

Trabajo Fin de Máster

Caracterización de incendios forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna “La Primavera” (Jalisco, México) mediante teledetección y SIG

María Fernanda Aladro Rosillo
Tutora: Nuria De Andrés De Pablo



Máster en Tecnologías de la Información Geográfica

Curso 2023-2024

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Geografía e Historia

Contenido

Resumen	6
Abstract.....	6
Capítulo 1. Introducción.....	7
Objetivos.....	8
Capítulo 2. Antecedentes.....	9
Tipos de incendios forestales.....	9
Clasificaciones de ecosistemas y su relación con el fuego.....	10
Teledetección para el estudio de incendios	11
Índices para análisis de incendios.....	11
Estado del arte	13
Capítulo 3. Área de Estudio.....	16
Historia de la protección del ANP.....	17
Fisiografía, topología y geología.....	19
Suelos	20
Clima	21
Vegetación.....	23
Fauna	26
Especies protegidas.....	26
Tenencia de la tierra: un desafío para el APFFLP.....	26
Incendios en el APFFLP.....	27
Incendios 2018.....	28
Incendios 2019.....	28
Incendios 2020.....	28
Incendios 2021.....	28
Incendios 2022.....	29
Incendios 2023.....	29
Capítulo 4. Metodología.....	30
4.1 Conjunto de datos de entrada.....	30
Imágenes satelitales	30
Cobertura de suelos del estado de Jalisco 2020.....	32
Delimitación del ANP	32

Carta edafológica vectorizada de Jalisco. Unidades de suelo	32
Concentrado Nacional de Polígonos de Incendios Forestales (CNPIF)	33
Zonas de Recuperación Ambiental (ZRA)	33
Zonificaciones del APFFLP	33
Modelos Digitales del Terreno (MDT).....	33
Conjunto de datos vectoriales de información topográfica	33
4.2 Aplicación de índices para la determinación del área quemada	34
NDVI y Δ NDVI.....	34
NBR y Δ NBR	34
BAI y Δ BAI.....	35
GEMI y Δ GEMI	35
4.3 Delimitación del área quemada	36
4.4 Análisis de la severidad de los incendios	39
4.5 Cálculo de la regeneración vegetal.....	40
4.6 Mapa de Pendientes	41
4.7 Solapes de incendios.....	41
4.8 Cambios en la cantidad de edificaciones y vías de comunicación	42
4.9 Temperaturas máximas del aire en los días de inicio de cada incendio	43
4.10 Estado actual de la vegetación del APFFLP.....	43
Capítulo 5. Resultados.....	43
5.1 Delimitaciones de áreas quemadas	43
5.2 Severidad	46
Estimación de severidad mediante Δ NBR.....	46
Estimación de la severidad mediante NDVI	49
5.3 Regeneración vegetal.....	56
Determinación de la regeneración vegetal mediante Δ NBR	56
Determinación de zonas que presentan afectaciones por incendios mediante la comparativa entre NDVI pre y post-incendio.....	58
5.4 Pendientes.....	59
5.5 Identificación de áreas incendiadas en más de una ocasión desde 2012 a 2023	62
5.6 Cambios en la cantidad de edificaciones y vías de comunicación	64
5.7 Temperaturas máximas en los días de inicio de los incendios	71

5.8 Estado actual del APFFLP.....	72
Capítulo 6. Discusión y Conclusiones.....	74
Capítulo 7. Referencias Bibliográficas.....	77
ANEXOS.....	83

Índice de Figuras

Figura 1. Línea de tiempo de incendios estudiados.....	14
Figura 2. Mapa de ubicación del APFFLP.....	17
Figura 3. Climograma APFFLP.....	22
Figura 3.1. Coberturas del suelo en el APFFLP.....	24
Figura 3.2. Localidades en el APFFLP (INEGI, 2019).....	37
Figura 4. Delimitaciones de incendios 1, 2.1, 2.2, y 2.3.....	44
Figura 5. Delimitaciones de incendios 3, 4, 5, y 6.....	45
Figura 6. Delimitaciones de incendios 7.1 y 7.2.....	45
Figura 7. Porcentajes de niveles de severidad (dnBR): todos los incendios (2018-2023) ..	46
Figura 8. Severidad (dnBR), incendio 1.....	47
Figura 9. Severidad (dnBR) incendios 2, 3 y 4.....	48
Figura 10. Severidad (dnBR), incendios 5, 6 , 7.....	48
Figura 11. Actividad fotosintética, incendio 1.....	50
Figura 12. Actividad fotosintética, incendios 2.1 y 2.2.....	51
Figura 13. Actividad fotosintética, incendio 2.3.....	51
Figura 14. Actividad fotosintética, incendio 3.....	52
Figura 15. Actividad fotosintética, incendio 4.....	53
Figura 16. Actividad fotosintética, incendio 5.....	54
Figura 17. Actividad fotosintética, incendio 6.....	54
Figura 18. Actividad fotosintética, incendios 7.....	55
Figura 19. Regeneración vegetal, incendios 1, 2 y 3.....	57
Figura 20. Regeneración vegetal, incendios 4 y 5.....	57
Figura 21. Regeneración vegetal, incendios 6 y 7.....	58
Figura 22. Mapa de pendientes, incendios 6 y 7.....	59
Figura 23. Mapa de pendientes, incendios 1-5.....	60
Figura 24. Solapes de incendios en el APFFLP.....	63
Figura 25. Topología del incendio 1.....	64
Figura 26. Topología del incendio 2.2.....	65
Figura 27. Topología del incendio 7.2.....	66
Figura 28. Topología del incendio 3.....	66
Figura 29. Topología del incendio 6.....	67
Figura 30. Topología del incendio 2.1.....	68
Figura 31. Topología del incendio 2.3.....	69
Figura 32. Topología del incendio 4.....	69

Figura 33. Topología del incendio 5.....	70
--	----

Índice de tablas

Tabla 1. Subcuencas y Regiones hidrológicas a las que pertenece el APFFLP	16
Tabla 2. Edafología en el APFFLP.....	21
Tabla 3. Coberturas en el APFFLP.....	25
Tabla 4. Especies de fauna protegida en el ANP Bosque La Primavera	26
Tabla 5. Superficie anual afectada por incendios forestales en el APFFLP (2018-2022)....	28
Tabla 6. Fechas de imágenes satelitales Sentinel-2 para el cálculo de índices espectrales..	32
Tabla 7. Número de incendios (identificadores)	38
Tabla 8. Umbrales de clasificación para estimación de la severidad de un incendio según Key y Benson (2006)	39
Tabla 9. Umbrales de actividad clorofílica (Chuvienco, 2015).....	40
Tabla 10. Rangos de clasificación de pendientes	41
Tabla 11. Índice M de cada incendio.....	44
Tabla 12. Síntesis de severidad de incendios con Δ NBR.....	49
Tabla 13. Porcentaje del área que sigue afectada por el incendio un año después.....	59

Índice de Anexos

Anexo 1. Zonificación del APFFL	84
Anexo 2. Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI, APFFLP	85
Anexo 3. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 1	86
Anexo 4. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.1	86
Anexo 5. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.2	87
Anexo 6. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.3	87
Anexo 7. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 3	88
Anexo 8. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 4	88
Anexo 9. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 5	89
Anexo 10. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 6	89
Anexo 11. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 7	90
Anexo 12. Solapes de incendios y estado actual de la vegetación en el APFFLP (abril 2024)	91
Anexo 13. Topología del incendio 7.1	92

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Máster se caracterizan los incendios forestales ocurridos en el Bosque La Primavera durante el periodo de 2018 a 2023.

Se estimaron los impactos en la vegetación utilizando técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

A través del análisis de imágenes satelitales de Sentinel-2 y el cálculo de índices espectrales (NDVI, NBR, BAI, GEMI) se delimitaron las áreas quemadas, se evaluó la severidad y se estimó la regeneración de la vegetación post-incendio. Además, se generaron mapas de pendientes y se analizó los cambios en la cantidad de edificaciones y caminos, así como la temperatura máxima alcanzada en los días de inicio de cada incendio.

Los resultados muestran que la mayoría de las áreas incendiadas han experimentado transformaciones significativas en la cobertura vegetal, con altos porcentajes de vegetación reemplazados por suelos desnudos.

A pesar de que la mayoría del Bosque La Primavera parece estar estable para abril del 2024, aún se pueden observar indicios de algunos incendios ocurridos y un decremento de áreas cubiertas con vegetación densa, lo cual resalta la necesidad de implementar acciones de restauración ecológica con el fin de prevenir y detener la erosión del suelo, así como promover la recuperación del ecosistema.

Palabras clave: teledetección, incendios forestales, Bosque La Primavera, México, severidad, regeneración, caracterización, índices espectrales, Sentinel-2.

Abstract

In this Master Thesis, the wildfires that occurred in La Primavera during the period from 2018 to 2023 were characterized.

Impacts on vegetation were estimated using remote sensing techniques and Geographic Information Systems (GIS). By analyzing Sentinel-2 satellite images and calculating spectral indexes (NDVI, NBR, BAI, GEMI) the burned areas were defined, the severity of each wildfire was evaluated as well as the post-fire vegetation regeneration. In addition, slope maps were generated, and the increase of buildings and roads of the affected regions were analyzed, along with the maximum temperature reached on the days on the days of the beginning of each fire.

The results show that most of the burned areas have experienced significant transformations in vegetation cover, with high percentages of vegetation being replaced by bare soils.

Although most of La Primavera appears to be stable by April 2024, there is still evidence of some fires and a decrease in areas covered with dense vegetation, which highlights the need to implement ecological restoration actions to prevent and stop soil erosion, as well as to promote the recovery of the ecosystem.

Key words: remote sensing, wildfires, La Primavera Forest, Mexico, severity, regeneration, characterization, spectral indexes, Sentinel-2.

Capítulo 1. Introducción

En los últimos años, los incendios forestales han incrementado tanto en frecuencia como en la intensidad con la que se presentan. Se prevé que exista un incremento mundial de los incendios forestales extremos de hasta un 30% para finales del año 2050, debido a los efectos que el cambio climático ha generado (ONU, 2022), tales como el aumento de temperaturas y sequías. Esto genera un ciclo de causa-consecuencia al que se le debe prestar atención, ya que los incendios forestales también contribuyen al aumento de los efectos del cambio climático por la emisión de gases de efecto invernadero y el calentamiento de los suelos por la pérdida de vegetación que lo protege.

Existen diversos factores que pueden desempeñar un papel importante en el origen de un incendio forestal, como el clima, la topología de la zona y la vegetación existente. Sin embargo, las actividades antropogénicas son una de las principales causas de los incendios forestales a nivel mundial hoy en día (FAO, 2007).

Aunado a lo anterior, las cifras expuestas en el “Cierre Estadístico 2023”, generado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), indican que en dicho año se registraron más de 7.600 incendios forestales en las 32 entidades federativas que conforman México. Del total de incendios, el 35,83% tiene como posible causalidad la quema intencional.

Jalisco se encuentra entre las entidades con mayor presencia de incendios en dicho año, con un total de 1.483. Asimismo, encabeza la lista de entidades con mayor superficie afectada (194.123,58 ha). De estas cifras, 297 incendios corresponden a aquellos que impactaron en zonas cubiertas con vegetación sensible al fuego. Como se explica en la Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/AGRICULTURA-2023, este tipo de vegetación carece de adaptaciones al fuego, lo cual puede ocasionar efectos severos que afectan negativamente a la regeneración de la vegetación post incendio y a las dinámicas del ecosistema.

En algunos casos, los incendios forestales que ocurren naturalmente pueden aportar beneficios a los bosques y son una parte importante en los procesos de regeneración (SNIARN, 2018). Sin embargo, la frecuencia de los incendios forestales ocurridos en zonas donde antes no se presentaban ha aumentado, al igual que su intensidad (SNIARN, 2018). Esto causa una degradación importante en los ecosistemas, infraestructuras e incluso la pérdida de vidas humanas.

Es importante tener en cuenta que los incendios forestales pueden ser devastadores para las especies silvestres y la vegetación. El Área Natural Protegida (ANP) Bosque La Primavera, la cual es objeto de estudio en el presente Trabajo Fin de Máster (TFM), está catalogada como Área de Protección de Flora y Fauna. Además de ser una zona natural clave para la

conservación y el estudio de especies, el Bosque La Primavera es fundamental para el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), una de las más importantes en México, ya que esta ANP ofrece diversos servicios ecosistémicos entre los cuales se encuentran la captación de agua, la captura de carbono y mejora de la calidad del aire.

En el año 2022, la ONU publicó un comunicado de prensa donde da a conocer que lo ideal sería que los gobiernos invirtieran un mayor porcentaje del presupuesto destinado a temas relacionados con incendios a la planificación y prevención de los mismos. Sin embargo, actualmente la reacción inmediata ante los incendios forestales generalmente absorbe más del 50% del presupuesto asignado, y la planificación apenas recibe menos del 1%. Así que es indispensable fortalecer los instrumentos de prevención de incendios con el fin de evitar que las especies protegidas que habitan el bosque corran el riesgo de acercarse a la extinción, y que disminuyan los servicios ambientales que ofrece esta ANP.

El uso de las Tecnologías de Información Geográfica es indispensable para generar datos que ayuden a gestionar, no solamente el Bosque La Primavera, sino todas las distintas áreas naturales, incluidos los parques urbanos, ya que las zonas que abarcan superficies extensas no pueden ser recorridas en su totalidad en periodos cortos, lo cual dificulta la generación de información. Sin embargo, este tipo de tecnologías aportan una visión panorámica, e incluso global que facilita la obtención de información.

La teledetección es una de las técnicas más útiles para alcanzar dicho objetivo.

Como mencionan Viedma y Chuvieco (1994), la teledetección ha demostrado ser muy valiosa para el estudio y prevención de desastres naturales. En el caso de los incendios, esta permite realizar un análisis anterior y posterior al incidente, por lo que es posible llevar a cabo un seguimiento detallado de sus efectos, así como de la evolución de la zona afectada, lo que permite identificar las áreas con una mayor incidencia y llevar a cabo acciones preventivas.

Esta técnica presenta algunas ventajas sobre los análisis espaciales basados en fotografías aéreas, ya que las imágenes satelitales utilizadas en teledetección tienen una naturaleza multispectral que permite obtener datos del espectro no visible como el infrarrojo medio, térmico y las microondas (Viedma y Chuvieco, 1994).

Otra ventaja es la resolución temporal y la accesibilidad a este tipo de insumos, ya que no es posible obtener fotografías aéreas en intervalos cortos de tiempo sin que represente un costo monetario muy elevado. En cambio, las imágenes satelitales permiten realizar comparaciones de la misma zona en lapsos de tiempo reducidos. Además existen diversos proveedores que ofrecen este tipo de recursos de forma gratuita.

Objetivos

El objetivo general del presente TFM es caracterizar los distintos incendios ocurridos en el ANP Bosque La Primavera en un periodo de 5 años (2018-2023) y estimar los impactos que

estos han tenido en la vegetación a lo largo del tiempo mediante la aplicación de técnicas de teledetección, utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2, y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Objetivos específicos:

- Delimitar las zonas del Bosque La Primavera afectadas por los grandes incendios forestales (mayores de 500 ha) mediante el cálculo de diferentes índices espectrales.
- Determinar la severidad de dichos incendios mediante técnicas de teledetección.
- Estimar la regeneración de vegetación en las áreas afectadas.
- Detectar las características de cada uno de los incendios ocurridos, así como las similitudes que pudiera haber entre ellos.
- Comparar las delimitaciones calculadas con la cartografía del Concentrado Nacional de Polígonos de Incendios Forestales (CNPIF) proporcionada por la CONAFOR.
- Identificar los cambios existentes de presencia de edificaciones y vías de comunicación desde 1995 a 2019 en cada una de las zonas quemadas.
- Localizar áreas que han sido afectadas por incendios en más de una ocasión y relacionarlas con valores de regeneración vegetal.
- Identificar las relaciones existentes entre la severidad de incendios y la intensidad de las pendientes del terreno.
- Identificar las relaciones que pudiera haber entre las temperaturas máximas alcanzadas en cada uno de los días de inicio de los incendios y las características de los mismos.
- Analizar la situación actual de toda el ANP

Capítulo 2. Antecedentes

Tipos de incendios forestales

No todos los incendios forestales son iguales, ya que pueden generar distintos niveles de impacto en los ecosistemas. La diferencia entre este tipo de fenómenos radica principalmente en la frecuencia e intensidad con la que se presenta un incendio forestal, así como la extensión del área a la que afecta.

Los efectos del fuego en un ecosistema dependerán del nivel de severidad del incendio (Jakubauskas et al., 1990). Comúnmente, existe una relación entre la severidad presentada y la capacidad que tendrá la vegetación para recuperarse (Flores-Rodríguez, 2021). Si el incendio tuvo una severidad alta o muy alta, normalmente los resultados muestran que el ecosistema presentará niveles bajos de recuperación. Cuando los niveles de recuperación no son altos, surgen impactos secundarios en el medio natural, mejor conocidos como “efectos de segundo orden”. Estos pueden ser: la erosión de suelos, cambios en la dinámica del ecosistema, aumento de temperaturas, modificación del clima, desertificación, etc.

Aunado a lo anterior, la CONAFOR (2010) indicó que existen tres tipos de incendios forestales dependiendo de los elementos del ecosistema a los que afectan:

1. Si el fuego consume únicamente los combustibles vivos o muertos que se encontraban sobre el suelo, se considera superficial. Este tipo de incendios se propagan de manera horizontal sobre la superficie alcanzando hasta un metro y medio de altura.
2. Los incendios subterráneos son aquellos que dañan las raíces y el mantillo existente bajo la superficie del suelo. También son capaces de afectar a los afloramientos rocosos. Debido a que no se propagan sobre la superficie, éstos no producen llamas.
3. Por último están los incendios de copa o aéreos, los cuales se propagan de manera vertical, alcanzando las copas de los árboles. Estos incendios son los más destructivos y peligrosos, ya que consumen a la vegetación en su totalidad.

Clasificaciones de ecosistemas y su relación con el fuego

Asimismo, en el 2010 la CONAFOR contemplaba sólo tres clasificaciones de ecosistemas dependiendo de la evolución que presentan en presencia del fuego. Sin embargo, en el Programa de Manejo del Fuego 2020-2024 publicado en el 2021, se agrega otra categoría. En dicho Programa, la CONAFOR (2021) cita a Hardesty (2005) indicando que las cuatro clasificaciones de los ecosistemas con respecto al fuego son: ecosistemas adaptados al fuego (mantenidos por el fuego), sensibles al fuego, independientes al fuego y los influidos por el fuego.

El primer tipo de ecosistemas se refiere a aquellos que necesitan el fuego para persistir, se regeneran bien sobre sitios quemados y la vegetación cuenta con corteza gruesa, aislante, que protege al bosque de las temperaturas del fuego (SNIF, 2021).

