riesgo a sufrir estos eventos. Destacan como variables con mayor peso de evidencia se encuentran la proximidad a tierras agrícolas, distancia a localidades urbanas y rurales, distancia a las áreas quemadas, así como la cercanía a vías de comunicación, todas estas con una significativa influencia en la predicción de riesgos.

Tabla 9: Superficie ocupada por cada clase del modelo de riesgo a incendios forestales, derivado de la reclasificación del mapa de probabilidad.

Rango	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Muy alto	4499.54	23.93
Alto	1696.11	9.02
Medio	2722.28	14.48
Bajo	9884.85	52.57

Las áreas señaladas en rojo indican un nivel muy alto de riesgo a incendios forestales, influenciadas principalmente por el uso del suelo y el tipo de vegetación predominante. Los pastizales y la vegetación de selva baja son los elementos predominantes en esta zona. Además, destaca la presencia humana debido a su proximidad con la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, observando una concentración significativa en colonias como Loma Larga, Vida Mejor, Paulino Aguilar, Las Granjas, La Esperanza, Yukis, Tierra Blanca La Fortuna, Flor de Mayo y Ampliación La Condesa, donde la vegetación tiende a ser más seca y la infraestructura de comunicación más extensa. Asimismo, se identifican proporciones menores en áreas adyacentes a localidades como El Palmar

y Nuevo Bochil, en el municipio de Chiapa de Corzo, y Triunfo Agrarista y El Paraíso, en el municipio de Osumacinta, zonas donde las prácticas agrícolas y los antecedentes de incendios previos ejercen una considerable influencia. Estos sectores abarcan aproximadamente un 23.93% del área total de estudio. Además, dentro del régimen de fuego en los ecosistemas, el 11.4%, equivalente a 2,119.25 ha de vegetación sensible al fuego.

Por otro lado, las zonas identificadas como de alto riesgo (marcadas en naranja) comprenden un 9.02% del parque y representan el 5.4% de los ecosistemas sensibles al fuego. Esta clasificación comparte características similares con las áreas con probabilidad muy alta. Estas zonas se ven influenciadas principalmente por el tipo de vegetación, que incluye principalmente selva baja, pastizales y áreas de uso agrícola. Además, la presencia de vías de comunicación desempeña un papel crucial, ya que estas áreas están atravesadas por carreteras que conducen a los miradores y caminos presentes en la zona. Es importante destacar que esta categoría representa el nivel de riesgo más bajo dentro del parque.

El nivel de riesgo medio, representado por tonos verdes claros, abarca el 14.48% del territorio y se encuentra principalmente en áreas de selva baja y mediana, predominantemente en la zona central del parque. Por último, las áreas de bajo riesgo, identificadas en verde, comprenden el 52.57% del área total. Estas áreas se localizan principalmente en zonas con menor densidad de población, con pendientes topográficas superiores a 15° y donde no se han registrado incidentes previos de incendios. Se extienden principalmente hacia la parte noroeste y el centro del parque.

Cabe mencionar que el mapa presentado en la figura 29 muestra unos patrones lineales, esto debido a la falta de homogeneidad en las probabilidades generadas por el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el software Dinámica EGO, atribuyéndose a la variabilidad inherente en los datos de entrada utilizados. La diversidad de fuentes de información, la precisión variable de los datos, así como la heterogeneidad espacial y temporal, contribuyen a la generación de resultados no uniformes. Además, la presencia de valores bajos en algunas áreas puede ser indicativa de la influencia de factores locales específicos que no están siendo capturados de manera adecuada por el modelo.