El segundo tipo se caracteriza por su vegetación que no requiere del fuego para mantenerse. Cuando hay presencia de incendios, suelen ser devastadores, debido a que las especies vegetales no cuentan con adaptaciones al fuego.

Aquellos ecosistemas independientes del fuego son demasiado fríos o húmedos o secos, así que el fuego no cumple un papel fundamental. Los desiertos y la tundra son un ejemplo de éstos.

Por último, los ecosistemas influidos por el fuego son áreas que actúan como límites o conexiones entre los tres tipos de ecosistemas anteriormente mencionados (SNIF, 2021).

Estas clasificaciones se deben tomar en cuenta al momento de desarrollar planes de prevención, control y manejo de incendios forestales, ya que es fundamental para determinar áreas prioritarias, así como elegir acciones adecuadas de restauración.

Teledetección para el estudio de incendios

La Teledetección es una técnica para adquirir datos mediante sensores que recolectan información sobre los flujos de energía emitidos y reflejados por las superficies terrestres.

Se le llama “espectro electromagnético” al conjunto de todas las frecuencias de ondas posibles en las que se produce un flujo saliente de energía de una fuente natural o artificial. Estas se dividen desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio (Ordóñez, 2012). La interacción electromagnética entre las superficies y los sensores es diferente según el tipo de cubierta que esté reflejando la radiación, y esta, dependiendo de la longitud de onda del espectro electromagnético, es recogida por las distintas bandas que conforman los sensores. Esta radiación emitida por cada cubierta se conoce como firma espectral, la cual es utilizada para realizar diversos análisis como la clasificación de coberturas y usos de la tierra. (Flores-Garnica, et al., 2021).

Para la caracterización de zonas donde han ocurrido incendios es fundamental analizar los comportamientos espectrales del área tanto antes como después del incidente, ya que las cubiertas vegetales están definidas por la alta absorción de la energía producida por la ceniza y el carbón en la región del visible (espectro de los colores: rojo, azul y verde, RGB por sus siglas en inglés) y en el infrarrojo cercano. Además, tienen características que las diferencian de otro tipo de cubiertas, ya que presentan valores muy bajos de reflectividad en el espectro electromagnético perteneciente al infrarrojo medio (Martín y Chuvieco, 1998).

De acuerdo con Flores-Garnica, et al. (2021), las imágenes satelitales con resolución espacial de entre 15 a 30 metros son adecuadas para definir áreas quemadas. Asimismo, mencionan que existen estudios en España y Argentina que sugieren que la manera más adecuada para determinar el nivel de severidad de incendios forestales es mediante el uso de imágenes del satélite Sentinel-2.

La información obtenida en cada una de las bandas de los satélites se emplea para calcular múltiples índices espectrales con el fin de resaltar cambios en la superficie terrestre y las transformaciones que estas pueden sufrir con el paso del tiempo (Fornacca et al., 2018)

Índices para análisis de incendios

Los índices espectrales se pueden dividir en dos categorías:

- Monotemporales
- Bitemporales

Los índices monotemporales son aquellos calculados a partir de una sola imagen satelital. Por otro lado, los índices bitemporales requieren del uso de dos imágenes satelitales, capturadas en momentos distintos, para su cálculo.

Para delimitar un área quemada y estimar la regeneración de la vegetación, así como los niveles de severidad de un incendio, primero se deben calcular índices monotemporales, que posteriormente se utilizarán para calcular los bitemporales, con el fin de estimar los cambios existentes en las condiciones de la zona afectada.

Los índices que se eligen para realizar un análisis de incendios dependen de las características de la zona que se evaluará, aunque, en la literatura científica los más utilizados son los siguientes:

- NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada (Rouse, et al., 1973)
- NBR = Relación de quemado normalizada (Hunt y Rock, 1989)
- BAI = Índice de área de quemado (Martín, 1998)
- GEMI = Índice de monitoreo ambiental global (Pint y Verstraete, 1992)
- Δ NBR = Diferencia normalizada de relación de quemado (Key y Benson, 2006)

El NDVI, en el caso de este tipo de análisis, es utilizado para estimar la regeneración que la vegetación ha tenido después de un incendio. Este ha sido utilizado por autores como López García (2020), y España-Boquera, et al. (2024), e incluso por diversas instituciones no gubernamentales y gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET), ya que este índice permite dar un seguimiento a la vegetación y funciona como un descriptor de variaciones en la misma (Sobrino, 2000).

En el año 1998, este índice fue utilizado por Martín y Chuvieco con el fin de generar cartografía de grandes incendios forestales (mayores de 500 hectáreas), ya que una disminución abrupta en el valor del NDVI señala una pérdida significativa en la cobertura vegetal, revelando claramente el impacto del fuego en este índice.

El NDVI aplicado a bosques de encino y pino ha demostrado buenos resultados en el seguimiento temporal mediante imágenes de satélite (Van Leeuwen, et al., 2010). La frecuencia con la que es utilizado se debe a su sencillez matemática y de interpretación (Sobrino, 2000).

Para estimar el impacto de un incendio no es suficiente con determinar la actividad fotosintética de la vegetación, ya que no todas las especies vegetales tienen la misma respuesta espectral. Asimismo, la fecha de captura de la imagen satelital también puede influir en los datos recopilados de la vegetación, debido a los distintos eventos fenológicos que ocurren durante el año. Por lo tanto, es fundamental analizar la severidad del incendio y no solamente el NDVI (Keeley, 2009). Para este propósito, se utilizan índices como el NBR, el Δ NBR, el GEMI y el BAI.

El NBR fue desarrollado por Hunt y Rock en el año 1989. Este tiene la intención de calcular la severidad de un incendio empleando las bandas correspondientes al infrarrojo cercano y al infrarrojo de onda corta (Navazo, 2016). Desde entonces se ha utilizado en numerosos estudios sobre incendios, tanto para delimitar el área quemada, como para determinar la severidad del fenómeno y las áreas más afectadas (ej: Manzo Delgado, 2013; López García, 2020; Navazo, et al., 2016; Flores-Rodríguez, et al. 2022; España-Boquera, et al., 2024; Arteaga & Cornejo, 2021; entre otros). En los estudios mencionados se ha concluido que este índice es adecuado para analizar incendios. Sin embargo, también hacen hincapié en que elementos como las nubes, cuerpos de agua y rocas deben tomarse en cuenta para evitar una confusión de estos con áreas quemadas.

Estos índices se han utilizado para analizar los incendios ocurridos a través del tiempo en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP). Por ejemplo, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (2021) menciona al NBR, Δ NBR, NDVI y al BAI como algunos de los índices espectrales útiles para determinar áreas quemadas, evaluar la severidad de un incendio y la regeneración de la vegetación tras incendios ocurridos en la Sierra de Quila, la Sierra de Tapalpa y el Bosque La Primavera.

Asimismo, Flores-Rodríguez, et al. (2022) utilizaron los mismos índices para determinar el impacto del fuego en el Bosque La Primavera y la regeneración que tuvo la vegetación después del incendio ocurrido entre los meses de abril y marzo en el año 2018. Cabe mencionar que en este estudio, los autores concluyeron que el índice asociado con la predicción de la regeneración fue el BAI. Asimismo, estos índices espectrales fueron complementados con datos obtenidos en campo sobre profundidad de quemado, cantidad de combustibles, grosor de corteza, entre otros.

Estado del arte

Se han realizado diversos estudios sobre los incendios que han tenido lugar en esta ANP. Estos varían dependiendo de los objetivos de cada publicación. Algunos de ellos son solamente estudios con muestras recolectadas en campo. Otros únicamente estiman la severidad de un incendio mediante técnicas de teledetección. También hay estudios donde se analizan múltiples incendios para la creación de herramientas de predicción de incendios.

De igual forma, Jardel Peláez et al., (2021), a través de la SEMADET, publicó el reporte técnico donde se redacta la evaluación preliminar sobre el incendio ocurrido en el paraje Las Canoas en el año 2021.

En la figura 1 se muestra una línea de tiempo de los incendios forestales ocurridos en el APFFLP y algunas de las publicaciones en las que han sido sujetos de estudio.

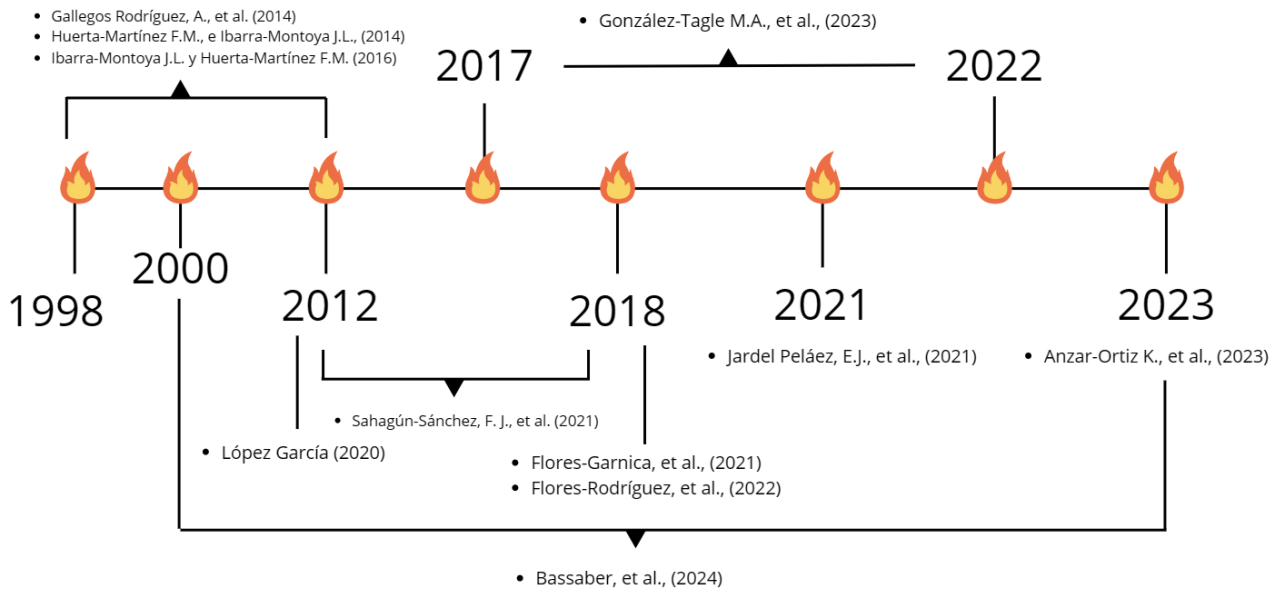


Figura 1. Línea de tiempo de incendios estudiados

Mediante técnicas de geoprocésamiento, Gallegos Rodríguez et al. (2014), fueron capaces de determinar clases de recurrencia de incendios utilizando información vectorial con el fin de localizar sitios de muestreo. Posteriormente, realizaron un análisis espaciotemporal de los incendios ocurridos entre 1998 y 2012, concluyendo que algunas de las especies en el APFFLP son resistentes a los incendios superficiales, por lo que hasta el año 2012, la vegetación presentaba un alto nivel de regeneración. Para el mismo periodo, Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014) generaron un total de 12 mapas con el fin de identificar áreas incendiadas en el APFFLP mediante información proporcionada por el Organismo Público Descentralizado (OPD) "Bosque La Primavera" y la capa vectorial de cambios en las coberturas de vegetación en el periodo de 1998 a 2012 a una escala de 1:250 000. Los resultados del análisis mostraron que para el año 2012 la extensión total afectada fue de 7.744 ha; la tasa anual de pérdida de masa forestal alcanzó el 1,31 %, lo que equivale a un cambio de 92.347 ha anuales.

Además, los mismos autores, dos años después realizaron una herramienta predictiva de incendios para el APFFLP. Se tomaron en cuenta cuatro tipos de variables: combustibles, meteorológicas, de paisaje, así como antropológicas, y realizaron procesos como cálculo de pendientes e interpolaciones. Sin embargo en este estudio no se utilizaron técnicas de teledetección.

Para delimitar el área quemada en el incendio ocurrido en el año 2012, López García (2020) empleó imágenes Landsat 7, las cuales también fueron de utilidad para estimar la regeneración vegetal mediante el cálculo de índices espectrales como el NDVI, NBR y Δ NBR. Resultando en que una gran parte de la superficie afectada fuera catalogada con niveles de severidad baja y media, los cuales representaron el 88% del área total dañada.

También se concluyó que las herramientas de SIG y las técnicas de percepción remota fueron imprescindibles para realizar el estudio.

Un año más tarde, Flores-Garnica, et al. (2021) estimó la severidad del mismo incendio utilizando imágenes de Landsat 8, las cuales se emplearon para generar el cálculo del ΔNBR que fue clasificado mediante los rangos establecidos por Athanasakis et al. (2017).

Como resultado se obtuvo un área quemada de 2.740 hectáreas, de las cuales 1.395 hectáreas se clasificaron como severidad baja, mientras que solo 0,90 ha presentaron una severidad muy alta. De igual manera, Flores-Rodríguez, et al., (2022) llevaron a cabo un estudio para estimar la correlación entre variables obtenidas en campo y los índices espectrales calculados con imágenes de Landsat 8 (OLI), en relación con la regeneración natural de pino, basándose en tres categorías de severidad, las cuales fueron estimadas con los índices: NDVI, NBR, BAI, ΔNBR , $R\Delta\text{NBR}$, RI y NRI, resultando en que las variables mayormente correlacionadas fueron aquellas relacionadas con la cobertura del suelo forestal y con características de las afectaciones al arbolado por el fuego.

Aunado a lo anterior, se concluyó que los modelos estadísticos generados sobreestimaron los niveles de regeneración en las áreas de incendio extremo.

Sahagún-Sánchez, et al. (2021) también utilizaron el incendio ocurrido en el 2018, además de los que tuvieron lugar en los seis años anteriores, con el fin de calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios en el APFFLP. En los resultados se puede notar que en el área más cercana al AMG, hay una probabilidad muy alta de que sigan ocurriendo incendios. A pesar de haber utilizado SIG, no se llevaron a cabo cálculos de índices espectrales, ya que las clases de severidad de baja a moderada predominan: un 88% en 2021 y un promedio del 76% en los incendios de los años 2005, 2012 y 2017.

En la publicación de la SEMADET, escrita por Jardel Peláez, et al. (2021) se utilizó el índice espectral ΔNBR para estimar la severidad del incendio “Las Canoas-Nejahuete-Pedernal” ocurrido en el año 2021, con lo cual se llegó a la conclusión que este mostró un patrón similar al de los incendios anteriores.

Para los incendios ocurridos en el periodo de 2017 a 2022, González-Tagle, et al. (2023) calcularon los índices NBR y ΔNBR utilizando imágenes de Sentinel- 2A, con el fin de estimar la severidad de los incendios. La clasificación se llevó a cabo mediante los criterios establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Se puede observar que los incendios ocurrían durante la temporada en primavera con menos lluvia. También es notorio que concluyeron que existe un patrón de incremento en los incendios a partir del año 1979, no solamente en Jalisco, sino en Durango.

Por último, Anzar-Ortiz K., et al. (2023) llevaron a cabo un análisis de componentes principales con el software ArcGIS Pro tomando en cuenta diversas variables, entre las cuales

se encuentran los valores de NVDI y NDMI (Índice de diferencia de humedad normalizado), calculados con imágenes de Sentinel-2. Asimismo, se calculó el Δ NBR para estimar niveles de severidad en el área afectada en el año 2021. Se tuvo como resultado que la zona afectada obtuvo, en su mayoría, severidad baja, de acuerdo con la clasificación del USGS.

Capítulo 3. Área de Estudio

El APFFLP coloquialmente conocida como Bosque La Primavera, es una de las Áreas Naturales Protegidas federales ubicadas en la región Occidente y Pacífico Centro de México. Esta ANP pertenece a la entidad federativa de Jalisco, y se encuentra aledaña al Área Metropolitana de Guadalajara (AMG).

Actualmente el APFFLP cuenta con un área de aproximadamente 30.500 hectáreas que se localizan al oeste del AMG y abarcan los municipios de Zapopan, Tala, y Tlajomulco de Zúñiga. Además, el ANP interseca con cuatro subcuencas hidrográficas, tres cuencas y dos regiones hidrográficas (tabla 1 y figura 2).

El área de estudio es una de las zonas naturales más importantes para el AMG, ya que algunos de los servicios ambientales que ofrece son la captación, filtración, transporte y saneamiento tanto de aguas superficiales como subterráneas; regulación del clima, al igual que la composición química de la atmósfera; y funciona como hábitat para diversas especies de flora y fauna.

Subcuenca hidrográfica	Cuenca hidrográfica	Región hidrográfica
Río Salado (RH14Ab)	Presa de La Vega – Cocula (RH14A)	RH 14: Ameca
Laguna de San Marcos (RH12Dc)	Lago de Chapala (RH12D)	RH 12: Lerma-Santiago
Río Corona - Río Verde (RH12Eb)	Río Santiago - Guadalajara (RH12E)	
Río Verde - Presa Santa Rosa (RH12Ec)		

Fuente: Elaborada con información de la Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición: 2.0, 2010, de INEGI

Tabla 1. Subcuencas y Regiones hidrológicas a las que pertenece el APFFLP

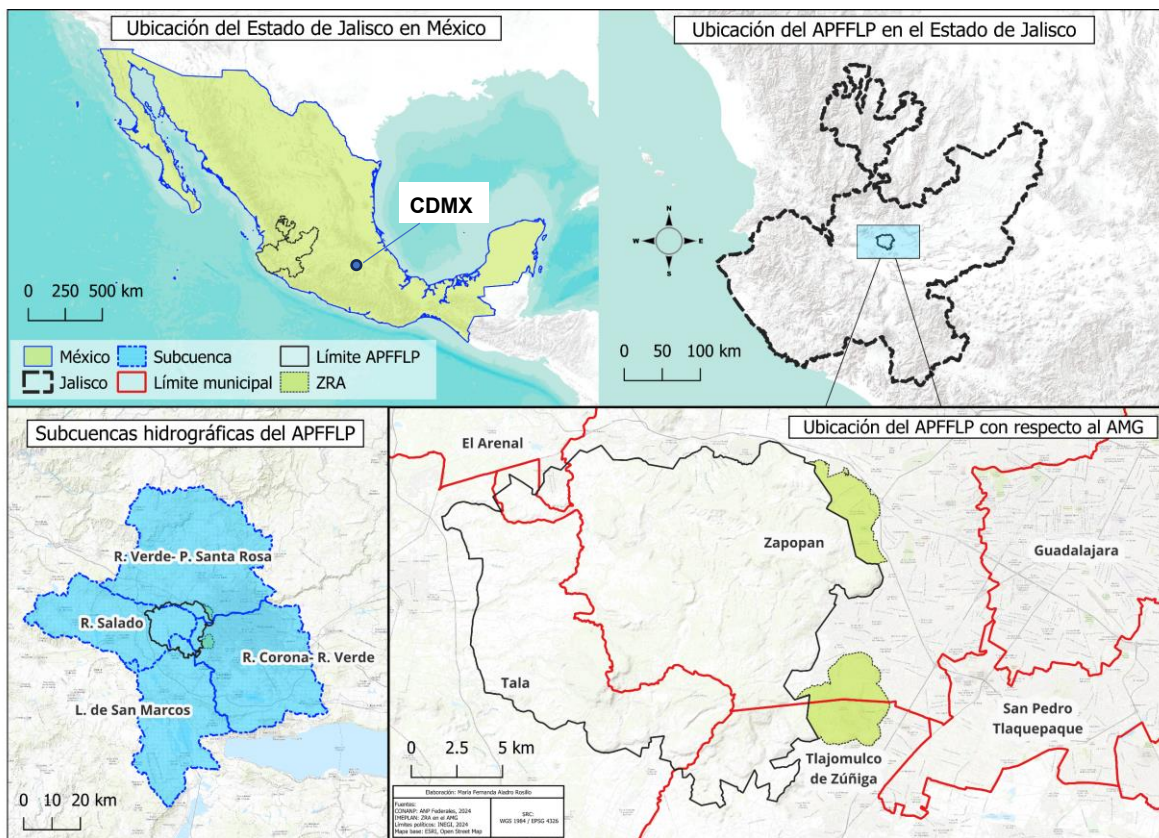


Figura 2. Mapa de ubicación del APFFLP

Historia de la protección del ANP

El primer intento de protección del Bosque La Primavera ocurrió en el año 1934 cuando se publicó el decreto oficial donde se le asignaba la categoría de manejo “Zona de protección forestal” la cual alcanzaba una superficie de 10.000 km² (CONANP, 2000).