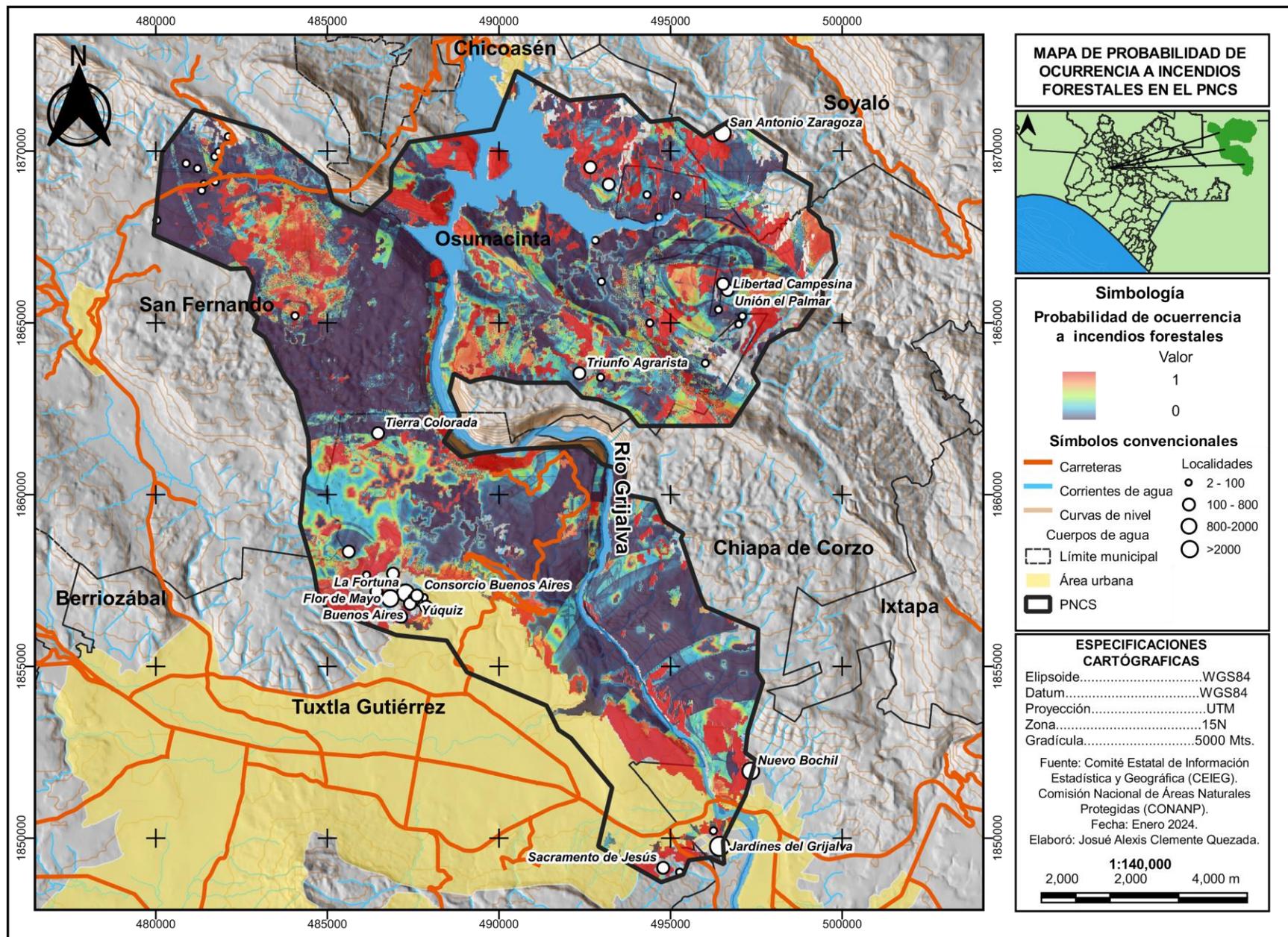


Figura 28: Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el PNCS.

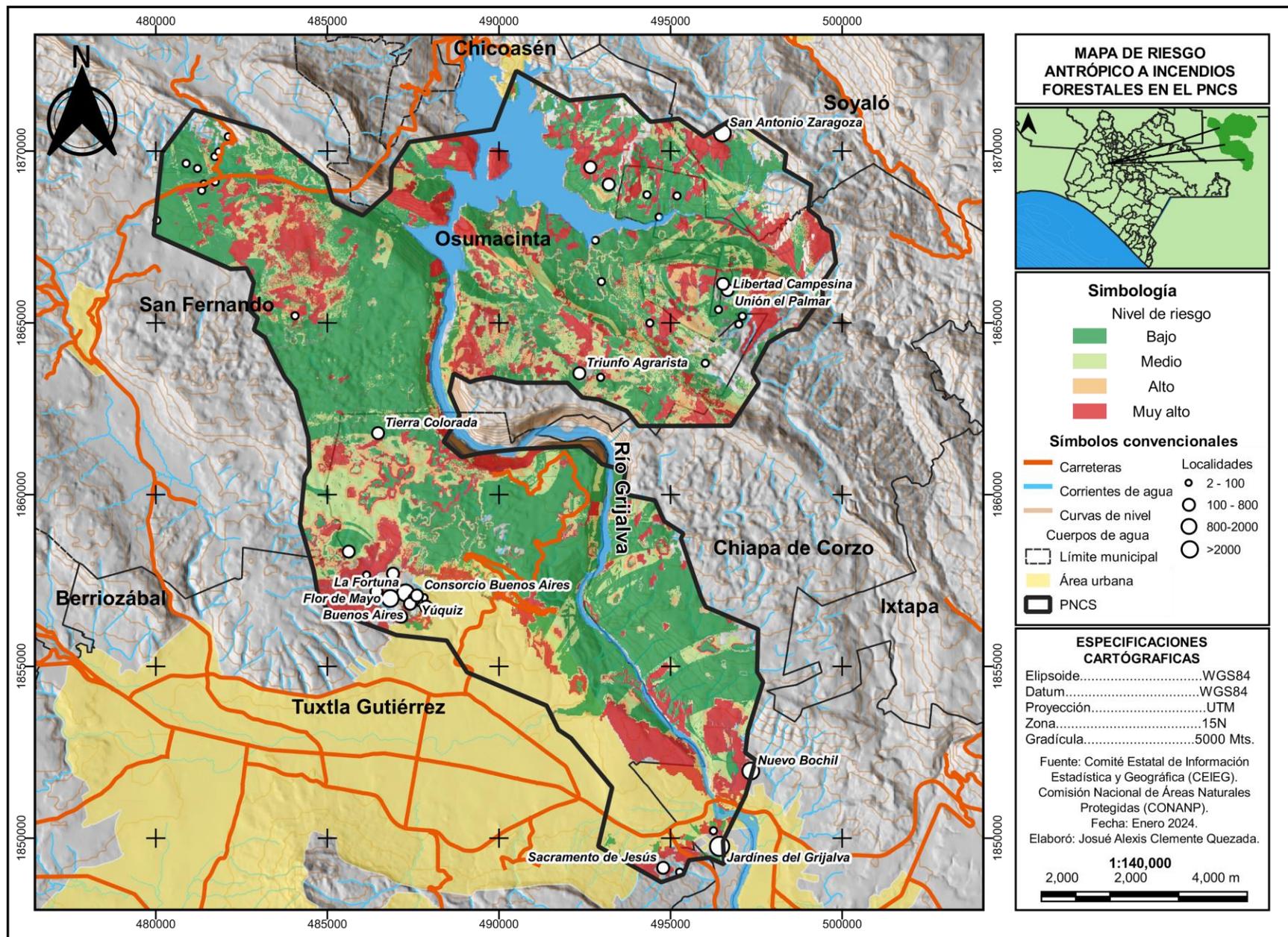


Figura 29: Mapa de riesgo a incendios forestales para el PNCS, clasificándolo en cuatro categorías (muy alto, alto, medio y bajo).

4.6 Evaluación del modelo de probabilidad.

Con la finalidad de evaluar el rendimiento general del modelo, calculamos del área bajo la curva (AUC) de las características operativas del receptor (ROC) teniendo en cuenta lo propuesto por (Mas *et al.*, 2013), calculando las AUC de los gráficos ROC para el modelo de las diferentes coberturas que son afectadas por los incendios forestales, encontrando que para la selva baja arrojó un valor de área bajo curva (AUC) de 0.66, para la selva mediana tuvo un valor de 0.63, para los pastizales un valor de 0.70 y para el uso agrícola de 0.68. La curva representa en el eje de las abscisas la tasa de falsos negativos, mientras que en el eje de las ordenadas se presenta la tasa de verdaderos positivos.

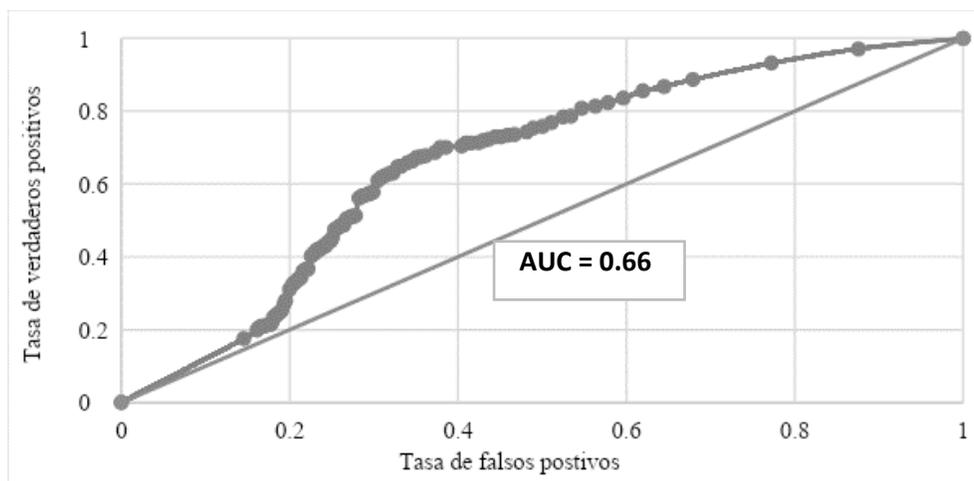


Figura 30: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de selva baja en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.

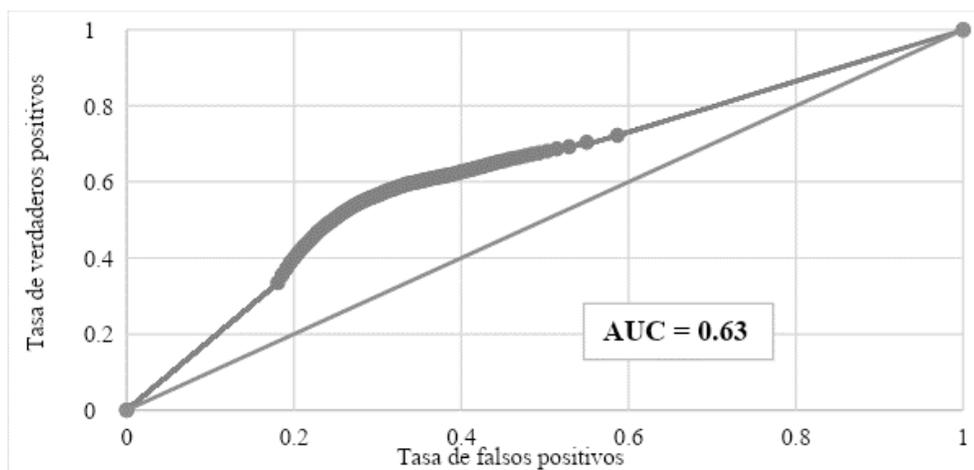


Figura 31: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de selva mediana en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.

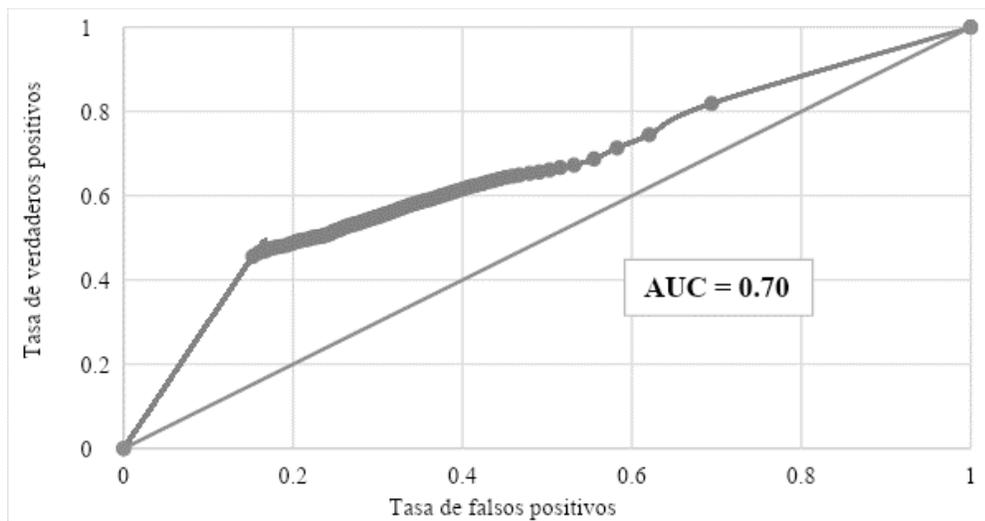


Figura 32: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de pastizales en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.

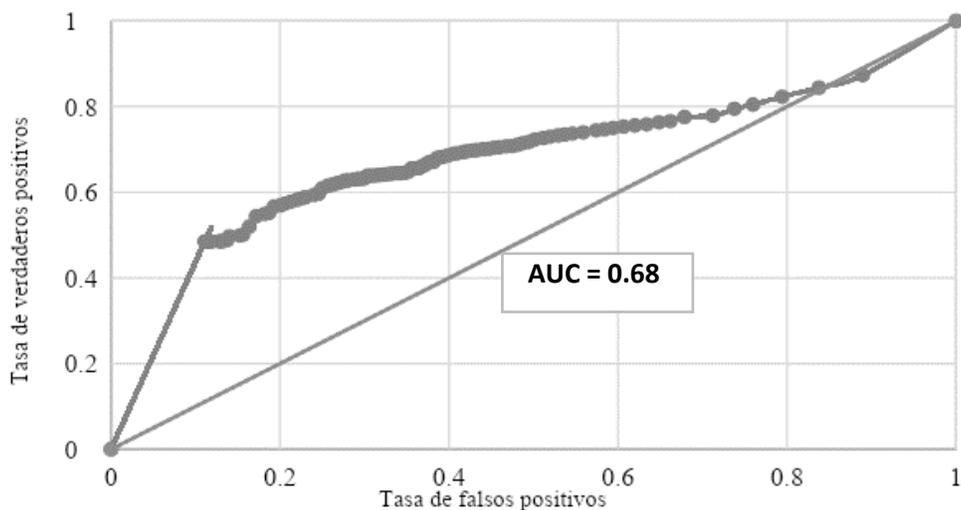


Figura 33: Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) de la cubierta de agricultura en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios generado para el PNCS. Elaboración propia.

CAPITULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.