Posteriormente, en el año 1963, la Comisión Forestal del Estado de Jalisco estableció una coordinación para llevar a cabo un proyecto que pretendía crear un Parque Estatal dentro de La Primavera. Este tipo de categorización tiene el propósito de conservar y proteger zonas naturales y al mismo tiempo ofrecer actividades al aire libre como senderismo, camping y educación ambiental.

En 1972, el Bosque La Primavera vuelve a tener modificaciones en el tipo de protección con el que contaba. El gobernador de Jalisco, el 14 de octubre de dicho año, decretó el área como Zona de Reserva Urbana.

Un año más tarde, fue revocado el mandamiento del Gobierno del Estado del 3 de noviembre de 1967, el cual denegaba la ampliación de terrenos ejidales, resultando en la entrega de 1.103 ha de pastizales de alta calidad al ejido Lic. Adolfo López Mateos (CONANP, 2000).

En marzo de 1980, a petición de las autoridades municipales de Guadalajara, Tlaquepaque, Zapopan, Tala, Tlajomulco y Ameca del Estado de Jalisco, así como de la Comisión Forestal, el Bosque La Primavera se decreta como Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna

Silvestre. En este año se protegen 30.500 ha de propiedad particular pertenecientes a los municipios de Jalisco anteriormente mencionados.

En dicho decreto se estableció la obligación de los gobiernos tanto federal como estatal de conservar los recursos forestales y las especies de flora y fauna silvestre de La Primavera.

Esto surgió, principalmente, para evitar procesos erosivos de los suelos y la sobreexplotación de los recursos naturales, así como de mantener y regular el régimen hidrológico de dicha zona.

Asimismo, se indicó que las autoridades correspondientes, haciendo énfasis en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, debían promover la cooperación entre las instituciones gubernamentales y los propietarios de los terrenos que quedaron dentro de los límites del área protegida, con el fin de ejecutar reforestaciones y acciones de protección de los recursos naturales.

Seis meses después, el 25 de septiembre de 1980, el Estado de Jalisco consiguió 5.290 ha mediante un contrato de donación. De esta superficie, se entregaron 672 ha al Instituto de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara y en el año 1992 se estableció el Centro de Ecología en el Bosque La Primavera, con el fin de ofrecer servicios de educación ambiental.

En los años siguientes existieron cambios y actualizaciones en materia legal, como la publicación en 1988 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Por lo que, para actualizar la categoría de protección de la zona acorde con la legislación vigente, en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 7 de junio del año 2000, el Bosque La Primavera se recategorizó como Área de Protección de Flora y Fauna, dándole como nombre oficial actual, “Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera" (APFFLP)”. En diciembre del mismo año se publicó el Programa de Manejo de esta ANP donde se delimitan zonificaciones con el fin de establecer regulaciones específicas en cada una de ellas.

Dichas zonificaciones se dividen en siete: aprovechamiento especial (448,9 ha), aprovechamiento sustentable de agroecosistemas (1.989,3 ha), aprovechamiento sustentable de recursos naturales (645,9 ha), protección (4.062,5 ha), recuperación (7.114,5 ha), uso público (1.523,6 ha) y uso restringido (14.715,3 ha) (anexo 1).

Cabe mencionar que el problema en común entre las siete zonificaciones es la presión para el cambio de uso de suelo, especialmente para pastoreo, asentamientos humanos y zonas de siembra (CONANP, 2000). De igual manera, llama la atención que en la zona de recuperación, al igual que en las zonas de aprovechamiento sustentable de recursos naturales y en las de protección, uno de los mayores retos para la conservación del bosque son los incendios provocados por las actividades agrícolas.

Por último, en el año 2006, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) categorizó al APFFLP como Reserva de la Biósfera y la designó al Programa sobre el Hombre y la Biosfera (MaB por sus siglas en inglés), con el fin

de crear una mejora en las relación de las personas con su entorno natural, promoviendo la investigación científica y la capacitación en gestión de los recursos naturales.

Fisiografía, topología y geología

El área de estudio se encuentra ubicada entre las provincias fisiográficas: Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre Occidental. El primero es caracterizado por ser una gran masa de manifestaciones riolíticas que fueron acumuladas desde hace 35 millones de años, y ahora forman una línea que atraviesa casi todo México por la parte central. Entre los volcanes que forman parte de este Eje se encuentran el Popocatépetl y el Iztaccíhuatl (INEGI, 1992).

La segunda provincia fisiográfica mencionada es la cadena montañosa más extensa de México, conformada por barrancas profundas y dos secuencias ígneas significativas. La más antigua formada por rocas volcánicas y la más reciente por ignimbritas riolíticas y riodacíticas (INEGI, 1983).

El APFFLP presenta un rango altitudinal de 1.400 a 2.200 metros sobre el nivel del mar. En la parte sur se encuentran las máximas elevaciones del terreno: el Cerro Las Planillas y el Cerro San Miguel (CONANP, 2000).

Aunado a lo anterior, el área de estudio cuenta con 20 domos y estructuras. La más antigua es el Cerro El Tepopote, seguido del Cerro Alto y la Mesa del Neiahuete. Las estructuras más recientes son el Cerro El Tajo, ubicado en la zona del sureste del APFFLP, y el Cerro del Colli, ubicado al este y aledaño a la Zona de Recuperación Ambiental “El Bajío” (Dye, 2012). Además, aproximadamente el 30% del ANP tiene pendientes superiores a los 25°, y en algunas zonas las pendientes pueden ser mayores a los 50°, lo cual es importante recalcar, ya que si el terreno cuenta con pendientes muy pronunciadas, el fuego avanza rápidamente, lo que conlleva a un aumento en la peligrosidad y propagación de este (Carmo, 2011). De igual manera, este tipo de terrenos crean dificultades para los equipos de combate de incendios, ya que no se puede acceder fácilmente a las zonas que están siendo afectadas para parar o controlar el incidente.

Geológicamente, el Bosque La Primavera sobresale en la provincia del Eje Neovolcánico por las exhibiciones de rocas riolíticas que presenta, ya que son las más actuales y complejas de dicha provincia fisiográfica (CONANP, 2000). Asimismo, los cuatro tipos de riolitas que se encuentran en el APFFLP son flujos de lava, piedra pómez, flujos de obsidiana y la toba tala (Dye, 2012). Además, cuenta con relieves como cerros, montañas, domos y mesetas, que presentan influencia de procesos erosivos fluviales y de movimientos de las placas tectónicas (CONANP, 2000).

Cabe mencionar que el APFFLP tiene gran relevancia geológica. Hace 95.000 años hubo una explosión volcánica que arrojó al aire alrededor de 20 km³ de roca volcánica y cenizas. La cantidad de material fue tan grande, que dio paso a la formación de una caldera de 11 km de diámetro que posteriormente se inundó (Dye, 2012).

En este lago, actualmente extinto, se crearon sedimentos de piedra pómez, provenientes del rompimiento de cúpulas previamente formadas, aparentemente, por un volcán submarino, dando paso a la creación de una capa de piedra pómez de una gran extensión, que, de acuerdo con Dye (2012), es una formación rara en el mundo. Esto fue posible debido al proceso de surgimiento de nueve estructuras, entre las cuales se encontraban el cerro La Lobera y El Chapulín (Dye, 2012).

Veinte mil años después se produjeron nuevas erupciones que crearon obsidianas y las cúpulas y flujos El Pedernal, La Cuesta y El Culebrado. Cabe mencionar que Dye (2012) también menciona que los yacimientos de obsidiana en Jalisco son tan extensos que ocupan el tercer lugar a nivel mundial.

Actualmente se pueden observar múltiples estructuras primarias típicas de edificios volcánicos jóvenes como morfología y cráteres (CONANP, 2000). Como consecuencia de la actividad volcánica que tuvo el Bosque La Primavera, aún cuenta con gran actividad hidrotermal y presencia de suelos calientes.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2000), la unidad litológica más característica de la zona, es la toba Tala. Ésta es conformada mayormente por fragmentos de pómez y en menor proporción por pequeños líticos de andesita originados durante las primeras erupciones que conformaron a la Sierra la Primavera, así que el APFFLP se compone por rocas ígneas extrusivas ácidas: toba (46%), pómez (34%), riolita (10%), obsidiana (8%) y andesita basáltica (2%).

Una de las características más importantes de la Toba Tala es su alta permeabilidad que permite que el agua se infiltre rápidamente, recargando los acuíferos de la zona (CONANP, 2000).

Suelos

De acuerdo con el conjunto de datos edafológicos del estado de Jalisco, la mayor parte del APFFLP está conformada por suelos de tipo regosol de textura gruesa, poco evolucionados y caracterizados por sus colores claros, así como su poca profundidad. Estos se localizan comúnmente en las regiones montañosas o áridas de México, y constituyen el grupo de suelos con mayor extensión y variabilidad del país (INEGI, 2011).

El área de estudio también se conforma por suelos con texturas medias o gruesas de tipo feozem, luvisol y fluvisol. Como suelos secundarios se pueden encontrar litosoles, resultantes de procesos erosivos (CONANP, 2000) y cambisoles. En la tabla 2 se muestran los datos pertenecientes al APFFLP obtenidos de la capa vectorial “puntos de verificación.shp” del conjunto vectorial edafológico de Jalisco, a escala 1:50 000.

Clave del suelo	Suelo predominante (Unidad)	Subunidad	Clase textural	Suelo secundario	Área (ha)	% área
Hh+Re/2	Feozem	háplico	Media	Regosol éútrico	1.931,15	6,31
Hh+I/2	Feozem	háplico	Media	Litosol	400,28	1,31
Hh+Re/1	Feozem	háplico	Gruesa	Regosol éútrico	210,14	0,69
Hh/2	Feozem	háplico	Media	Ninguno	77,61	0,25
Hh/1	Feozem	háplico	Gruesa	Ninguno	19,56	0,06
Je/1	Fluvisol	éútrico	Gruesa	Ninguno	127,98	0,42
Je+Re/1	Fluvisol	éútrico	Gruesa	Regosol éútrico	39,06	0,13
Lc+Bf/2	Luvisol	crómico	Media	Cambisol ferrálico	58,66	0,19
Lc+Lf/3	Luvisol	crómico	Fina	Luvisol ferrico	9,72	0,03
Re/1	Regosol	éútrico	Gruesa	Ninguno	24.795,47	81,08
Re+Hh/1	Regosol	éútrico	Gruesa	Feozem háplico	1.278,31	4,18
Re+Be+To/1	Regosol	éútrico	Gruesa	Cambisol éútrico	1.246,26	4,08
Re+Hh/2	Regosol	éútrico	Media	Feozem háplico	357,17	1,17
Re+I/2	Regosol	éútrico	Media	Litosol	31,65	0,1

Fuente: IIEG, SEMADET. (2018). Conjunto vectorial edafológico de Jalisco, 1:50 000

Tabla 2. Edafología en el APFFLP

Es importante resaltar que los regosoles son suelos que contienen una capa conocida como “ócrica”. Si se elimina la vegetación que protege al suelo, la superficie se vuelve dura y costrosa, por lo que la infiltración de agua al subsuelo es prácticamente imposible. Esto dificulta el debido desarrollo de las especies vegetales, generando impactos secundarios negativos como la erosión hídrica, ya que el suelo queda expuesto a la acción erosiva de las lluvias torrenciales (SEMARNAT, 2002). Esta es una de las razones por las cuales es relevante prevenir incendios que conduzcan a la pérdida de vegetación en el APFFLP, y en caso de ocurrir, saber qué tanto fueron afectados con el fin de llevar a cabo rápidamente las acciones de protección de suelos correspondientes.

Clima

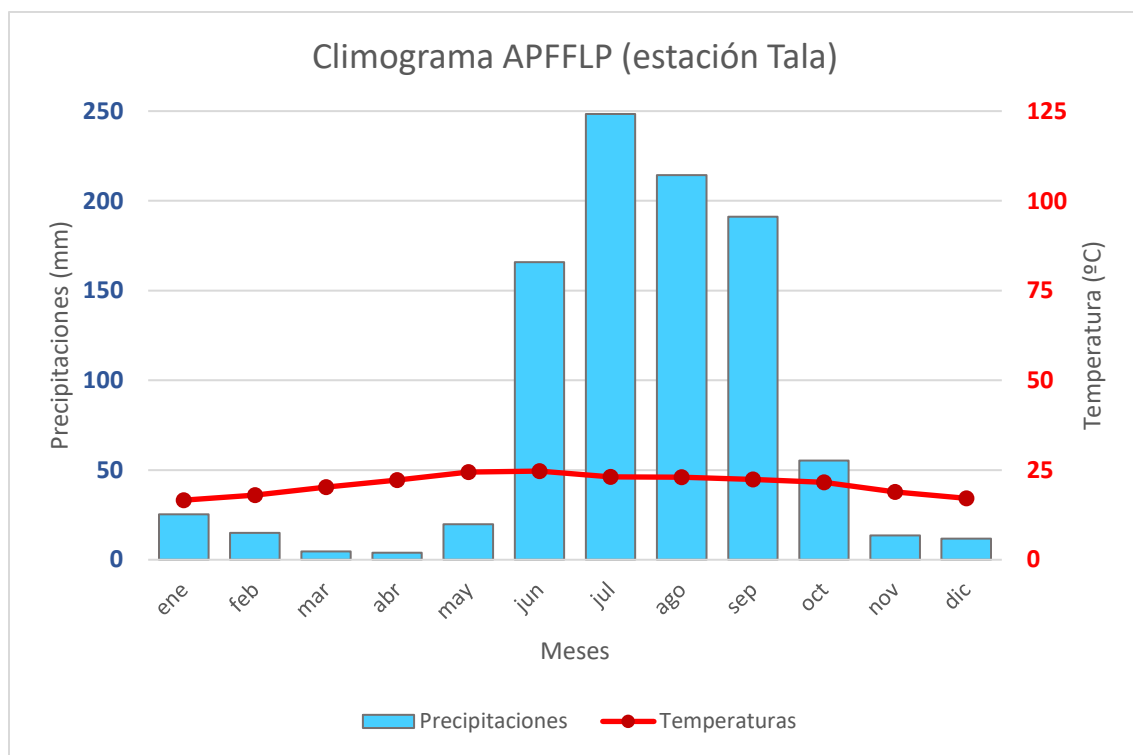
En el Programa de Manejo del APFFLP, la CONANP (2020) expone que el área natural tiene dos tipos de climas dominantes: templado subhúmedo, y semicálido subhúmedo.

De acuerdo con los datos de la serie climática del periodo del año 1991 al 2020 recogidos por la estación meteorológica de Tala, la temperatura anual media en el APFFLP es de 21°C.

Además, mayo y junio son los meses que presentan los valores más altos de temperatura media, alcanzando casi los 25°C.

Las precipitaciones en la zona alcanzan entre los 800 y 1.000 mm anuales y se concentran principalmente en los meses de julio, agosto y septiembre. Sólo un 5% de las lluvias ocurren en los meses más fríos. Además, cabe mencionar que el periodo más seco es entre marzo y abril. Asimismo, el 77% de las precipitaciones pueden calificarse como de tipo erosivo, debido a su alta intensidad (CONANP, 2000). Además, de acuerdo con la CONANP (2000), la humedad media anual es del 63% donde los días con menor porcentaje de nubes se presentan, en su mayoría, entre los meses de octubre a mayo.

Con los datos estadísticos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de la estación climatológica “Tala” con clave 14351, se realizó el climograma presentado en la figura 3.



Climograma representativo del área de estudio correspondiente a los datos de la serie climática 1991-2020 de la estación Tala (n°14351) proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de CONAGUA.

Figura 3. Climograma APFFLP

Vegetación

De acuerdo con la información proporcionada en el archivo vectorial de Usos de Suelo y Vegetación de la serie VII del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), el ANP cuenta con los siguientes tipos de vegetación: bosque de pino-encino, bosque de encino-pino, bosque de encino, bosque de pino, y pastizal inducido (anexo 2) Asimismo, conforme a lo expuesto en el Programa de Manejo (CONANP, 2000), el APFFLP contiene tres comunidades vegetales: riparia, rupícola y ruderal, las cuales crecen dentro de los tipos de vegetación previamente mencionados.

El bosque de encino del ANP está formado en su mayoría por las especies de *Quercus castanea*, *Q. resinosa* y *Q. magnoliifolia*. Asimismo, el bosque de pino está compuesto principalmente por las especies de *Pinus oocarpa*, *P. douglasiana*, *P. devoniana*, *P. lumholtzii* y *P. luzmariae*.(CONANP, 2000).

De acuerdo con la CONANP (2000), la flora del APFFLP representa un caso notable, especialmente por la gran variedad de orquídeas terrestres que se pueden encontrar dentro del bosque.

La Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) publicó en el año 2020 las coberturas del suelo para el Estado de Jalisco, mismas que se presentan en la tabla 3 para el APFFLP.

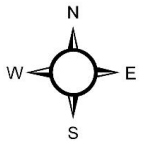
El tipo de cobertura predominante es el bosque de encino-galería, por lo que es importante señalar que este tipo de ecosistemas están clasificados como “adaptados al fuego” o “mantenidos por el fuego”. El segundo tipo de cobertura con mayor extensión en el ANP es el bosque de coníferas. La sumatoria de ambas coberturas da un total de 27.556,05 ha, las cuales representan alrededor del 90% de la superficie del APFFLP (figura 3.1).