5.1 Discusión.

Las superficies quemadas fueron obtenidas con imágenes SENTINEL 2A, que permitió tener un nivel de detalle que posibilita la delimitación cartográfica con una mayor precisión en comparación con otros sensores, como MODIS (Salazar *et al.*, 2019). El uso de imágenes de satélite para el monitoreo de áreas quemadas ofrece importantes ventajas, de acuerdo a investigaciones realizadas por Ibnousaih (2021) en las Palmas de Gran Canaria, España y Ayala *et al.* (2022) en la interfaz urbano-forestal del área Metropolitana de la ciudad de Guanajuato, en ambos estudios se enfatiza la importancia de las imágenes de satélite como herramientas cruciales para monitorear áreas quemadas, ya que proporcionan una visión global y detallada, de su identificación y evolución en el tiempo. Por tanto, sería importante que instituciones como la CONANP realizaran las estimaciones de las áreas quemadas atendidas apoyándose de esta importante herramienta. El año 2019 destacó por presentar una significativa superficie afectada por incendios forestales en comparación con las estimaciones realizadas para los años 2017 y 2018, los cuales registraron la menor superficie. Este aumento en superficie quemada se atribuye a una combinación de factores antropogénicos y climáticos. Durante el año 2019, estas incidencias se vieron influenciadas por condiciones climáticas marcadas por la presencia del fenómeno del ENOS Niño. Su efecto reduce las precipitaciones, eleva la temperatura y la vegetación está más disponible para arder, por lo que en años Niño, las áreas afectadas por los incendios forestales son de mayor tamaño. (Farfán *et al.*, 2021).

Al realizar el cálculo de los pesos de evidencia, se destacó la relevancia de la variable de distancia a zonas de uso agrícola en el modelo. Estos resultados coinciden con otras investigaciones previas, como la de Farfán *et al.*, (2020), donde se determinó la influencia de la proximidad a áreas agrícolas en la incidencia de incendios forestales. Asimismo, el estudio de mapeo de la ocurrencia de incendios forestales en el Voivodato de Baja Silesia de Polonia realizado por Milanović *et al.*, (2023) determinó una fuerte asociación con actividades humanas, especialmente la presencia de tierras agrícolas y vías de comunicación, indicando que una parte significativa de los incendios forestales está vinculada a estas actividades antropogénicas; Cruz (2016) explicó que las variables en su modelo están estrechamente asociadas a las actividades humanas, que al igual que esta investigación, evidencia la importancia de considerar el factor humano en la evaluación de riesgos de incendios. Sin embargo Muñoz *et al.*, (2005) consideró que los factores socioeconómicos fueron

las variables que recibieron el menor valor de su modelo, debido a las particularidades de su área de estudio, los cuales indicaban zonas con muy poca densidad de población, nulas actividades recreativas y una nula existencia de problemáticas relacionadas con el litigio de propiedades.

El riesgo de incendios forestales está directamente relacionado con la proximidad de áreas densamente pobladas a las Áreas Naturales Protegidas (ANP), como es el caso de las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y Chiapa de Corzo, que prácticamente, la expansión de la mancha urbana ha alcanzado gran parte del territorio del parque, generando vías de acceso que constituyen potenciales fuentes de perturbación para la cobertura vegetal dentro de la reserva. De acuerdo al estudio de Suryabhagavan *et al.* (2016), se identificó un mayor riesgo de ocurrencia a un incendio forestal en áreas cercanas a asentamientos con vegetación alterada, como pastizales o matorrales, lo que puede facilitar la propagación del fuego. En este sentido, en relación con el PNCS, el cambio en el uso del suelo ejerce una influencia significativa en su territorio, especialmente debido al notable aumento en el tamaño de las zonas urbanas y áreas destinadas a actividades agrícolas, factores cruciales que contribuyen al aumento del riesgo de ocurrencia a un incendio forestal. Por otra parte, además de la expansión urbana, las actividades agropecuarias sin la observación a la NOM-015 SEMARNAT/SAGARPA-2007 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2009), pueden convertirse en incendios forestales en el uso del fuego para actividades agropecuarias, como la preparación de áreas para cultivos y la renovación de pastos para ganado bovino (Nañez *et al.*, 2019). Las prácticas de quema son comunes en el PNCS, ya que presentan una opción de bajo costo y se respaldan en la fertilización del suelo, reducen las plagas y minimizan la mano de obra, entre otros beneficios. No obstante, el uso excesivo e irresponsable del fuego puede reducir sus efectos positivos. A pesar de la existencia de la Norma Oficial Mexicana NOM-015 SEMARNAT/SAGARPA-2007 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2009), que establece los protocolos y especificaciones técnicas para el uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios, es una norma no observada por los dueños de las parcelas agropecuarias.

Los resultados mostraron que un 11.4% equivalente a 2 119.25 ha de la vegetación que es sensible al fuego, se encuentra en la categoría de alto riesgo a incendios forestales, situación que puede comprometer los servicios ecosistémicos que proveen tanto las selvas bajas como medianas caducifolias (Hamilton, 2008), dando paso a un proceso de sabanización, con la extensión de pastizales exóticos y adaptados al fuego.

El software empleado en esta investigación, conocido como Dinámica EGO, ha demostrado su eficacia para analizar la influencia de variables espaciales y temporales en los procesos territoriales. Ha sido aplicado exitosamente en la modelación del cambio de uso del suelo, el desarrollo urbano y la evaluación de la probabilidad de incendios, entre otros fenómenos relevantes (Mas & Flamenco, 2011; Sahagún-Sánchez *et al.*, 2011; Farfán *et al.*, 2018; Milanović *et al.*, 2023). Estos modelos posibilitan la proyección de las posibles implicaciones tanto ecológicas como socioeconómicas de los daños en estos paisajes. Además, representan una herramienta crucial para la toma de decisiones, al permitir la formulación de estrategias alternativas en el manejo de incendios forestales, entre otras aplicaciones clave en la gestión de territorios (Soares-Filho *et al.*, 2009)

En este estudio, se empleó un análisis espacialmente explícito con enfoque bayesiano empleando variables cartográficas centradas en un enfoque antrópico como fuentes de ignición. Aunque existen modelos que combinan variables climáticas y de combustible forestal, como se evidencia en estudios previos (Muñoz *et al.*, 2005; Vilchis-Francés *et al.*, 2015; Santiago *et al.*, 2018) es importante señalar que las actividades humanas se posicionan como la causa principal de los incendios forestales en México. El mapa de riesgo elaborado puede ser empleado como una herramienta fundamental para la planificación del manejo del fuego en el PNCS. Es un recurso esencial en la elaboración y/o actualización de los planes de manejo de fuego y estrategias para la prevención física y cultural de los incendios forestales en el PNCS.