Además presenta algunas especies pirófitas como los pinos. Este tipo de vegetación es resistente al fuego, ya que puede soportar un incendio o tiene la capacidad de revivir después de este (CENAPRED, 2021). Además, las semillas de estas especies germinan en respuesta a las señales generadas por el fuego (Gil-López, M., et al., 2014).

Algunos ecosistemas pueden sufrir impactos negativos si pasan periodos largos de tiempo en los cuales no hay presencia de fuego. Sin embargo, los incendios frecuentes pueden generar una pérdida de biodiversidad faunística y vegetal. Por ejemplo, debido a los incendios frecuentes en el APFFLP, ésta ha sido sometida a diversos estudios para estimar el estado de salud de la vegetación, resultando en que Flores-Garnica, et al. (2020) concluyeran que en el Bosque La Primavera existe una regeneración exitosa en las zonas con presencia de *Pinus oocarpa* después de haber sufrido afectaciones por incendios. Sin embargo, no ha habido un avance significativo en el desarrollo de los individuos de pino que fueron estudiados.

COBERTURAS DE SUELO DEL APFFFLP

- Agua
- Bosque Cultivado e Inducido
- Bosque de Coníferas
- Bosque de Encino-Galería
- Selva Baja Caducifolia Subcaducifolia
- Pastizales Cultivados e Inducidos
- Pastizales Naturales
- Tierras Agrícolas
- Suelo Desnudo
- Urbano y Construido
- Límite del APFFFLP
- Zona de recuperación ambiental



0 1 2 3 4 km

SRC: WGS 84 / EPSG: 4326

Fuente:
Coberturas del suelo, SEMADET, 2020

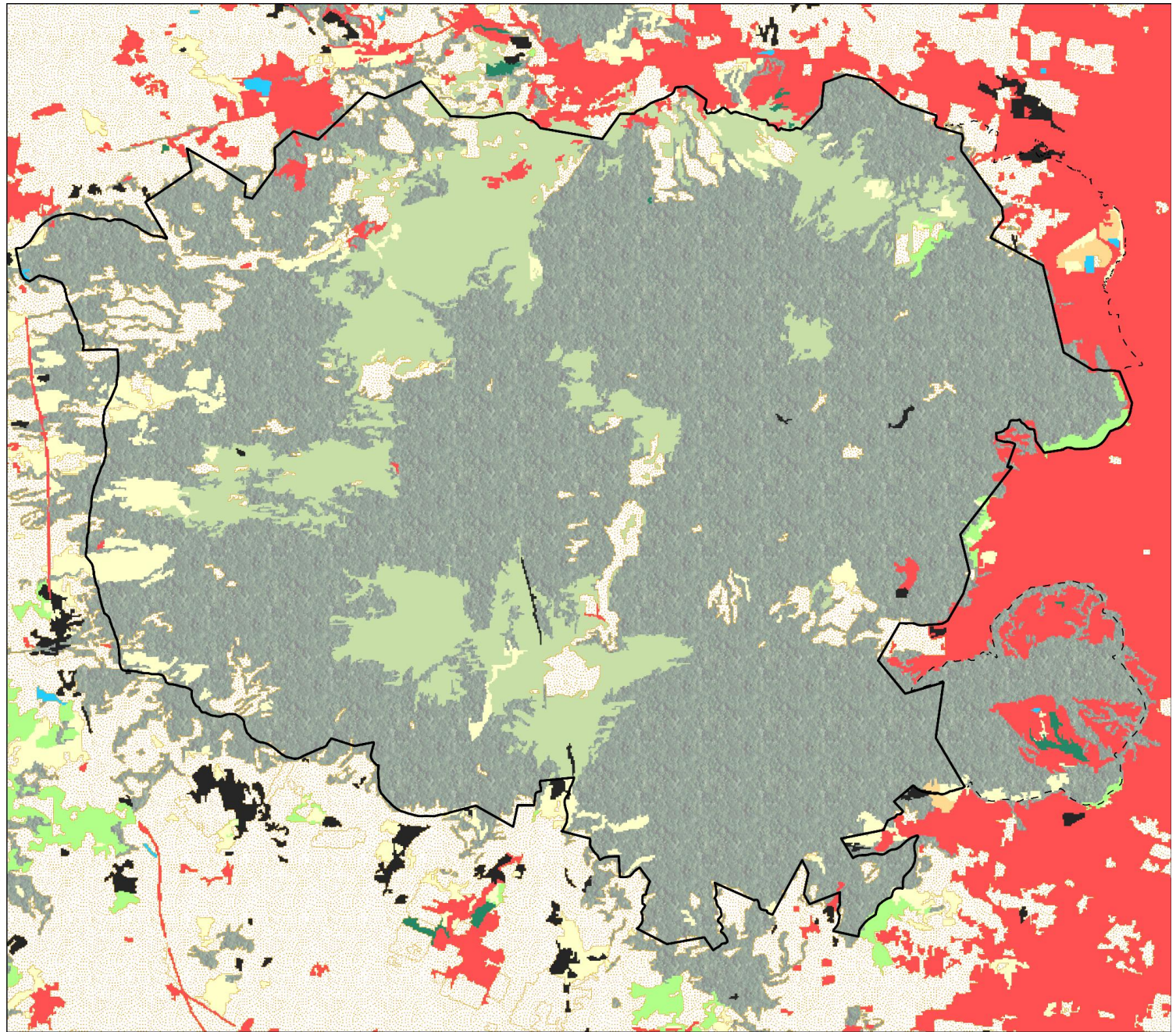


Figura 3.1. Coberturas del suelo en el APFFFLP

Cobertura. Clasificación SAMOF	Clave INEGI	Descripción de la clave SAMOF	Área (ha)	%
Bosque cultivado e inducido	BC	Bosque cultivado	1,09	< 1%
	BI	Bosque inducido		
Bosque de Coníferas	BP	Bosque de pino	4.754,65	15,5%
	BPQ	Bosque de pino-encino		
	BJ	Bosque de táscate		
	MK	Bosque de mezquite		
Bosque de Encino-Galería	BQ	Bosque de encino	22.801,4	74,5%
	BQP	Bosque de encino-pino		
	BG	Bosque de galería		
Pastizales Cultivados e Inducidos			801,42	2,6%
Pastizales Naturales	PN	Pastizal natural	6,75	< 1%
	PY	Pastizal gipsófilo		
	PH	Pastizal halófilo		
	VW	Pradera de alta montana		
	VS	Sabana		
	VSI	Sabanoide		
Selva Baja Caducifolia Subcaducifolia	SBC	Selva baja caducifolia	92,62	< 1%
	SBK	Selva baja espinosa caducifolia		
	SBS	Selva baja subcaducifolia		
	MST	Matorral sarco-crasicaule de neblina		
	VPI	Palmar inducido		
Suelo Desnudo			37,65	< 1%
Tierras Agrícolas – Cultivos Perennes	T	Agricultura de temporal	0,13	< 1%
	R	Agricultura de riego		
	H	Agricultura de humedad		
	TA, TAP, TAS	Agricultura de temporal anual, permanente y semipermanente		
	RSP	Agricultura de riego semipermanente y permanente		
Urbano y Construido	ZU	Zona urbana	192,98	< 1%
	AH	Asentamientos humanos		
Agua	H2O	Cuerpo de agua	2,38	< 1%
	ACUI	Acuícola		

Fuente: Elaboración propia con bases en: "CONAFOR – SEMADET. (2020). Mapa de Cobertura del Suelo del Estado de Jalisco al año base 2020 [Vector]. Escala 1:75,000. Versión 1.3.", y la Guía para la interpretación de cartografía Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, INEGI

Tabla 3. Coberturas en el APFFLP

Fauna

Una de las principales funciones del APFFLP es ser hábitat de múltiples especies de fauna, de las cuales 7 son especies de peces, 20 de anfibios, 49 especies de reptiles, 200 de aves y 59 especies de mamíferos. ((OPD) Bosque La Primavera, 2022).

Cabe mencionar que la fauna representativa que resguarda el ANP son “jaguarundi, leoncillo (*Puma yagouaroundi*), cacomixtle (*Bassariscus astutus*), puma (*Puma concolor*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), comadreja (*Mustela frenata*), coyote (*Canis latrans*), zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), y el lince (*Lynx rufus*)” (CONANP, 2000).

Especies protegidas

Dentro del APFFLP existen múltiples especies que se encuentran en el listado de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Esta NOM determina las distintas especificaciones de protección a especies dependiendo de su categoría.

Las especies de fauna que habitan el APPFLP catalogadas como Especie Protegida y que además son endémicas del Occidente de México son las siguientes:

Nombre común	Nombre científico	Categoría de protección
Iguana negra	<i>Ctenosaura pectinata</i>	Amenazada
Lagartija cola azul	<i>Eumeces dugesi</i>	Sujeta a protección especial
Codorniz cotuí	<i>Colinus virginianus</i>	En peligro de extinción
Reyezuelo de rojo de Guadalupe	<i>Regulus calendula</i>	En peligro de extinción
Mulato azul de las tres Marías, Mulato común de Islas Marías	<i>Melanotis caerulescens</i>	Amenazada
Cacomixtle	<i>Bassariscus astutus</i>	Amenazada

Fuente: elaboración propia con datos del Programa de Manejo del APFFLP y la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010

Tabla 4. Especies de fauna protegida en el ANP Bosque La Primavera

Tenencia de la tierra: un desafío para el APFFLP

La CONANP señaló en el año 2000 que la tenencia de la tierra del ANP se dividía en tres, siendo 50% de la superficie propiedad privada, el 35% propiedad ejidal y solamente el 15% era propiedad del gobierno del Estado. Sin embargo, de acuerdo con un artículo publicado en 2021 por Rodríguez Toral, estas cifras han cambiado, ya que, en el año 2019, el Organismo Público Descentralizado que se encarga del manejo y gestión del APFFLP acudió a un particular para realizar un estudio de la zona en el que se dio a conocer que el 23,8% de la superficie es propiedad ejidal, 57,4% propiedad privada y 18,7% es estatal.

Este cambio se debe a que varios ejidatarios decidieron vender sus tierras a fraccionarios, por lo que la urbanización dentro de La Primavera es un problema actual, como indica Chávez, A. et al. (2014): “El proceso inmobiliario se ha revelado como la mayor amenaza al cambio

de uso del suelo, esto tiene una doble consecuencia, incremento en la presión sobre las fuentes de abastecimiento y la eliminación de grandes superficies para la infiltración y la recarga.”

Tanto en las zonas aledañas como dentro del Bosque la Primavera, se encuentran núcleos agrarios que presentan agricultura de temporal anual o pastizales inducidos. Estos, al igual que los fraccionarios, han ejercido cierta presión sobre el ANP.

Estos cultivos que rodean el APFFLP son sometidos anualmente a prácticas de roza, tumba y quema. Este es un sistema que consiste principalmente en generar incendios dentro de una parcela con el fin de remover la vegetación residual después de una cosecha para dar a la tierra un periodo de descanso hasta que vuelva a ser temporada de siembra. Sin embargo, esta técnica que incluye el uso de fuego es una de las principales causas de los incendios forestales (SEMARNAT, 2002), y el Bosque La Primavera desafortunadamente no es la excepción.

Aunado a lo anterior, en el año 2014 se aprobó la Reforma Energética, con lo cual desapareció la prohibición de realizar obras de exploración y explotación geotérmica en Áreas Naturales Protegidas. Consecuentemente, la Secretaría de Energía (SENER) otorgó cinco títulos de concesión de exploración y explotación geotérmica, con una vigencia de 30 años, a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con el fin de reiniciar obras de la planta de geotermia “Las Planillas” (Pérez, 2016) la cual abarca un total de 6.000 ha. Este proyecto comenzó en 1980 en la zona de Cerritos Colorados y el Cerro Las Planillas, y fue abandonado diez años después debido a los graves impactos ambientales irreversibles causados a la flora, suelos y mantos freáticos (CONANP, 2000).

La reactivación del proyecto ha tenido pausas, y la construcción del mismo no ha sido finalizada, debido a problemas presupuestales. Sin embargo, al ubicarse en el centro del ANP, los efectos negativos del proyecto son inevitables.

Incendios en el APFFLP

El APFFLP ha sufrido diversos incendios a lo largo de los años; la mayoría de ellos son atribuibles a actividades antrópicas. Como se menciona en el Programa de Manejo del APFFLP, desde 1940 hasta diciembre de 2000, el APFFLP ha experimentado un promedio de 5 incendios por año. Los incendios registrados en los años 1984, 1987, 1995 y 1998 fueron especialmente críticos debido a la extensión de tierra afectada y a su intensidad.

Sin embargo, este promedio ha incrementado notablemente. En el periodo del año 2018 al 2022 el promedio fue de 35 incendios por año. (CONAFOR, 2022)

En la tabla 5 se expone información del Conjunto Nacional de Polígonos de Incendios Forestales (CNPIF) publicado por la CONAFOR, para el periodo de 2018 a 2023. Cabe mencionar que entre las causas de estos incendios se encuentran las actividades ilícitas, actividades agrícolas, quema de basura y vandalismo.

Únicamente 2 incendios en este periodo han ocurrido por causas naturales.

Año	Número de incendios	Total de área afectada (ha)
2018	25	2.778,29
2019	32	2.599,9
2020	27	28,83
2021	51	9.895,28
2022	44	311,64
2023	95	2.310,585

Fuente: elaboración propia con datos del CNPIF de CONAFOR para el periodo de 2018 a 2023

Tabla 5. Superficie anual afectada por incendios forestales en el APFFLP (2018-2022)

Incendios 2018

El día 10 de abril del 2018 comenzó un gran incendio forestal que, según los datos en la capa vectorial del CNPIF de la CONAFOR, afectó a un total de 2.691,97 hectáreas en el predio San Miguel perteneciente al municipio de Tala. El fenómeno tuvo una duración de 3 días y la causa registrada fue “actividades agrícolas”, específicamente “quema para desmontar”.

Además del mencionado incendio, ocurrieron otros 23 durante el año 2018. No obstante, ninguno de ellos afectó una extensión superior a 11 hectáreas. Cerca de la mitad de estos incendios (10) fueron provocados por fumadores, mientras que otros 10 fueron el resultado de quemaduras intencionales.

Incendios 2019

Una superficie de 2,600 ha del APFFLP se vio afectada por un total de 32 incendios, de los cuales dos abarcaron un área mayor a 500 hectáreas.

El incendio de mayor magnitud impactó una superficie total de 1.535,82 ha, de las cuales 988 ha se localizaron dentro del Área Natural Protegida (ANP) y el resto ocurrió en la Zona de Recuperación Ambiental Cerro del Tajo, ubicada en el sureste del APFFLP.

La causa, al igual que el gran incendio forestal del 10 de abril del 2018, fue una quema para desmontar que se inició el 12 de abril y duró 2 días.

Un mes después comenzó otro incendio forestal, esta vez en el predio Las Mesitas, que afectó a una superficie de 674,65 ha, y fue provocado por fumadores.

Incendios 2020

El 2020 fue el primer año desde el 2016 que no hubo presencia de un gran incendio forestal. Sin embargo, hubo incendios, que aunque individualmente no abarcaron áreas mayores a 6 hectáreas, afectaron un total de 28,83 ha.

Incendios 2021

En el año 2021 se presentaron 3 grandes incendios forestales.

El incendio del paraje Canoas fue el primero en ocurrir. Tuvo una duración de seis días, ya que inició el día 31 de marzo, y fue sofocado hasta el día 06 de abril, y afectó un total de 4.872,8 ha de acuerdo con el CNPIF, aunque en el reporte técnico publicado por la SEMADET se calcularon 4.926 ha (16% de la superficie del área protegida).

De acuerdo con dicho reporte técnico, de los incendios registrados entre 1988 al 12 de abril del 2021, este incendio ocupa el cuarto lugar con mayor extensión. Asimismo, se describe que las emisiones de humo provocaron una situación de contingencia ambiental en la zona metropolitana adyacente de Guadalajara (Jardel Peláez et al., 2021). Además, en el CNPIF se expone que este incendio fue causado por actividades ilícitas.

El segundo incendio se desarrolló en el predio Volcanes entre las fechas 13 de abril y 16 del mismo mes, y afectó un total de 2.092,26 ha, de las cuales 1.931,17 ha pertenecen al APFFLP de acuerdo con los datos de la CONAFOR. De igual manera, se indica que este incendio fue causado por actividades ilícitas.

Por último, el incendio que afectó al predio Cajetes, tuvo una duración de cuatro días, desde el 6 al 10 de mayo, e impactó un total de 2.696,47 ha, según datos de CONAFOR. El gobierno de Jalisco publicó un comunicado donde se explica que “el incendio inició por causas naturales al caer un rayo en la copa de un árbol.” y que, a diferencia de lo expuesto en el CNPIF, el área de afectación abarcó 2.873,5 ha. Cabe mencionar que este incendio colinda con el ocurrido en el predio Las Canoas.

Incendios 2022

Durante este año no hubo registro de grandes incendios forestales. No obstante, en el predio Bajío de Milpillas se produjo un incendio que afectó un total de 210,45 ha, el cual fue ocasionado por actividades ilícitas.

Incendios 2023

Los dos incendios que superaron una extensión de 500 ha se ubicaron en el municipio de Tala. El primero ocurrió el día 22 de febrero y se pudo sofocar dos días después. Abarcó un total de 573,97 ha. Además fue causado de manera intencional, y de acuerdo con el CNPIF, este incendio tuvo un impacto mínimo en el bosque de encino.

El segundo incendio fue el de mayor área en el año, ya que 800 ha fueron afectadas, de las cuales 738,39 ha pertenecen al APFFLP. Este incendio comenzó el 24 de abril y se extinguió al día siguiente.

Aunado a lo anterior, de los 95 que tuvieron lugar en este año, 75 ocurrieron por causas intencionales (2.249,20 ha), 12 por causas desconocidas (48,84 ha), 5 por actividades agrícolas (11,84 ha), 2 por quema de basura (0,46 ha) y únicamente uno por otro tipo de actividades (0,25 ha) las cuales no se especificaron en el CNPIF.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Conjunto de datos de entrada

Para el presente análisis se emplearon diferentes fuentes de datos que fueron utilizados para realizar geoprocesos en el software ArcGIS Pro 3.2.2 de ESRI, así como en Qgis 3.28.7.

La extensión de las capas de información geográfica se acotó a la delimitación del APFFLP, y las Zonas de Recuperación Ambiental aledañas.

Cabe mencionar que se utilizó el sistemas de referencia de coordenadas (SRC) geográficas WGS 1984 para crear la cartografía de los resultados. Sin embargo, para realizar los geoprocesos correspondientes se empleó el SRC proyectadas WGS 1984 UTM Zona 13N.

Imágenes satelitales

Sentinel-2 son dos satélites idénticos nombrados Sentinel-2A y Sentinel 2B, los cuales fueron lanzados en los años 2015 y 2017 respectivamente, por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés).