5.2 Conclusión.

El presente estudio abordó la dinámica espacial y temporal (2016 - 2021) de la ocurrencia de incendios forestales, así como su probabilidad de ocurrencia en el PNCS. La superficie promedio de área quemada para dicho periodo fue de 1 061.60 ha. La dinámica entre usos de suelo, vegetación forestal y áreas quemadas, calculada a través de la matriz de Markov, mostró que las quemas agropecuarias cuando salen de control se vuelven incendios que afectan a la selva baja caducifolia, una vegetación sensible al fuego. El modelo espacialmente explícito y su reclasificación permitió identificar cuatro categorías de riesgo de incendios forestales bajo, medio alto y muy alto. El 23.93% del PNCS se encuentra en la categoría de muy alto riesgo a incendios forestales que coincide espacialmente con la distribución de la Selva baja caducifolia. La detección de zonas de alto riesgo se atribuye principalmente a la presencia de actividades humanas en áreas cercanas a zonas habitadas y de actividades de uso de suelo agropecuario. Dichas actividades conllevan el uso del fuego para la limpieza de parcelas y, en ocasiones, la gestión inadecuada de residuos sólidos, lo que subraya la importancia de una gestión para el buen manejo del fuego y la implementación de técnicas efectivas para reducir los impactos principalmente en la selva baja caducifolia. Se demostró que el modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales para el PNCS es confiable después de ser evaluado mediante la curva ROC.

GLOSARIO.

Área Natural Protegida (ANP): Espacio geográfico destinado a la conservación de la biodiversidad y protección de los recursos naturales, con regulaciones para limitar actividades humanas que puedan dañar el medio ambiente.

Bayesiano: Relacionado con el teorema de Bayes, un principio estadístico que describe la probabilidad de un evento basado en el conocimiento previo de las condiciones que podrían estar relacionadas con el evento.

Combustible: Material inflamable presente en el entorno forestal, como hojas secas, ramas caídas, hierba y árboles muertos, que puede contribuir a la propagación de los incendios.

Condiciones climáticas: Factores atmosféricos como temperatura, humedad, viento y precipitación que influyen en la probabilidad y severidad de los incendios forestales.

Espacialmente explícito: Se refiere a información, análisis o modelos que tienen en cuenta la ubicación geográfica específica de los objetos, fenómenos o datos. Esto implica la consideración detallada de la distribución espacial y la relación entre elementos en un espacio geográfico concreto. Los análisis espacialmente explícitos permiten comprender mejor la variabilidad espacial y los patrones de distribución de características o eventos

Estimación de la probabilidad: Proceso de calcular la posibilidad de que ocurra un evento específico, basado en datos históricos, modelos estadísticos u otras herramientas analíticas.

Evaluación de riesgos: Análisis sistemático de los peligros potenciales y las vulnerabilidades asociadas con un evento, con el fin de determinar su probabilidad de ocurrencia y los posibles impactos.

Incendios forestales: Fuegos que afectan áreas cubiertas de vegetación, como bosques o selvas, y pueden ser causados por factores naturales o actividades humanas.

Modelos de predicción: Herramientas matemáticas o estadísticas utilizadas para prever la ocurrencia y comportamiento de los incendios forestales, basadas en variables como clima, vegetación, topografía y actividad humana.

Mitigación de incendios: Acciones dirigidas a reducir el riesgo y minimizar los impactos de los incendios forestales, que pueden incluir la creación de cortafuegos, la mejora de la infraestructura de extinción de incendios y la restauración de ecosistemas después del fuego.

Prevención de incendios: Conjunto de medidas destinadas a evitar la ocurrencia de incendios forestales, que pueden incluir regulaciones, vigilancia, educación pública y gestión del combustible.

Vulnerabilidad: Grado de susceptibilidad de un área o ecosistema a los efectos adversos de los incendios forestales, influenciado por factores como la densidad de vegetación, la presencia de especies endémicas y la proximidad a áreas urbanas.

RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS.

- 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. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178619>
- Amaya Devia, L. (2021). *Zonificación De Amenazas Por Incendios Forestales En El Municipio De El Rosal—Cundinamarca Mediante El Uso De Tecnologías SIG* [Tesis de licenciatura, Universidad de Cundinamarca].
<https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/3446>
- Ávila-Flores, D. Y., Pompa-García, M., & Vargas-Pérez, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 253-260.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.08.028>
- Ayala-Carrillo, M., Farfán, M., Cárdenas-Nielsen, A., & Lemoine-Rodríguez, R. (2022). Are Wildfires in the Wildland-Urban Interface Increasing Temperatures? A Land Surface Temperature Assessment in a Semi-Arid Mexican City. *Land*, 11(12), Article 12.
<https://doi.org/10.3390/land11122105>
- Baquero Rivadeneira, A. N. (2019). *Análisis del peligro de incendios forestales mediante el uso de Sensores Remotos. Caso de Estudio: Bosques protectores del Distrito Metropolitano de Quito en los años 2015 y 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/15998>
- Blaikie, P., Cannon, T., David, I., & Wisner, B. (1996). El desafío de los desastres y nuestro enfoque. *Julio*, 292.

- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, 33-55. <https://doi.org/10.21138/bage.2058>
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier.
- Briones, F. (2005). *La Complejidad Del Riesgo: Breve Análisis Transversal*. wiac.info. <https://wiac.info/docview>
- Burriel Moreno, J. A., Castro Doria, F. X., Mata Bretón, T., Montserrat Agudé, D., Gabriel De Francisco, E., & Ibàñez Martí, J. J. (2006). La mejora del mapa diario de riesgo de incendio forestal en Cataluña. *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, 2006, ISBN 84-338-3944-6, págs. 651-666, 651-666*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8133178>
- Calán Osejos, S. D. (2022). *Identificación de zonas con susceptibilidad y amenaza a incendios forestales en la Sierra Norte del Ecuador*. [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/27390>
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan-Pérez, J. I., & Pineda-Jaimes, N. B. (2015). Modeling of land use/cover changes: Prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study - Amanalco de Becerra. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 21(2), 203-220. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.049>
- Campos, A. (2009). *Educación en gestión del riesgo de desastres.pdf*. <https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/>
- Cárdenas, P. S. (2013). La problemática de los incendios forestales y bases para su teledetección en el Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.18259/acs.2013017>