Estos satélites tienen la capacidad de capturar imágenes multiespectrales compuestas por 13 bandas espectrales que cuentan con resoluciones de 10m en el rango del visible e infrarrojo cercano, 20m en las bandas de “red-edge” y del infrarrojo de onda corta, y 60m en 3 bandas de corrección atmosférica (ESA, 2017).

Desde el explorador EO Browser se obtuvieron 16 imágenes de este satélite, correspondientes al periodo de 2017 a 2024. De cada imagen se descargaron las bandas espectrales 4, 8 y 12, para poder realizar los cálculos de índices necesarios. Previamente se delimitó un área de estudio en el explorador que abarcaba el ANP y las zonas de recuperación ambiental aledañas al APFFLP. Al hacer esto, EO Browser permite la descarga de cada banda en alta resolución, de lo contrario las imágenes son descargables únicamente con una resolución espacial de 30 metros por píxel. Asimismo, la información en cada píxel de las imágenes se trata de los valores de la reflectancia en la superficie, es decir, contienen correcciones atmosféricas.

Las características de las imágenes obtenidas son las siguientes:

- Resolución espacial: 10m/px
- Resolución radiométrica: 32 Bit float
- Resolución temporal: 5 días
- Nivel procesamiento de datos: 2A
- Formato: .TIFF
- SRC : WGS 1984 UTM Zona 13Norte
- Longitud de onda de la banda 4 : 0.665 μm (Sobrino, et al., 2022)
- Longitud de onda de la banda 8 : 0.842 μm (Sobrino, et al., 2022)
- Longitud de onda de la banda 12 : 2.190 μm (Sobrino, et al., 2022)

Estos archivos TIFF se eligieron considerando los parámetros propuestos por Key y Benson (2006), quienes especifican que las imágenes pre y post incendio deben ser capturadas durante los mismos periodos fenológicos.

Primero se seleccionaron aquellas que fueran capturadas en el día más cercano posterior a la fecha de sofoque de cada incendio. En segundo lugar, se eligieron imágenes de aproximadamente un año antes y de un año después (tabla 6).

Como segundo criterio de selección, se tomó en cuenta que ninguna de las imágenes presentara nubes sobre el APFFLP. Es por lo anterior que para el primer incendio ocurrido en 2018 no se eligió una imagen capturada en abril del 2017, sino una de junio.

Los nombres de las imágenes Sentinel-2 utilizadas son los siguientes:

- 2017-06-02-00_00_2017-06-02-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2018-04-08-00_00_2018-04-08-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2018-04-13-00_00_2018-04-13-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2018-05-18-00_00_2018-05-18-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2019-04-08-00_00_2019-04-08-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2019-04-18-00_00_2019-04-18-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2019-05-08-00_00_2019-05-08-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2019-05-18-00_00_2019-05-18-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2020-04-07-00_00_2020-04-07-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2020-04-17-00_00_2020-04-17-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2020-05-12-00_00_2020-05-12-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2021-03-28-00_00_2021-03-28-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2021-04-07-00_00_2021-04-07-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2021-04-17-00_00_2021-04-17-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2021-05-02-00_00_2021-05-02-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2021-05-17-00_00_2021-05-17-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2022-04-02-00_00_2022-04-02-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2022-05-17-00_00_2022-05-17-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2023-04-02-00_00_2023-04-02-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2023-04-27-00_00_2023-04-27-23_59_Sentinel-2_L2A
- 2024-04-21-00_00_2024-04-21-23_59_Sentinel-2_L2A

Delimitación del incendio y severidad		Regeneración de la vegetación	
1 año antes del incendio	Justo después del incendio	Justo antes del incendio	1 año después del incendio
2 junio 2017	13 abril 2018	8 de abril de 2018	18 abril 2019
8 abril 2018	18 abril 2019 (3 incendios)	8 de abril de 2019	7 abril 2020
18 mayo 2018	18 mayo 2019	8 de mayo de 2019	12 mayo 2020
7 abril 2020	7 abril 2021	28 de marzo de 2021	2 abril 2022
17 abril 2020	17 abril 2021	7 de abril de 2021	2 abril 2022

Delimitación del incendio y severidad		Regeneración de la vegetación	
1 año antes del incendio	Justo después del incendio	Justo antes del incendio	1 año después del incendio
12 mayo 2020	17 mayo 2021	2 de mayo de 2021	17 mayo 2022
2 abril 2022	27 abril 2023 (2 incendios)	2 de abril de 2023	21 abril 2024

Tabla 6. Fechas de imágenes satelitales Sentinel-2 para el cálculo de índices espectrales

Cobertura de suelos del estado de Jalisco 2020

La autoría de la capa vectorial corresponde a la SEMADET y es proporcionada en formato GeoPackage (.gpkg), dentro del cual se encuentra un shapefile que contiene 22 clasificaciones de coberturas. Esta tiene una escala de 1:75 000, con una superficie mínima de 1ha y sus unidades están en metros.

Los datos corresponden al año 2020. Sin embargo, la capa terminó de ser editada en agosto del 2022 y su proyección cartográfica original es la siguiente: México ITRF2008/Cónica Conforme de Lambert (6372 Authority: EPSG).

Delimitación del ANP

El mapa “Áreas Naturales Protegidas Federales de México, enero 2024” se obtuvo desde el geoportal GAIA perteneciente a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La autoría pertenece a la CONANP. El archivo contiene un total de 225 polígonos, los cuales están georreferenciados con el SRC: WGS 1984 / EPSG 4326.

Contiene información sobre la superficie terrestre y marítima de cada ANP, su categoría de manejo, la fecha de decreto, si pertenece o no al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), la región de CONANP de la que es parte, así como las entidades federativas y municipios a los que pertenece.

Su propósito principal es dar a conocer los datos anteriores con el fin de proveer material para el desarrollo de proyectos de investigación y restauración; educación ambiental, así como para la toma de decisiones en planeación urbanística y de ordenamiento del territorio (CONANP, 2024).

Carta edafológica vectorizada de Jalisco. Unidades de suelo

Este archivo vectorial es realizado por el Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IEEG) y se creó en el año 2015 utilizando como referencia la carta edafológica del año 1973 del INEGI y técnicas de procesamiento digital de imágenes y automatización de vectorizaciones en SIG, así como de digitalización.

La escala de los datos es 1:50 000 y están georreferenciados con el SRC: WGS 1984 UTM Zona 13Norte.

Concentrado Nacional de Polígonos de Incendios Forestales (CNPIF)

Se descargaron las capas vectoriales correspondientes a las delimitaciones de los incendios ocurridos en el periodo de 2012 a 2023, con el fin de contar con los polígonos de los incidentes que abarcaron un área menor a 500 ha, y poder comparar las delimitaciones de los grandes incendios con las realizadas para el presente TFM.

Se utilizaron diversos recursos para su elaboración, entre los cuales se encuentran imágenes de Sentinel-2 y Landsat 8.

Todos los archivos pertenecen al Concentrado Nacional de Polígonos de Incendios Forestales (CNPIF) creado por la CONAFOR en conjunto con los Centros regionales del Manejo del Fuego existentes en el país y fueron georreferenciados con el SRC: WGS 1984 / EPSG 4326.

Zonas de Recuperación Ambiental (ZRA)

Se obtuvo la capa poligonal de ZRA en el AMG que contiene las superficies pertenecientes a las ZRA El Bajío y al Cerro del Tajo. Ambas se descargaron directamente del geovisor “SIG metro” del Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN). Asimismo, este archivo cuenta con el SRC: WGS 1984 UTM Zona 13Norte y su última modificación se realizó en julio del 2021.

Zonificaciones del APFFLP

Desde el Buscador de Datos por Área Natural Protegida “SIG CONANP” se descargó el “KIT- Primavera” en el cual se encuentra la capa shapefile que corresponde a la división de las zonificaciones del APFFLP. De acuerdo con los metadatos de la capa, los polígonos fueron creados en octubre del 2006 y su SRC es ITRF92_UTM_Zona_13N.

Modelos Digitales del Terreno (MDT)

Se descargaron 18 MDT de la biblioteca digital de mapas del INEGI.

Los archivos se unieron con el fin de tener un ráster que abarcara la totalidad del APFFLP. Cada uno de los archivos tienen una cobertura territorial a escala 1:10 000 y una resolución de 5m, derivados de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. Asimismo, la edición de los MDT es del año 2016.

Aunado a lo anterior, las claves de cartas topográficas de los ráster descargados pertenecen a las subdivisiones de las cartas F13D64 y F13D65. Además el Datum correspondiente de los archivos es el ITRF08 época 2010.0.

Conjunto de datos vectoriales de información topográfica

Se descargaron los conjuntos de 2 años: 1995 y 2019 con el fin de identificar edificaciones, caminos, linderos y otros elementos que puedan ayudar a caracterizar los incendios. Los datos están representados en una escala de 1:50 000. La institución responsable de la publicación de los conjuntos es el INEGI.

4.2 Aplicación de índices para la determinación del área quemada

Mediante la calculadora ráster del software ArcGIS Pro se procedió a realizar las operaciones algebraicas correspondientes para calcular los índices espectrales NDVI, NBR, BAI y GEMI, con los cuales, posteriormente, se estimaron los siguientes índices bitemporales, que se utilizaron para delimitar las áreas afectadas por los incendios:

- Δ NDVI (Kushla y Ripple, 1998)
- Δ BAI (Martín, 1998)
- Δ GEMI (Martín, 1998)

NDVI y Δ NDVI

Para calcular el índice espectral de NDVI se requirieron las bandas correspondientes al rango del espectro visible del color rojo (red) y al rango electromagnético del infrarrojo (NIR). En el satélite Sentinel-2 estas bandas son la 4 y la 8 respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, es posible estimar el estado de salud de la vegetación con este índice, ya que una planta absorbe más energía en el NIR si la estructura de sus hojas se encuentra deteriorada. Ocurre lo contrario con los rangos del espectro visible, ya que si hay presencia de clorofila en la planta, los valores de reflectancia en el color rojo serán bajos.

De acuerdo con Rouse, et al. (1973) este parámetro se obtiene mediante la diferencia de ambas bandas dividido entre la suma de estas, por lo que la operación algebraica es la siguiente:

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

Ecuación 1. NDVI

Los valores resultantes varían entre -1 y 1. Cabe señalar que los valores negativos representan agua, nieve y nubes. Cuanto más cercanos a 1 sean los valores, mejor salud tendrá la vegetación.

Después se calculó la diferencia entre el NDVI post-incendio y pre-incendio, resultando en el índice Δ NDVI (Kushla y Ripple, 1998) que varía entre los valores de 2 y -2. Posteriormente, este índice fue empleado para resaltar las variaciones de las condiciones de la vegetación entre el momento anterior y el posterior al incendio, así como para delimitar las zonas quemadas.

NBR y Δ NBR

El NBR es resultado de una operación algebraica donde se utilizan las bandas del NIR y del infrarrojo de onda corta (SWIR2), esta última corresponde a la banda 12 del satélite Sentinel-2.

El análisis de vegetación sigue desempeñando un papel importante en el cálculo de este índice, pero ahora se utiliza la banda del SWIR 2 con el fin de evaluar el contenido de agua en las plantas, ya que si se encuentran en un estado de salud deplorable, los valores de reflectancia en este rango del espectro electromagnético serán más altos que los del NIR. Esto se debe a que el agua absorbe la energía encontrada en estas longitudes de onda.

Al igual que el NDVI, el rango de valores del NBR van desde el -1 al 1. Los valores más altos se asocian a niveles más severos de incendio.

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR 2)}{(NIR + SWIR 2)}$$

Ecuación 2. NBR

En segundo lugar, se calcularon las diferencias entre los NBR de las imágenes pre-incendio y las post-incendio más inmediatas. Como resultado se obtuvo el ΔNBR , cuyos posibles valores oscilan entre -2 y 2. Estos diferenciales se utilizaron posteriormente para estimar la severidad del incendio.

BAI y ΔBAI

Se utilizaron los valores de reflectividad del rojo y del infrarrojo cercano para obtener el BAI. En el año 2011, Bastarrika et al. presentaron un algoritmo para el mapeo de área quemadas en ecosistemas mediterráneos. Dentro de dicho algoritmo utilizaron varios índices, dentro de los cuales se encuentra el BAI.

Asimismo, el BAI ha demostrado buenos resultados cuando se utiliza en zonas cubiertas por bosques de pino, especialmente cuando se utilizan imágenes satelitales que fueron capturadas después del incendio (Fornacca et al. 2018).

Para su cálculo se debe realizar la siguiente ecuación:

$$BAI = \frac{1}{(red - 0,1)^2 + (NIR - 0,06)^2}$$

Ecuación 3. BAI

Posteriormente se calculó el diferencial de los BAI post y pre incendio para poder delimitar los incendios, mediante los valores del ΔBAI (Chuvienco, & Martín, 1998).

GEMI y $\Delta GEMI$

Por último se calculó el GEMI utilizando los valores de reflectividad de las bandas del rojo y del NIR, con el fin de discriminar las zonas quemadas de las no quemadas y delimitar el área afectada por cada incendio.

Este índice está diseñado específicamente para disminuir los efectos de la atmósfera y del suelo que pueden provocar distorsión en los resultados (Martín y Chuvienco, 1998).

$$\text{GEMI} = \frac{\eta(1 - 0,25\eta) - (\text{red} - 0,125)}{(1 - \text{red})}$$

Ecuación 4. GEMI

Donde $\eta = \frac{2(\text{NIR}^2 - \text{red}^2) + 1,5 \text{ NIR} + 0,5 \text{ red}}{(\text{red} + \text{NIR} + 0,5)}$

Una vez realizados los cálculos, se procedió a estimar la diferencia entre los GEMI post y pre-incendio para obtener el ΔGEMI (Chuvienco, & Martín, 1998).

4.3 Delimitación del área quemada

Una vez obtenidos los índices, se procedió a delimitar el área afectada por el incendio en cada caso. En este trabajo se ha optado por hacer una segmentación de los píxeles en dos categorías: quemado y no quemado (Martín y Chuvienco, 1998). Hay que tener en cuenta que este procedimiento supone una simplificación de un proceso, como un incendio forestal, que es complejo en sí.

Para segmentar los valores obtenidos en los índices se ha empelado la propuesta de Bastarrika et al. (2011) que indica los siguientes valores de umbrales: para el ΔNDVI , las zonas afectadas son aquellos píxeles con valores menores a -0,17767, para el ΔBAI son los valores mayores a 144,3835, para el ΔGEMI , aquellos menores a -0,11578, y por último, para el NBR de las imágenes post incendio, los valores deben ser menores a -0,15006.

Estos valores sirven para categorizar una capa binaria al dar valor 1 a los píxeles que cumplen la condición de “área quemada” y valor 0 a los que no sufrieron afectaciones por el fuego.

Previo al cálculo de los índices bitemporales, se asignaron números a los ráster procedentes de las imágenes satelitales capturadas justo después de los incendios con el fin de identificarlos eficaz y eficientemente (tabla 7). Es posible consultar la ubicación de las localidades mencionadas en el tabla 7, en la figura 3.2.

Cabe recalcar que “Número de incendio” no hace alusión a la cantidad de incendios ocurridos en cada fecha, sino que es simplemente un identificador. Por ejemplo, en la imagen correspondiente al 18 de abril de 2019 se pueden observar tres incendios. Asimismo, en la imagen capturada el día 27 de abril de 2023 hay dos incendio

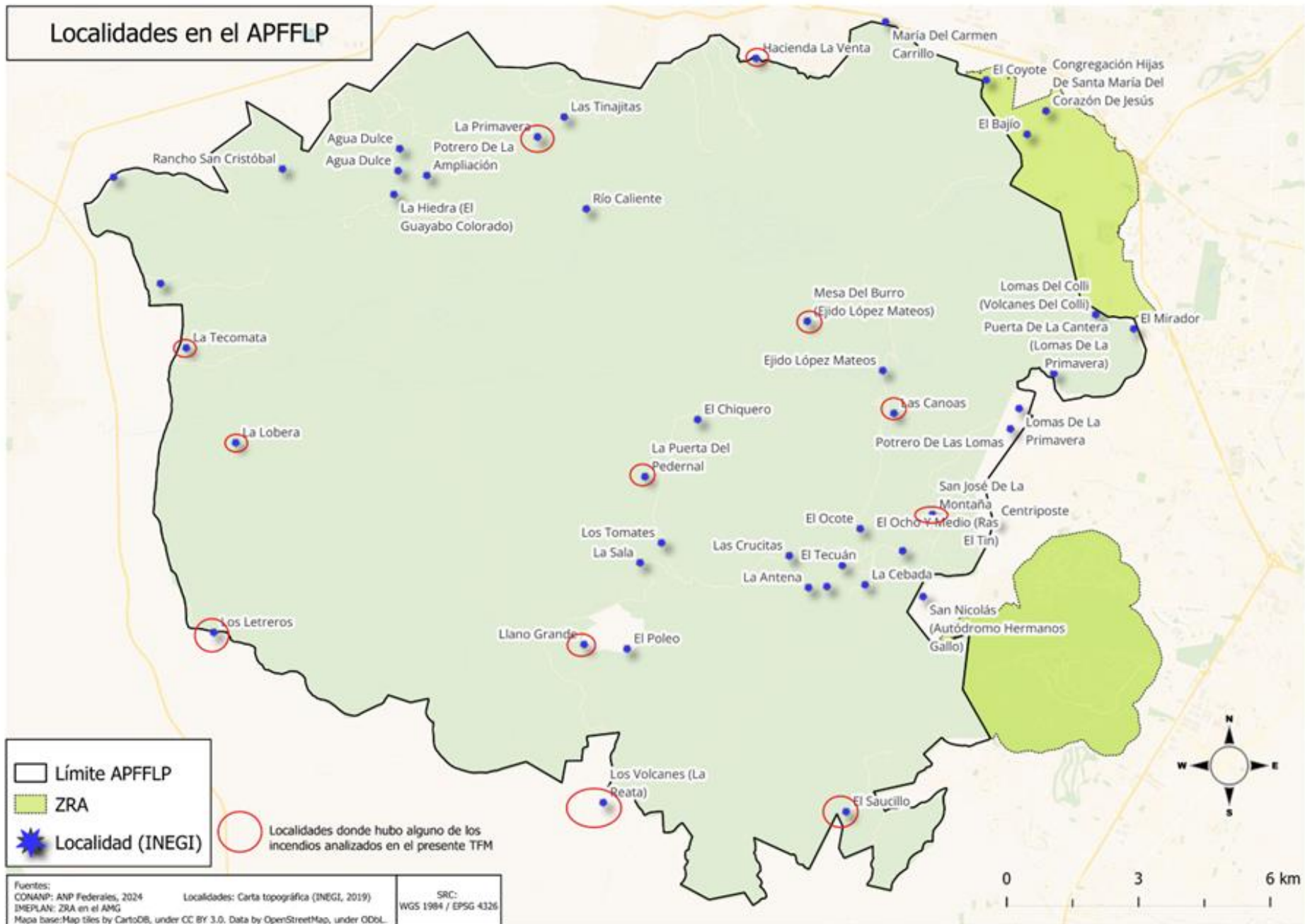


Figura 3.2. Localidades en el APFFLP (INEGI, 2019)

Número de incendio	Fecha de imagen Sentinel 2	Predio (CNPIF)	Localidad (INEGI)
1	13 de abril de 2018	San Miguel	Los Letreros Llano Grande
2	18 de abril de 2019	2.1: San José de la Montaña	ídem
		2.2: San José de la Montaña	ídem
		2.3: Los asadores	NA
3	18 de mayo de 2019	Las Mesitas	Hacienda La Venta
4	7 de abril de 2021	Las Canoas- Nejahuete-Pedernal	Las Canoas Ejido López Mateos La Puerta del Pedernal
5	17 de abril de 2021	Volcanes	Los Volcanes (La Reata) El Saucillo
6	17 de mayo de 2021	Cajetes	La Lobera
7	27 de abril de 2023	7.1: Los Avestruces	La Primavera
		7.2: La Tecomata	ídem

Tabla 7. Número de incendios (identificadores)

Segmentaciones

Habiendo calculado los índices mencionados, se procedió a realizar una reclasificación del ráster con base en los umbrales propuestos por Bastarrika et al. (2011):

Utilizando los ráster resultantes del proceso de segmentación se calculó el índice de distancias normalizadas (M) (Chuvieco y Bastarrika, 2006) con el fin de saber cuál de los cuatro índices tuvo una mejor separabilidad espectral las zonas quemadas.

El índice M se obtiene mediante la división del valor absoluto del diferencial de la media de la categoría “quemado” y la media de “no quemado”, entre la sumatoria de las desviaciones típicas de ambas categorías. Asimismo, los valores de M que resulten mayores a 1 representan una buena separabilidad entre clases:

$$M = \frac{|\mu_{quemado} - \mu_{no\ quemado}|}{\sigma_{quemado} + \sigma_{no\ quemado}}$$

Ecuación 5. Índice M

Donde:

μ = Media

σ = Desviación típica

Después de esto, los datos ráster se sometieron a un proceso de filtrado mayoritario para refinar las zonas identificadas. Una vez obtenidas estas zonas, se convirtieron en polígonos. Luego, se llevó a cabo una limpieza manual de estos polígonos con el fin de evitar clasificar

erróneamente áreas, por ejemplo, incluir cuerpos de agua, suelo o parcelas incendiadas aisladas de la zona de incendio forestal.

Cuatro de los nueve grandes incendios forestales fueron mejor segmentados con el Δ GEMI, y tres con el Δ BAI. Únicamente para un incendio el índice M del Δ NDVI fue mayor a cualquier otro (tabla 11). Sin embargo, el total de los índices crearon una buena segmentación, ya que ninguno obtuvo un M menor a 1, exceptuando el Δ GEMI del incendio número 3 (2019). Además, en el caso donde el Δ BAI y el Δ GEMI obtuvieron valores M casi idénticos se optó por combinar ambos resultados de segmentaciones.

Una vez obtenidos los polígonos de cada incendio, se realizó la comparación con los polígonos del CNPIF. Los resultados de las delimitaciones y diferencias con los polígonos del CNPIF se muestran en las figuras 4, 5 y 6 en el capítulo “Resultados”.

4.4 Análisis de la severidad de los incendios

Existen dos maneras de evaluar la severidad de un incendio. La primera se trata de la evaluación visual en campo, donde se llevan a cabo mediciones de la materia orgánica de la vegetación y los suelos. Normalmente se calculan índices que combinan distintos parámetros como la mortalidad de la vegetación, el diámetro de las ramas que sobrevivieron al incendio, las condiciones de humedad, entre otros (Llovería, et al., 2014). Asimismo, de acuerdo con lo expuesto por Llovería et al. (2014), el *Composite Burn Index* (CBI), desarrollado por Key y Benson en 1999, es uno de los índices mayormente utilizado para la estimación de los efectos de fuego en la vegetación.

La segunda técnica es la evaluación basada en técnicas de teledetección, las cuales son utilizadas en este TFM, a pesar de que lo ideal es realizar ambas evaluaciones, ya que no se cuenta con datos de campo.

Como se mencionó anteriormente, se calcularon los Δ NBR para estimar la severidad de los incendios, así que se procedió a reclasificarlos de acuerdo con los umbrales establecidos por Key y Benson (2006), mismos que se muestran en la tabla 8. Uno de los objetivos de esta metodología es poder realizar comparaciones temporales entre áreas quemadas.

Nivel de severidad	Rangos de Δ NBR
Alto crecimiento de vegetación post-fuego	< -0,251
Bajo crecimiento de vegetación post-fuego	-0,250 → -0,101
Zonas estables o sin quemar	-0,1 → 0,099
Zonas quemadas con severidad baja	0,1 → 0,269
Zonas quemadas con severidad moderada	0,27 → 0,439
Zonas quemadas con severidad moderada-alta	0,44 → 0,659
Zonas quemadas con severidad alta	> 0,66

Tabla 8. Umbrales de clasificación para estimación de la severidad de un incendio según Key y Benson (2006)

Una vez reclasificados cada uno de los Δ NBR, se continuó con la vectorización de los ráster resultantes, los cuales se intersecaron con la capa de coberturas del suelo de SEMADET con el fin de saber qué tipo de superficie fue mayormente afectada.

Otra forma para determinar la severidad, se basa en la relación existente entre la severidad del incendio y la cantidad de vegetación consumida, por lo que los valores del NDVI de las imágenes pre y post-incendio fueron reclasificados con base en los umbrales propuestos por Chuvieco (2015) (tabla 9). Además, con los resultados es posible comparar los cambios en la actividad fotosintética de la vegetación.

No.	Rangos de NDVI	Categoría
1	< 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra
2	0 – 0,2	Suelo desnudo
3	0,2 – 0,4	Vegetación escasa + suelo
4	0,4 – 0,6	Vegetación dispersa
5	> 0,6	Vegetación densa

Tabla 9. Umbrales de actividad clorofílica (Chuvieco, 2015)

4.5 Cálculo de la regeneración vegetal

Para obtener los valores de regeneración de la vegetación se trabajó con dos índices: Δ NBR y Δ NDVI.

Los diferenciales son distintos en este caso, ya que para obtener los niveles de regeneración se utilizaron las imágenes post-incendio capturadas 1 año después de los fenómenos y las imágenes pre-incendio más inmediatas a cada evento.

Los resultados fueron reclasificados de la misma manera que los valores de Δ NBR calculados para estimar la severidad de los incendios, ya que se pueden discriminar zonas en donde hay recrecimiento de vegetación.

El Δ NDVI se calculó con el fin de realizar de nuevo una segmentación y poder identificar las áreas donde la vegetación aún presenta afectaciones por los incendios mediante la segmentación propuesta por Bastarrika et al. (2011) mencionada anteriormente.

$$\Delta\text{NBR}(\text{regeneración}) = \text{NBRpre-incendio} - \text{NBRpost-incendio}(1 \text{ año después})$$

$$\Delta\text{NDVI}(\text{regeneración}) = \text{NDVI post-incendio}(1 \text{ año después}) - \text{NDVIpre-incendio}$$

Después se procedió a vectorizar los resultados de ambos índices.

4.6 Mapa de Pendientes

Como se mencionó anteriormente, las inclinaciones del terreno pueden influir en la propagación del fuego en los incendios forestales. Por esta razón se calcularon las pendientes del APFFLP con el fin de analizar la relación entre la severidad de incendios, su extensión y la inclinación del terreno en las zonas afectadas.

Partiendo de la unión de los MDT descargados de la biblioteca digital de mapas del INEGI se realizó en mapa de pendientes del APFFLP, donde el valor mínimo fue de 0,000344 grados y el máximo de 76,56.

El ráster resultante se reclasificó en 7 categorías para poder caracterizar eficientemente los diferentes incendios. Los rangos elegidos están basados en las clasificaciones propuestas por Martínez (2022), al igual que las indicadas por Moreno y Álvarez (2018), resultando en una clasificación que combina ambas propuestas para adecuar los rangos a las pendientes existentes en el APFFLP.

La primera clase valora las pendientes como planas, ya que el valor máximo de este rango es 1. La segunda y tercera clase son rangos con un aumento de 5 grados; la cuarta y quinta, de 10 grados; la sexta de 20 grados, y por último, la séptima categoría son todas aquellas pendientes mayores a 50 grados (tabla 10). Posteriormente se vectorizó el resultado.

Clase	Rango (grados)
1	<1
2	1-5
3	5-10
4	10-20
5	20-30
6	30-50
7	>50

Tabla 10. Rangos de clasificación de pendientes

Una vez obtenida la capa vectorial, se realizó una unión de su tabla de atributos con la de los polígonos de los Δ NBR de severidad con el fin de identificar si existe alguna relación entre las pendientes del terreno y los niveles de severidad de los incendios.

4.7 Solapes de incendios

En esta fase del análisis se determinaron las áreas que han sido afectadas por incendios en más de una ocasión, al igual que el número de veces que han sido quemadas durante el periodo de 2012 a 2023. Para ello, en primer lugar se exportaron los polígonos del CNPIF a partir del año 2018 que tuvieran un áreas menor a 500 ha. También se obtuvieron los polígonos de incendios ocurridos desde 2012 a 2017, independientemente de la superficie abarcada.

Con dichos materiales se realizaron varias intersecciones para identificar las áreas en el APFFLP que han sufrido incendios en más de una ocasión desde 2012 hasta abril del 2023.

Para llevar a cabo el proceso de identificación de estos solapes se cruzaron todas las capas, una a una. Las intersecciones resultantes se unieron mediante un “merge” con el fin de conservar la integridad de los valores obtenidos y saber cuántas veces han sido afectadas las superficies de solapes y en qué años, al igual que la superficie abarcada.

Posteriormente la tabla de atributos se exportó como un archivo .csv que se utilizó para calcular los campos con la información necesaria, a excepción de la superficie total de los solapes, ya que previamente se calculó en ArcGIS Pro.

Después se realizó una unión de tablas entre el csv y el shapefile. Por último se disolvieron los polígonos con base en los solapes de los años en que se quemaron.

4.8 Cambios en la cantidad de edificaciones y vías de comunicación

Dado que los incendios no solo afectan a la vegetación y fauna, sino también a los asentamientos humanos dentro del APFFLP, se decidió analizar si en las áreas afectadas por incendios entre 2018 y abril de 2023 ha habido un aumento de edificaciones desde 1995 hasta 2019. Este análisis también se extendió a las vías de comunicación, ya que los incendios estudiados en este TFM no fueron causados por eventos naturales, a excepción del ocurrido en el predio Cajetes (2021). Por lo tanto, se busca determinar si el incremento en la accesibilidad a ciertas zonas del APFFLP ha influido en la propagación y frecuencia de los incendios forestales.

Cabe señalar que el periodo elegido para analizar estos aumentos en la infraestructura se debe a la falta de actualizaciones en las cartas topográficas vectoriales de la zona desde 2019.

Para llevar a cabo lo anterior, se calcularon buffers de 500m alrededor de cada uno de los incendios y utilizando las capas vectoriales de topografía mencionadas en el apartado “datos de entrada” se realizó un análisis de conteo de puntos dentro de polígonos en el software Qgis con el fin de determinar la presencia de edificaciones en las áreas quemadas y alrededores, tanto en el año 1995 como en el 2019. También se registró la cantidad de caminos, carreteras, senderos u otras vías que intersecan con los buffer creados. Al tomar en cuenta ambos años, se pudieron identificar cambios en las zonas de cada incendio.

Además, se localizaron las diferencias en los trazados de vías en cada zona quemada donde se observó un decremento en la cantidad de líneas contadas, con el fin de evaluar si en 1995 se clasificaron erróneamente caminos o senderos y fueron corregidos en 2019, o si las digitalizaciones de 2019 simplemente omitieron vías por abandono. Las polilíneas de 1995 que se omitieron en la topografía de 2019 se adjuntaron a dicha capa vectorial. Este procedimiento se realizó únicamente con trazos que se pueden ver proyectados en otros mapas como Open Street Map, Bing, Google Maps, Navegación de Waze, y que en 2023 aún son visibles en imágenes satelitales de muy alta resolución.

4.9 Temperaturas máximas del aire en los días de inicio de cada incendio

Al igual que con las vías de comunicación y las edificaciones, se busca identificar la relación entre la severidad de los incendios, la extensión que abarcaron y la temperatura máxima del aire alcanzada en cada uno de los días de inicio de los incendios.

Para ello se descargó la información de estadística histórica de la estación climatológica en Tala publicadas por la CONAGUA y se identificaron las fechas exactas de inicio de cada uno de los incendios. Posteriormente se creó un nuevo campo en cada tabla de atributos de las capas vectoriales de las delimitaciones calculadas de las zonas quemadas y se registraron las cifras de las temperaturas máximas del aire correspondientes. Sin embargo, para los incendios ocurrido en el año 2023 se tomó en cuenta la temperatura máxima mensual, ya que los datos diarios aún no son publicados.

4.10 Estado actual de la vegetación del APFFLP

Con el fin de saber si la cantidad de incendios ocurridos han tenido un impacto general en el APFFLP, se decidió calcular la severidad y la regeneración en toda el área utilizando dos imágenes de Sentinel 2. La primera capturada el 03 de abril del 2018 y la segunda en el día 06 de abril del 2024.

Una vez calculados los índices necesarios, los ráster se cortaron utilizando el polígono del ANP. Cabe mencionar que no se tomaron en cuenta los polígonos de las Zonas de Recuperación Ambiental, ya que en éstas hay presencia de zonas urbanas amplias que podrían disminuir la precisión de los cálculos de porcentajes del APFFLP que aún presenta afectaciones por incendios.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Delimitaciones de áreas quemadas

Una vez aplicado el proceso descrito en el apartado de metodología para determinar las áreas afectadas por los incendios, se han conseguido los siguientes resultados expresados en las figuras 4, 5 y 6, así como en la tabla 11.

INCENDIO 1	M	ha	INCENDIOS 2	M	ha
ΔNDVI	1,570	2.011,885	ΔNDVI	1,540	816,04
ΔBAI	1,922	2.246,273	ΔBAI	2,149	1.514,03
ΔGEMI	1,859	2.819,237	ΔGEMI	2,095	1.873,95
NBRpost	1,453	1.794,403	NBRpost	1,687	1.352,58
INCENDIO 3	M	ha	INCENDIO 4	M	ha
ΔNDVI	1,749	670,91	ΔNDVI	1,450	3.364,56
ΔBAI	1,604	396,44	ΔBAI	1,950	3.532,81
ΔGEMI	0,292	615,27	ΔGEMI	2,056	4.377,41
NBRpost	1,693	300,52	NBRpost	1,657	1.948,86
INCENDIO 5	M	ha	INCENDIO 6	M	ha
ΔNDVI	1,620	1.788,18	ΔNDVI	1,606	2.417,88
ΔBAI	2,382	2.061,42	ΔBAI	1,80826	1.201,79
ΔGEMI	2,469	2.226,61	ΔGEMI	1,80804	2.018,83
NBRpost	1,786	1.896,04	NBRpost	1,673	853,43
INCENDIOS 7		M	ha		
ΔNDVI		1,747	229,52		
ΔBAI		1,942	715,87		
ΔGEMI		2,061	931,13		
NBRpost		1,703	444,79		

Tabla 11. Índice M de cada incendio.