- Carranza, J. S. (2017). *Tasa de transformación del habitat en el APFF Cañón del Usumacinta, Tabasco*. [Reporte técnico].
- CENAPRED. (2008). *Incendios Forestales. Serie de fascículos*. 3a edición.
- CENEPRED. (2016). *Lineamientos para Incorporar la Gestión Prospectiva y Gestión Correctiva en los Presupuestos Participativos*. https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Lin-GP-GC-PP.pdf
- CENEPRED. (2018). *Orientaciones para implementar la GP y GC*.
https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Orientaciones
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental* (3a edición). Grupo Planeta (GBS).
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Vilar, L., Martínez-Vega, J., & Padrón, D. (2007). *Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG*.
- Chuvieco, E., Martín, M., Martínez-Fernández, J., & Salas, J. (1998). Geografía e incendios forestales. *Serie Geográfica*, 7, 11-17.
- Chuvieco Salinero, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-182.
- CNPC. (2019). *Incendios Forestales ¿Cómo me preparo?*
<http://www.preparados.cenapred.unam.mx/que-hacer-en-caso-de-incendio>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2022).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (CONANP) (2012). *Estudio Previo Justificativo para modificar el decreto del Área Natural Protegida Parque Nacional Cañón del Sumidero, Chiapas, México*. 56 pp. Más 7 Anexos, en total 102 pp.

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010). *Incendios forestales Guía práctica para comunicadores*. CONAFOR. 3a edición. Zapopan, Jal. México. 56 p.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2015). *Cañón del Sumidero II: expediente de hechos relativo a la petición SEM-11-002* (p. 98).
- CONAF. (2011). *Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales*.
- CONAFOR. (2021). *Adaptación de ecosistemas al fuego*.
https://idefor.cnf.gob.mx/layers/geonode%3Aadaptacion_de_ecosistemas
- CONAFOR. (2022). Estadísticas de Incendios. *Sistema Nacional de Información Forestal*.
<https://snif.cnf.gob.mx/estadisticas-de-incendios/>
- CONANP. (2003). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)*.
<https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1344RIS.pdf>
- CONANP. (2023a). Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226>
- CONANP. (2023b). Programa de Manejo del Fuego. Parque Nacional Cañón del Sumidero.
- Cruz Espíndola, M. A. (2016). *Factores asociados a la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Hidalgo*. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/449>
- Cuesta, J. R., & Giraldo, I. O. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno activa*, 5, 59-67.
- Dentoni, M. del C., & Muñoz, M. M. (2012). *Sistemas de evaluación de peligro de incendios* (Informe técnico 1º). Plan Nacional de Manejo del Fuego. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios y Alerta Temprana. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2009). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007, Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso*

del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

<https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-015-semarnat-sagarpa-2007>

Díaz Romero, M. A. (2011). *Un marco integrado para el control y gestión de incendios forestales*. <http://cd.dgb.uanl.mx//handle/201504211/5247>

Espinoza, V. (2016). Dinámica EGO: Una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis de CCUS. *Boletín del Colegio de Geógrafos del Perú*, 3.

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, Article 25. <https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2484>

FAO. (1996). *Forest Resources Assessment 1990: Survey of Tropical Forest Cover and Study of Change Processes*. FAO Forestry paper no.130.

FAO. (2007). *Manejo del Fuego: Principios y acciones estratégicas. Directrices de carácter voluntario para el manejo del fuego*. <https://www.fao.org/3/j9255s/j9255s.pdf>

FAO. (2009). *El problema de los incendios forestales*. <https://www.fao.org/news/story/es/item/29145/icode/>

FAO. (2019). *Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS). Gestión de los incendios de vegetación*. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/vegetation-fire-management/basic-knowledge/es>

Farfán Gutiérrez, M. (2015). *Escenarios de deforestación (2004-2018) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y su impacto en las áreas potenciales de distribución de*

dos especies de felinos. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/90185>

Farfán Gutiérrez, M., Flamenco Sandoval, A., Rodríguez Padilla, C. R., Rodrigues de Sousa Santos, L., González Gutiérrez, I., Gao, Y., Farfán Gutiérrez, M., Flamenco Sandoval, A., Rodríguez Padilla, C. R., Rodrigues de Sousa Santos, L., González Gutiérrez, I., & Gao, Y. (2020). Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición. *Acta universitaria*, 30. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2953>

Farfán, M., Dominguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I., & Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: A case study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>

Farfán, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J.-F., & Ramírez, I. R. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y Bosques*, 24(3), Article 3. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>

Ferrando, F. J. (2003). En torno a los desastres naturales: Tipología, conceptos y reflexiones. *Revista INVI*, 18(47), 15-31. (s. f.). Recuperado 5 de abril de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/258/25804703.pdf>

Flores, J. G., Benavides, J. de D., Casillas, U. D., Hernández, M. Á. N., & Leal, H. J. (2016). *Manual para la elaboración de mapas de riesgo de incendios forestales*. Libro Técnico. Núm. 1. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. X p.

- Flores, J. G., Benavides, J. de D., Leal, H. J., Vega, D. G., Valdez, C. R., & Casillas, U. D. (2016). *Descripción de variables para definición de Peligro de Incendios Forestales en México*. Núm.3. INIFAPCIRPAC, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. 58 p. México.
- Fresco, L. O., & Kroonenberg, S. B. (1992). Time and spatial scales in ecological sustainability. *Land Use Policy*, 9(3), 155-168. [https://doi.org/10.1016/0264-8377\(92\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0264-8377(92)90040-4)
- Gallegos, A., Hernández, E. A., Leal, H. J., Flores, J. G., Benavides, J. de D., & Casillas, U. D. (2016). *Manual para la elaboración de mapas de riesgo de incendios forestales usando ArcGis 10* (1.ª ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. <https://isbn.cloud/9786073705950/manual-para-la-elaboracion-de-mapas-de-riesgo-de-incendios-forestales-usando-arcgis-10/>
- García, J. G. (2019). *Cartografía y validación de la superficie quemada por incendios forestales (2008, 2014, 2017) en el estado de Guanajuato* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Guanajuato.
- García, N. A. (2018). *Visualizador web de las zonas susceptibles a incendios forestales en el área de protección de flora y fauna nevado de Toluca*. [Tesis de especialidad]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- García, R. A., Pauchard, A., & Peña, E. (2007). Banco de semillas, regeneración y crecimiento de *teline monspessulana* (L.) K. Koch después de un incendio forestal. *Gayana. Botánica*, 64(2). <https://doi.org/10.4067/S0717-66432007000200005>
- Grigera, D., & Pavic, C. (2007). Ensamblajes de aves en un sitio quemado y en un sitio no alterado en un área forestal del noroeste de la Patagonia argentina. *El hornero*, 22(1), 29-37.