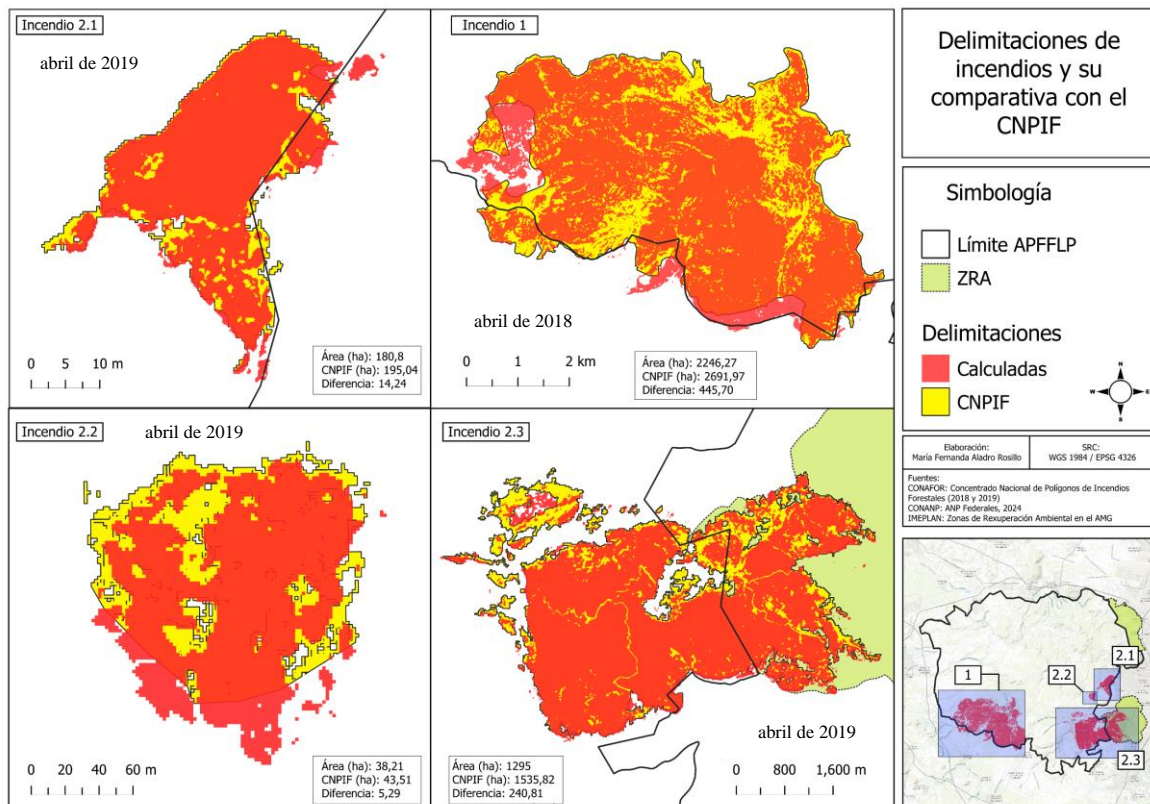


Figura 4. Delimitaciones de incendios 1, 2.1, 2.2, y 2.3

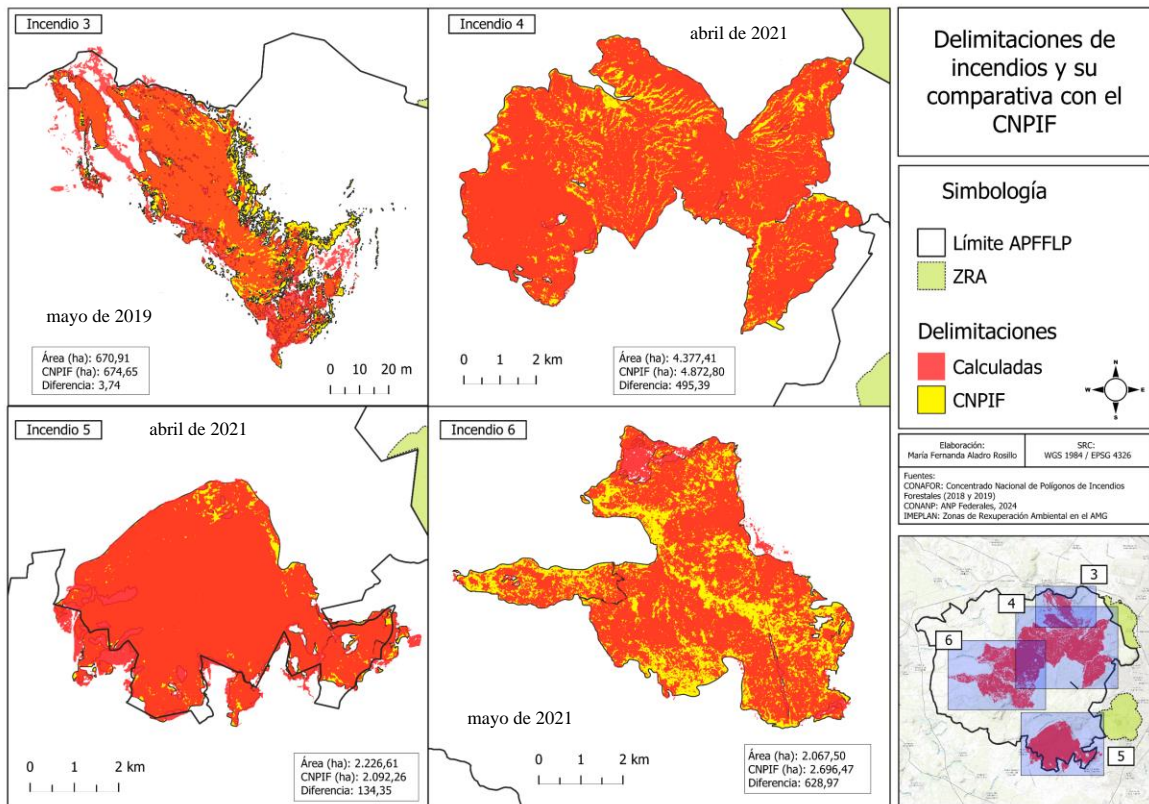


Figura 5. Delimitaciones de incendios 3, 4, 5, y 6

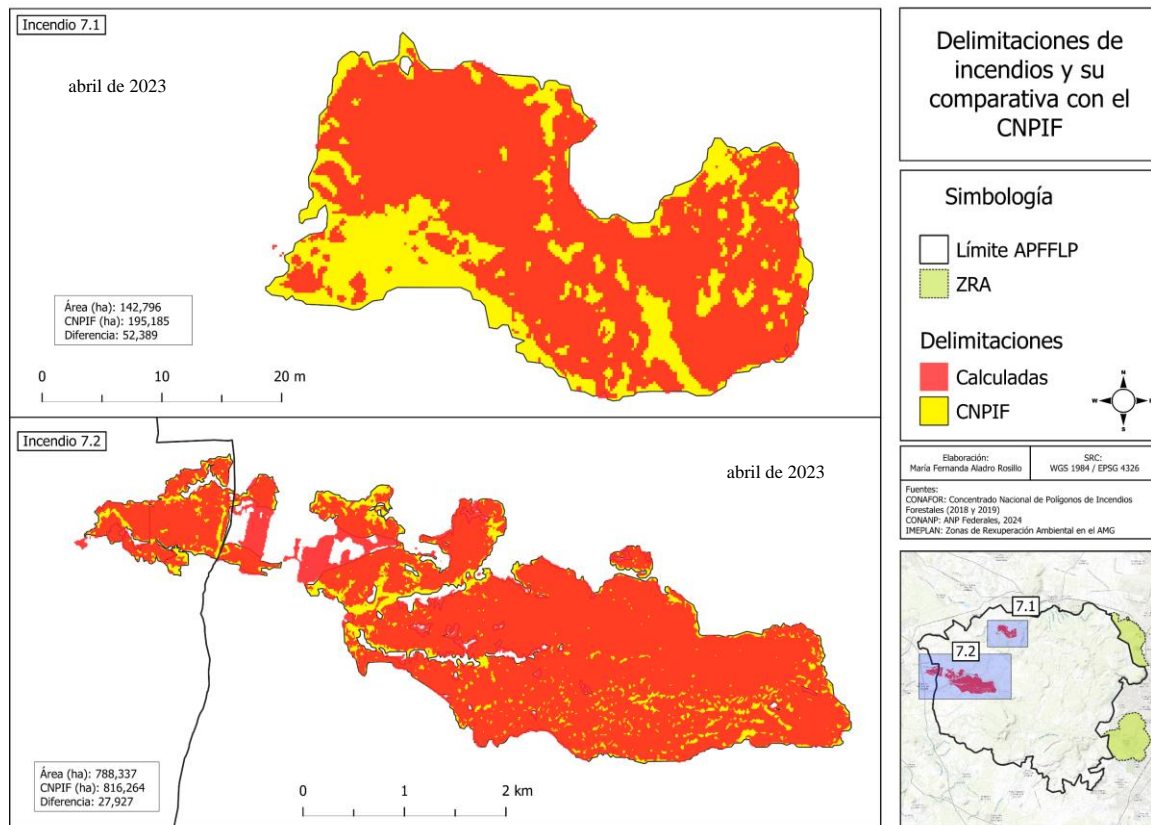


Figura 6. Delimitaciones de incendios 7.1 y 7.2

5.2 Severidad

Estimación de severidad mediante ΔNBR

Tomando en cuenta la totalidad de los incendios ocurridos durante el periodo del 2018 al 2023, un total de 1.767,35 ha presentaron un nivel alto de severidad. Solamente 211,92 ha, las cuales representan un 1,36% de todas las zonas quemadas, no mostraron perturbaciones. En su mayoría, las superficies tuvieron un nivel severidad moderada. (figura 7)

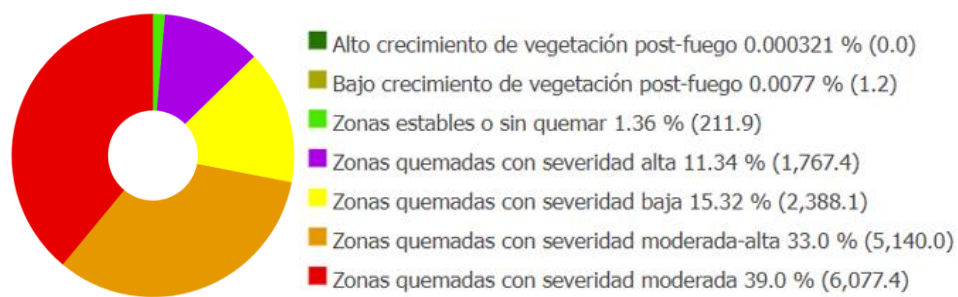


Figura 7. Porcentajes de niveles de severidad (dNBR): todos los incendios (2018-2023) (". " es el separador decimal)

En los anexos 3 al 11 se muestran gráficos de cada incendio con información sobre las superficies correspondientes a cada nivel de severidad.

El incendio 1 (predio San Miguel, 2018) (tabla 7) mostró una severidad moderada-alta en el 51,3% del área afectada, mientras que el 25,5% sufrió una severidad moderada y el 18% una severidad alta. Además, el 84,7% de la superficie afectada con el mayor nivel de severidad está cubierta por bosque de encino-galería y en un 13,8% por bosques de coníferas (figura 8).

En la zona noreste del predio San José de la Montaña, el 67,6% del área quemada presentó niveles de severidad moderada, con menos del 1% sin daños y el 14,5% con severidad alta. En contraste, en la zona sur del mismo predio, el impacto fue mayor, con la mitad del área afectada con severidad moderada-alta y el 21% con severidad alta.

El incendio en el predio Los Asadores fue similar al de la zona noreste de San José de la Montaña, con más de la mitad del área (53%) afectada por severidad moderada y casi un 30% con moderada-alta. Sin embargo, el área con severidad alta fue mayor, alcanzando el 14% (figura 9)

El incendio 3 (predio Las Mesitas, 2019) dejó 4 hectáreas sin quemar y 282,8 hectáreas con severidad moderada, lo que representó el 42,3% del área incendiada. Un 27% mostró moderada-alta y el 18,5% baja severidad (figura 9).

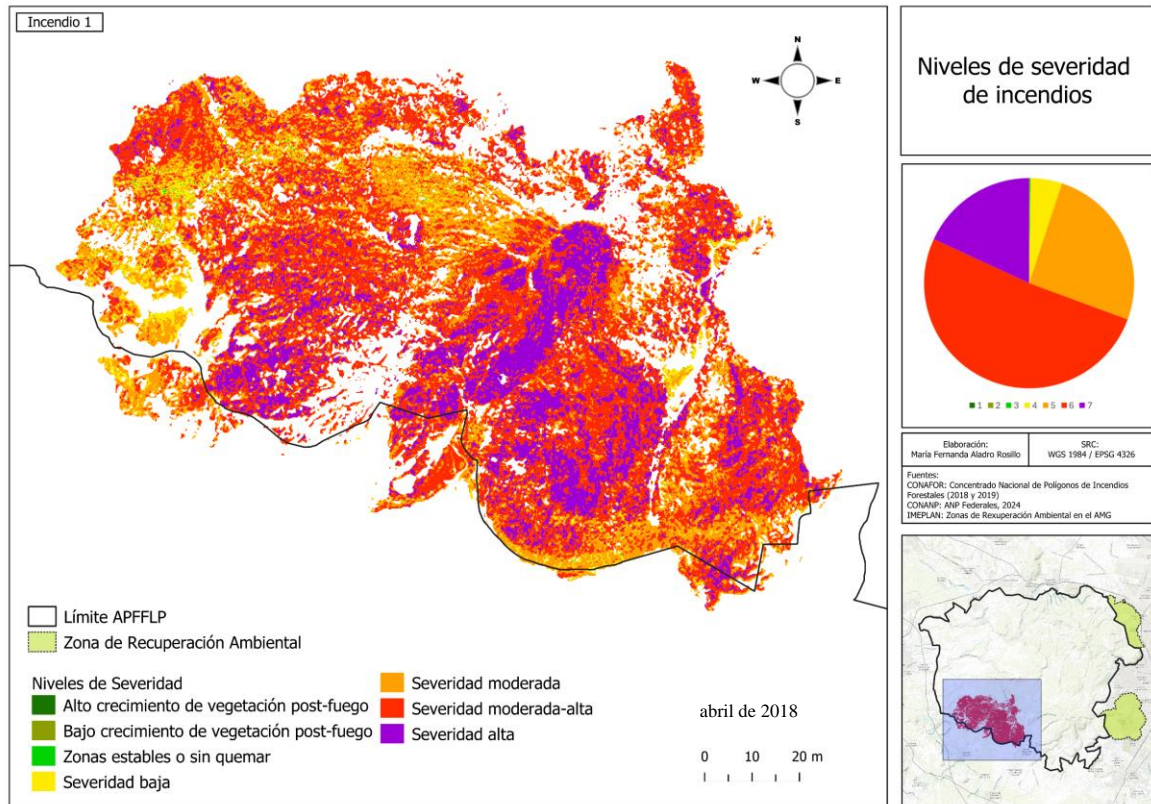


Figura 8. Severidad (dnbr), incendio 1

A pesar de ser el incendio más extenso, el incendio 4 solo presentó un 3% de severidad alta en la zona quemada. La severidad moderada afectó menos de la mitad del área (45,6%), mientras que 1.362,3 hectáreas representaron el 31,12% de las zonas con severidad moderada-alta (figura 9).

En el predio Volcanes, el 38,7% del área quemada presentó severidad alta y el 30,9% moderada-alta. Solo el 7,5% fue afectado por severidad baja.

El incendio 6 (predio Cajetes, 2021) tuvo un 40% de zonas quemadas con severidad moderada-alta y el 37% con severidad moderada. (figura 10).

Finalmente, en los incendios ocurridos en los predios Los Avestruces y La Tecomata, se identificaron 833,65 hectáreas con severidad moderada-alta, representando el 40,3% del área total afectada. Después de extinguir los incendios, no se observó crecimiento vegetal en ninguno de los predios. Las áreas sin afectación fueron mínimas, no superando el 1% de ambos incendios. (figura 10).

Aunado a lo anterior, en la tabla 12 se sintetiza la información tanto de los mapas, como de los anexos mencionados.

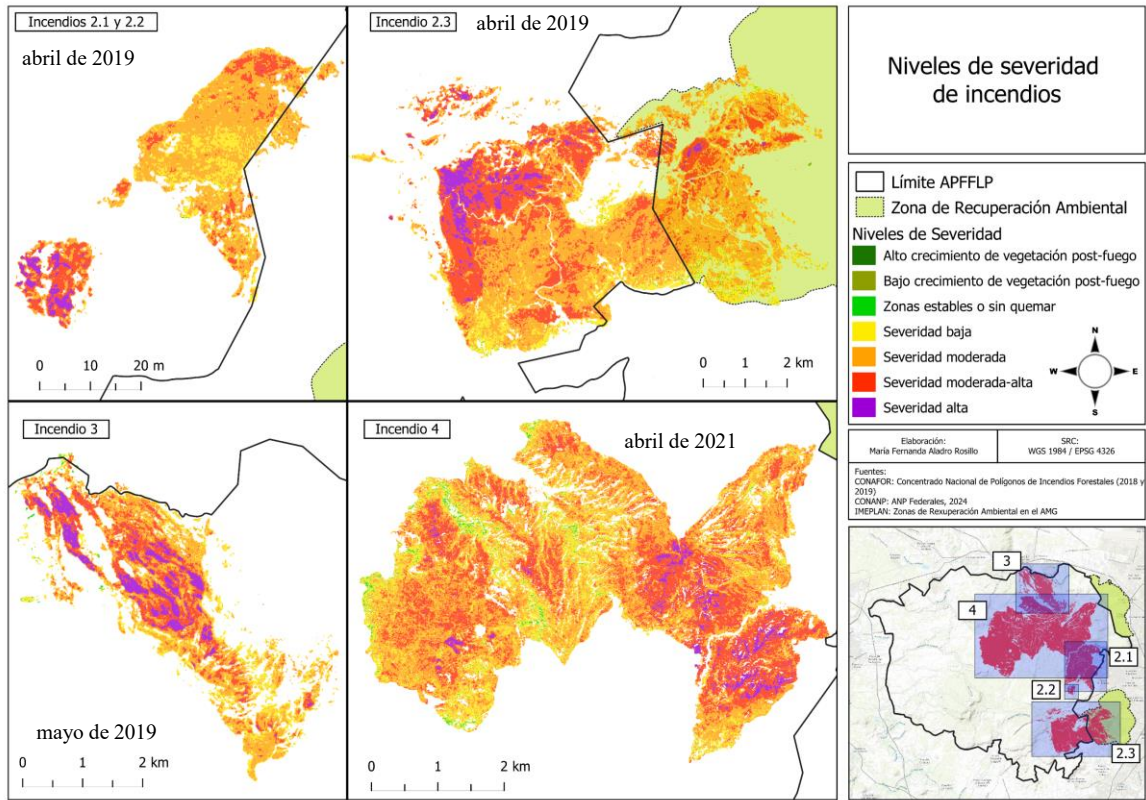


Figura 9. Severidad (dNBR) incendios 2, 3 y 4

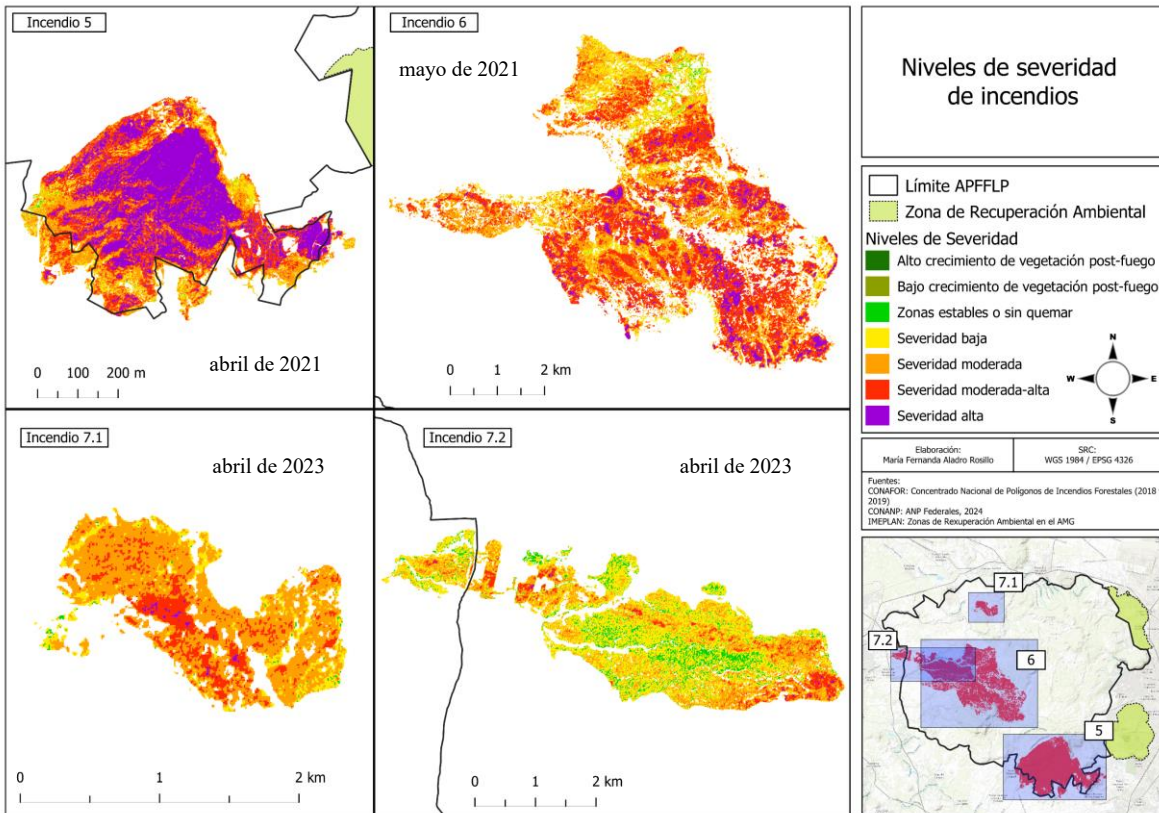


Figura 10. Severidad (dNBR), incendios 5, 6, 7

Número de Incendio	Severidad (más del 50% del total del área afectada)
1	moderada-alta
2.1	moderada
2.2	moderada-alta
2.3	moderada
3	moderada y moderada-alta
4	moderada y moderada-alta
5	moderada-alta y moderada
6	moderada-alta y moderada
7	baja-moderada

Tabla 12. Síntesis de severidad de incendios con ANBR

En la mayoría de las zonas quemadas, más del 80% de las superficies afectadas corresponden a bosques de encino-galería. Asimismo, si las cifras se dividen por niveles de severidad, la situación se replica. Sin embargo, en el incendio número tres, solamente es el 67% del área quemada con el mayor nivel de severidad la que se encuentra cubierta por este tipo de bosque, y el 19% corresponde a bosques de coníferas. Si se considera el total del área independientemente de la distribución de los niveles de severidad, en el 60,2% se afectaron bosques de encino-galería, el 27% bosques de coníferas.