- Gutiérrez Urbina, M. A. (2004). *Análisis de susceptibilidad de incendios forestales en la microcuenca Las Marías, León-Chinandega 2004* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria, UNA]. <https://repositorio.una.edu.ni/1052/>
- Hamilton, L. S. (2008). *Forests and Water: A Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hierro, J. L., Clark, K. L., Branch, L. C., & Villarreal, D. (2011). Native herbivore exerts contrasting effects on fire regime and vegetation structure. *Oecologia*, *166*(4), 1121-1129. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-1954-8>
- Ibarra-Montoya, J. L., & Huerta-Martínez, F. M. (2016). Modelado espacial de incendios: Una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Revista Ambiente & Agua*, *11*, 35-49. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1536>
- Ibnousaih, S. (2021). Análisis de incendios forestales a partir de imágenes sentinel en las palmas de gran canaria en agosto de 2019. <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/15192>
- INEGI. (2014). *Sistema de Información Geográfica*.
- Instituto Estatal del Agua. (2013). *Plan de manejo integral de la cuenca cañón del sumidero*. https://issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_manejo_integral_de_la_cuenc
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Carta de Edafología Serie II*.
- Jaafari, A., Gholami, D. M., & Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics*, *39*, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.003>
- Jardel, E. J. (2010). *Planificación del Manejo del Fuego*.
- Jardel, E. J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E., & Morfín-Ríos, J. E. (2014). *Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales*.

- Jiménez González, F. J., & Virgen Montesinos, C. (2008). *Atención al incendio forestal en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, Municipio Chiapa de Corzo, Chiapas*. (Informe final GR005; Número GR005). CONABIO. <https://docplayer.es/22141956-Informe-final-del-proyecto-gr005-atencion-al-incendio-forestal-en-el-parque-nacional-canon-del-sumidero-municipio-chiapa-de-corzo-chiapas.html>
- Julio A., G., & Giroz G., G. (1975). Notas Sobre el Comportamiento del Fuego y su Aplicación en el Control de Incendios Forestales. *Bosque, 1(1)*: -27, 1975.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/31877>
- Kamusoko, C., Aniya, M., Adi, B., & Manjoro, M. (2009). Rural sustainability under threat in Zimbabwe – Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Applied Geography, 29(3)*, 435-447.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.10.002>
- Kelly, P. M., & Adger, W. (2000). Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation. *Climatic Change, 47*.
<https://doi.org/10.1023/A:1005627828199>
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo apuntes hacia una definición. *2001, 4*, 1-22.
- León Rojas, G. I. (2014). *Evaluación de la susceptibilidad a incendios forestales en San Luis Potosí, México, una contribución a la gestión del riego* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].
<https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3839>
- López Alegría, A., Ríos, M. J., Flamenco Sandoval, A., Farfán Gutiérrez, M., López Alegría, A., Ríos, M. J., Flamenco Sandoval, A., & Farfán Gutiérrez, M. (2018). Análisis y modelación espacial de los patrones de deforestación (2005-2025) en la microcuenca La Unión del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Sociedad y ambiente, 18*, 117-143.

- Macias, A. M. (2016). *Validación de áreas prioritarias de riesgo de incendios forestales* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara].
<https://riudg.udg.mx/handle/20.500.12104/84690>
- Manta Nolasco, M. I. (2017). *Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4302>
- Mas, J. F. (2018). Weights of Evidence. En M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J.-F. Mas, & F. Escobar (Eds.), *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 469-471). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_31
- Mas, J., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, 5.
- Mas, J.-F., Soares Filho, B., Pontius, R. G., Farfán Gutiérrez, M., & Rodrigues, H. (2013). A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
- Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2009). *Los efectos de los incendios forestales en los suelos. Síntesis y conclusiones. Nuevos retos en la investigación y en la gestión* (pp. 493-529).
- Méndez Barrera, A. (2019). *Atención de un incendio forestal en el Parque Nacional Cañón del Sumidero de la Región Frontera Sur Istmo y Pacífico Sur, Chiapas* (Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. RR003). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
<http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfRR003.pdf>
- Milanović, S., Kaczmarowski, J., Ciesielski, M., Trailović, Z., Mielcarek, M., Szczygieł, R., Kwiatkowski, M., Bałazy, R., Zasada, M., & Milanović, S. D. (2023). Modeling and Mapping of Forest Fire Occurrence in the Lower Silesian Voivodeship of Poland Based

- on Machine Learning Methods. *Forests*, 14(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/f14010046>
- Moraga Peralta, J. C. (2010). Evaluación del riesgo ante incendios forestales en la Cuenca del Río Tempisque, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(45), Article 45.
- Moscovich, F. A., Ivandic, F., & Besold, L. C. (2014). *Manual de combate de incendios forestales y manejo de fuego. (Nivel Inicial)* [Info:ar-repo/semantics/libro]. Ediciones INTA. <http://repositorio.inta.gob.ar:80/handle/20.500.12123/5780>
- 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, Article 56.
- Myers, R. (2006). *Convivir con el fuego, Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego. Iniciativa Global para el Manejo del Fuego.* (p. 28).
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe.* <https://www.cepal.org/es>
- Nañez, S. J., Frausto, J. M., Velázquez, C. A., Martínez, P., Pulido, J. A., & Martínez, P. L. (2019). *Programa de manejo del fuego. Área de Protección de Recursos Naturales. Zona de protección forestal en los terrenos que se encuentran en los municipios de La Concordia, Ángel Albino Corzo, Villa Flores y Jiquipilas, Chiapas. "La Frailescana"* (p. 92).
- Narvaéz, L., Lavell, A., & Pérez, G. (2009). *La gestión de riesgo de desastres: Un enfoque basado en procesos. Sección 2.* <https://www.eird.org/cd/herramientas-recursos-educacion-gestion-riesgo/pdf/spa/doc17733/doc17733-c.pdf>

- Orlando Villacreses, A. L. (2020). *Zonificación de la susceptibilidad a incendios forestales en el recinto Las Mercedes, comuna Sancán, cantón Jipijapa, Ecuador* [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal del Sur del Sur de Manabí].
<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2060>
- Palacios Silva, R. J., De los Santos Reyes, I., & Velasco Herrera, J. A. (2009). *Determinación del peligro a incendios en el Parque Nacional Cañón del Sumidero con base en el uso de los sistemas de información geográfica*. 3(2), 79-86.
- Parra, Á. del C. (Ed.). (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia* (Primera edición). Universidad Autónoma de Occidente: Red Colombiana de Formación Ambiental: PNUMA.
- Pérez-Verdín, G., Cortés-Ortiz, A., Salmerón-Macías, M., & Márquez-Linares, M. A. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58.
- Periódico Oficial del Estado. (1999). Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del estado de Chiapas.
- Pisanty, I., Urquiza, E., & Vargas-Mena, A. (2016). Instrumentos de conservación in situ en México: Logros y retos. En *Capital Natural de México: Vol. IV* (pp. 245-302).
- Pozo, L. F. (2022). *Determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Cantón Mejía*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Protección Civil Chiapas. (2022). *Programa Estatal para el Manejo Integral de Fuego 2022*.
<https://proteccioncivil.chiapas.gob.mx/programas-especiales/>
- Protección Civil Chiapas. (2023). *Chiapas está preparado para la Temporada de Lluvias y Ciclones Tropicales 2023*. <https://proteccioncivil.chiapas.gob.mx/>

- Ramos, M. (2010). *Manejo del fuego* (Editorial Felix Varela). <https://gfmc.online/wp-content/uploads/Manejo-del-Fuego-Ramos-Rodriguez-Cuba-2010.pdf>
- Ressl, L., & Cruz, I. (2012). *Detección y monitoreo de Incendios forestales mediante imágenes de satélite. 2.*
- Reyes Martínez, C. (2016). *Los patrones de distribución espacial y temporal de los incendios forestales en Almoloya de Juárez (2005- 2015)*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Reyes-Bueno, F., & Balcazar-Gallegos, C. (2021). Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, *11*(1), Article 1. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Rodrigues, H., Britaldo, R., & Filho, B. (2007). *Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais.*
- Rodríguez, M.-A. F. L., Lavell, A., & Metzger, P. (1996). *¿CUÁL ES EL PROBLEMA? INTRODUCCIÓN A LA TEMÁTICA.* 142.
- Rojas, I., J. (2017). *Gestión de riesgo en incendios forestales, localidad sumapaz, bogotá d.c. Análisis para la construcción de estrategias de participación - ACCIÓN.* 142.
- Ruíz, A. M. (2022). *Tasa de transformación de cambio uso de suelo y vegetación del periodo 2009 al 2019 en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, Chiapas* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Sahagún Sánchez, F., Méndez-García, A., Huerta-Martinez, F., & Espinoza-Guzmán, M. (2022). Spatial Modeling of Fire Occurrence Probability in a Protected Area in Western Mexico. *Forestist*, *72*. <https://doi.org/10.5152/forestist.2021.21008>
- Sahagún-Sánchez, F. J., Reyes-Hernández, H., Flores Flores, J. L., & Vargas, L. C. (2011). Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la

- Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography*, 10(2), 65-86. <https://doi.org/10.1353/lag.2011.0029>
- Salazar, D. N. S., Farfán, M., & Arellano, M. A. (2019). Cartografía de la severidad de los incendios forestales (2017, 2018, 2019) en el estado de Guanajuato empleando imágenes Sentinel-2. *Jóvenes en la Ciencia: XXV Verano de la Ciencia UG*. Vol. 5, Num 1 (2019). <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/3587>
- Salcido, A. (2017). *Sustentabilidad Ambiental*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14999.98728>
- Sandoval D., B., Reyes R., T., Oyarzún G., M., Sandoval D., B., Reyes R., T., & Oyarzún G., M. (2019). Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 35(1), 49-57. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482019000100049>
- SEMARNAT. (2016). *El 99% de los incendios forestales son causados por actividades humanas*. <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/el-99-de-los-incendios-forestales-son-causados-por-actividades-humanas>
- Silvestrini, R. A., Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H., & Assunção, R. (2011). Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, 21(5), 1573-1590. <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
- Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. (2016). *Cobertura del suelo Chiapas 2016* [Map]. <https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/samof>
- Soares Filho, B. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. S. (2009). *Modelamiento de dinámica ambiental con Dinamica EGO* (p. 119). <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G., & Lopes Pennachin, C. (2002). *dinamica—A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an*

- Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5)
- Speziale, K. L., Lambertucci, S. A., & Ezcurra, C. (2014). Invasión de *Bromus tectorum* en América del Sur: ¿Patagonia bajo amenaza? *Weed Research*, 54(1), 70-77.
<https://doi.org/10.1111/wre.12047>
- Suryabhadgavan, K., Alemu, M., & Balakrishnan, M. (2016). GIS-Based Multicriteria Decision Analysis Approach for Forest Fire Susceptibility Mapping: A Case Study in Harena Forest, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 57, 33-43.
- Tardón, R. E. A., & Espinoza, P. S. (2017). *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*. 134.
- Tien Bui, D., Bui, Q.-T., Nguyen, Q.-P., Pradhan, B., Nampak, H., & Trinh, P. T. (2017). A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 32-44.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.002>
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra, Suiza. (s. f.).
Recuperado 3 de abril de 2022, de
https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Ursua, N. V., & Cáceres, M. F. (2011). Incendios forestales: Principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo - RIAT*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.4067/riatvol7iss1pp18-24%0718-235X>

- Valencia, J. E. G. (2006). Propuesta metodológica basada en un análisis multicriterio para la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos e inundaciones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13.
- Vicente, F. S. B. (2015). *Emisiones Totales Anuales de CO2 por Incendios Forestales en el Periodo 1999-2010 en México y Estimación de Índice de Riesgo*. 131.
- Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., & Gómez-Albores, M. Á. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803-820.
- Waskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales—IPCC - Buscar con Google*.
<https://www.google.com/>
- Wilches-chaux, G. (1998). *AUGE, CAÍDA Y LEVANTADA DE FELIPE PINILLO*
https://www.google.com/search?q=AUGE%2C+CA%3%8DDA+Y+LEVANTADA+D+E+FELIPE+PINILLO+...&rlz=1C1RLNS_esMX966MX966&sxsrf=APq-
- Yang, J., Healy, H. S., Shifley, S. R., & Gustafson, E. J. (2007). Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*. 53(1): 1-15., 53(1), Article 1. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/19477>
- Zavala, M., Diaz-Sierra, R., Purves, D., Zea, G., & Urbietta, I. (2006). Modelos espacialmente explícitos. *Ecosistemas*, 15.
http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=437&Id_Categoria=1&tipo=po