Asimismo, en los incendios de los predios La Tecomata y Los Avestruces, la mayor parte de la zona afectada fueron bosques de coníferas.

Todos los incendios impactaron zonas construidas o con urbanizaciones, dando un total de 18,23 hectáreas afectadas a lo largo de cinco años.

Estimación de la severidad mediante NDVI

El área donde se presentó el incendio 1 (predio San Miguel, 2018) estaba cubierta, en su mayoría, por vegetación dispersa (1.144,33 ha) y por vegetación densa (521,8 ha). Únicamente 73ha representaban suelo desnudo. Sin embargo, una vez ocurrido el incendio, 1.358ha presentaron vegetación escasa combinada con suelo. El área con suelo desnudo cubrió un total de 828ha, por lo que 755ha fueron desprovistas de vegetación (figura 11).

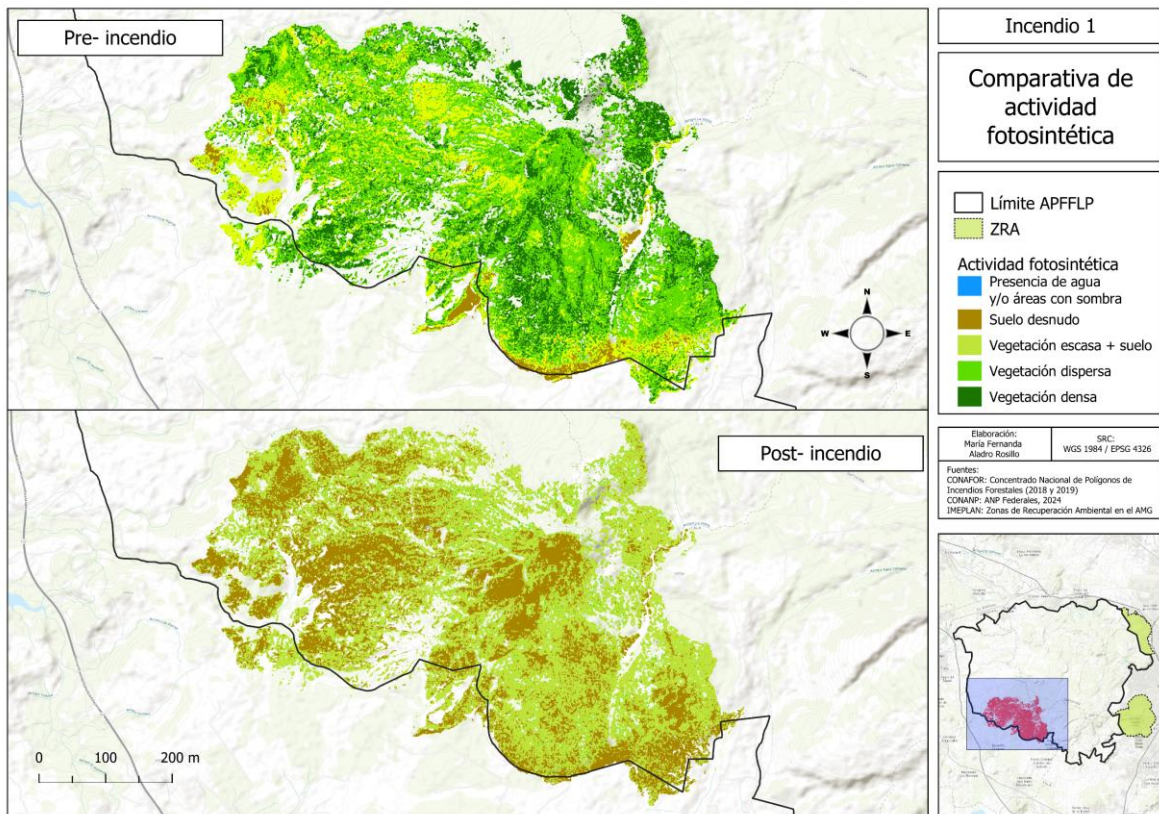


Figura 11. Actividad fotosintética, incendio 1

Previamente al incendio ocurrido en la parte norte del predio San José de la Montaña, la zona estaba casi totalmente cubierta por una mezcla de vegetación escasa y suelo. Además, solo 0,6 ha presentaban vegetación densa, la cual, después del incendio, esta categoría desapareció, resultando en una superficie de 73 ha de vegetación escasa y un total de 106,32 ha de suelo desnudo.

En la parte sur, el área quemada presentaba 22 ha de vegetación dispersa antes del incendio, la cual se redujo a 0,11 ha una vez ocurrido el suceso, dejando a su paso un total de aproximadamente 16 ha de suelo desnudo (figura 12).

En el incendio del conjunto número 2, que tuvo lugar en el predio Los Asadores, más de la mitad de la superficie que fue posteriormente afectada por el fuego, estaba cubierta por vegetación escasa y suelo (65,89%). Asimismo, un 30% de la zona presentaba vegetación dispersa. Después del incendio el 37,68% de la superficie estaba cubierta de vegetación escasa combinada con suelo, y un 62% presentaba suelo desnudo (figura 13).

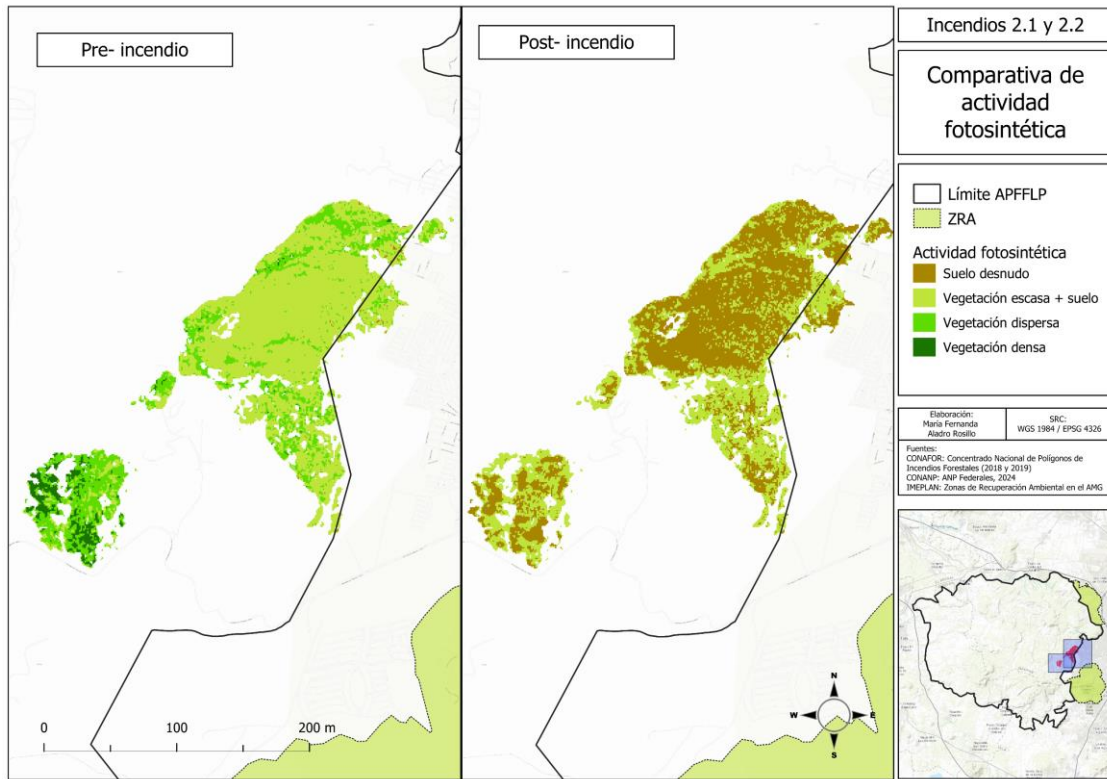


Figura 12. Actividad fotosintética, incendios 2.1 y 2.2

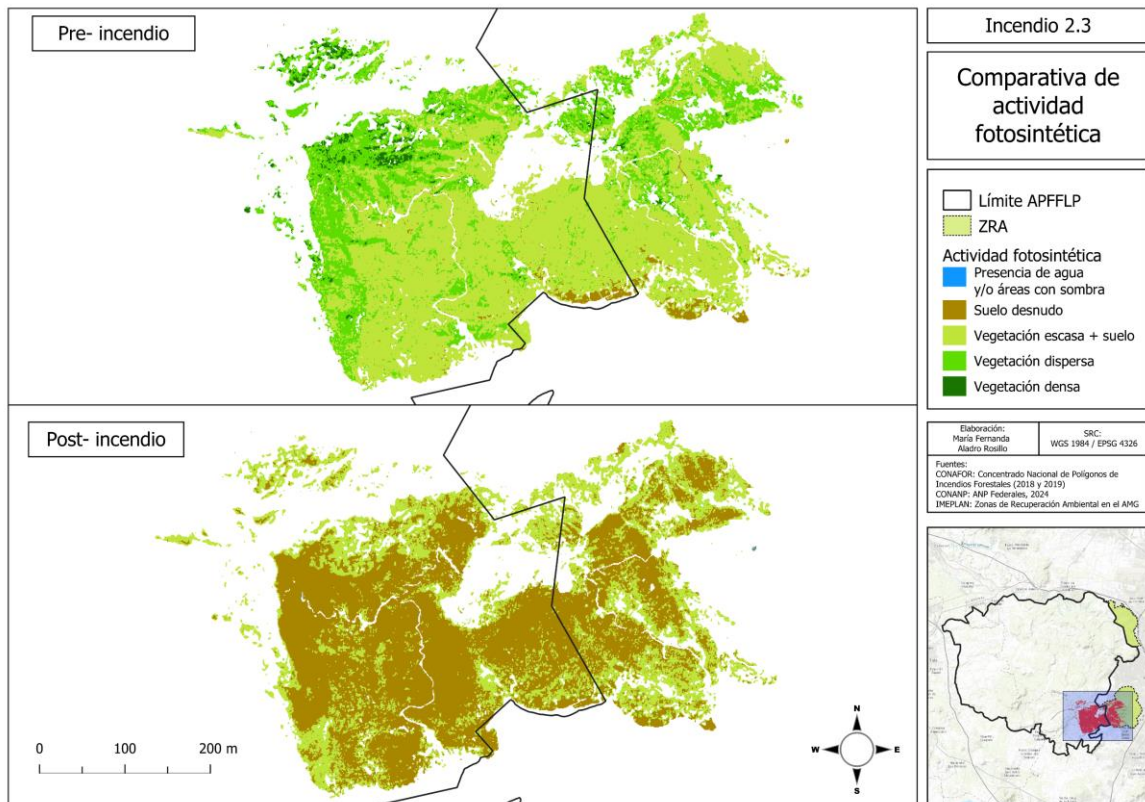


Figura 13. Actividad fotosintética, incendio 2.3

La zona del incendio 3 (predio Las Mesitas, 2019) estaba cubierta en un 59% por vegetación densa y en un 33,22% por vegetación dispersa. Una vez quemada, estas superficies disminuyeron a 0,4% y 13% respectivamente, dejando un 28% de suelo desnudo y 57% de vegetación escasa con suelo (figura 14).

Tomando en cuenta que la zona del incendio 4 también se había quemado en el 2012, nueve años después, el 65% estaba cubierta por vegetación dispersa y aproximadamente 36% de la zona era una mezcla entre vegetación escasa más suelo y vegetación densa. Posterior al incendio, el 62% pasó a estar cubierta por vegetación escasa más suelo. Aunado a lo anterior, un 26% presentaba suelo desnudo, y un 11% era vegetación dispersa (figura 15).

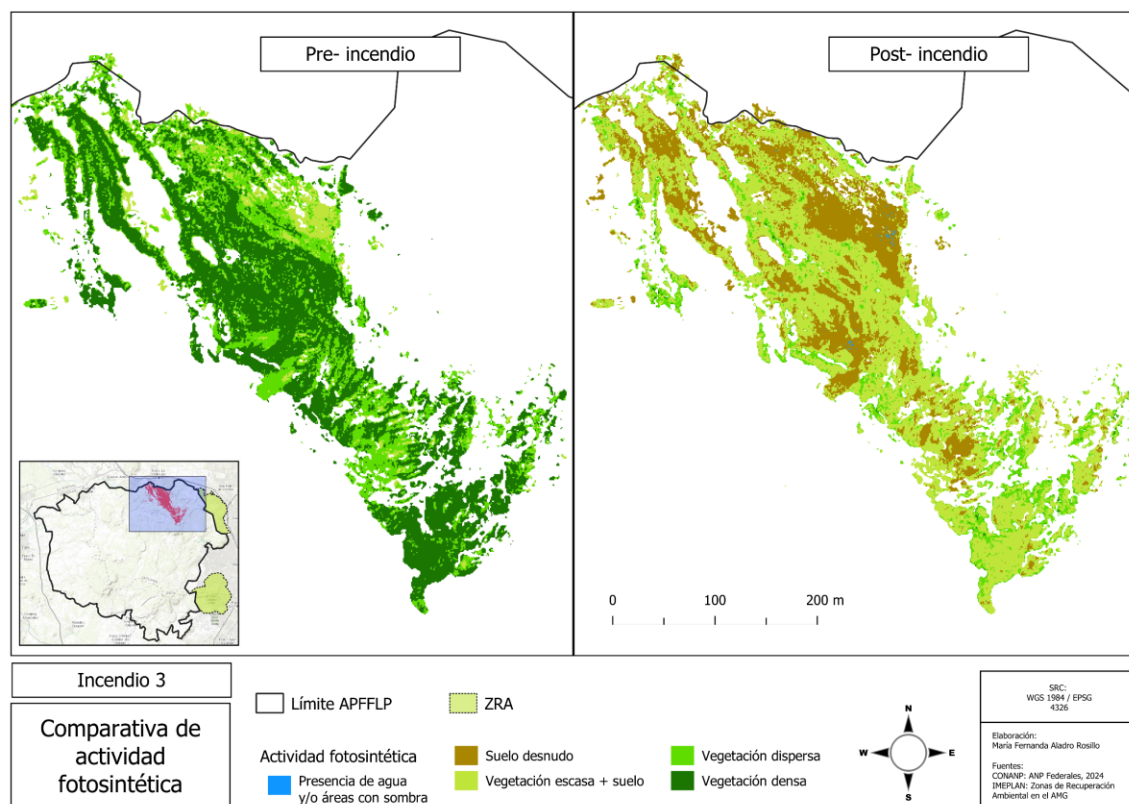


Figura 14. Actividad fotosintética, incendio 3

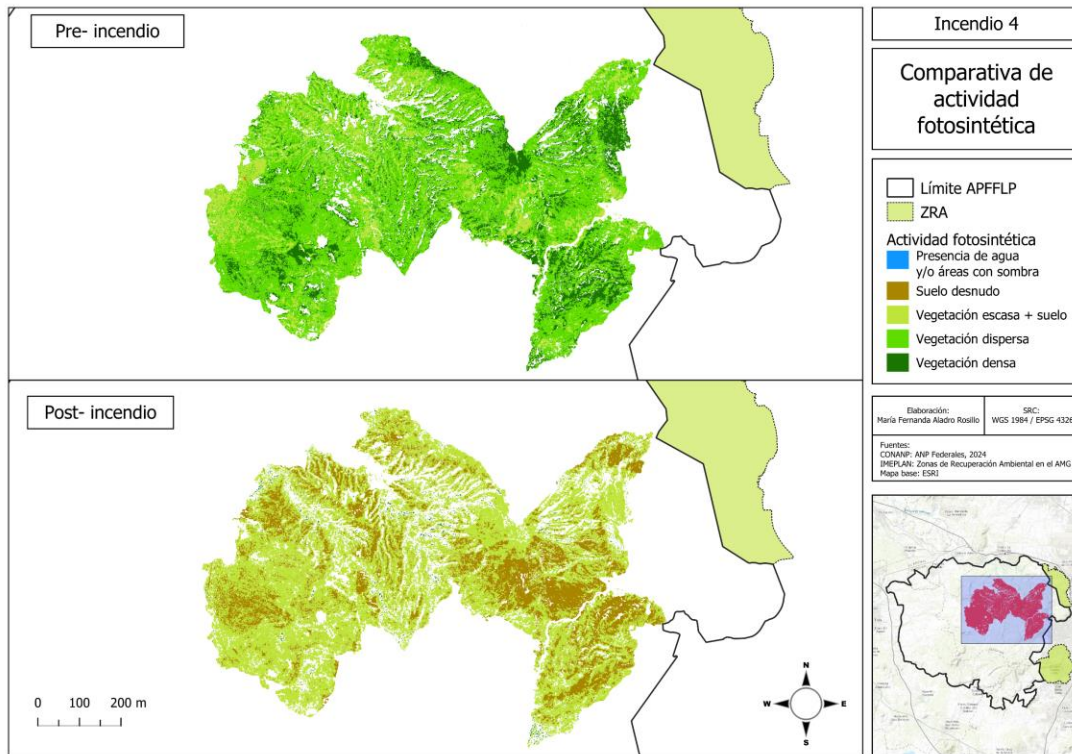


Figura 15. Actividad fotosintética, incendio 4

En la zona del incendio 5 (predio Volcanes, 2021), el 44,8% y el 30,7% de la superficie estaba cubierta por vegetación dispersa y densa respectivamente. Además, 485,64 ha, que representaban el 22% de la superficie, presentaban vegetación escasa más suelo.

Una vez ocurrido el incendio, el área con vegetación densa pasó a ser menor al 1% y únicamente un 5,4% estaba cubierta por vegetación dispersa. Aunado a lo anterior, más de la mitad de la zona (68,23%) correspondía a suelo desnudo (figura 16).

El área que sufrió impacto por el incendio 6 en el predio Cajetes estaba cubierta principalmente por vegetación densa y dispersa, las cuales representaban un 52,5% y 38%. También en un 9% había vegetación escasa más suelo.

Una vez que el incendio se sofocó, en un 1,5% de la zona había presencia de vegetación densa, la cual se ubica principalmente en las periferias del área quemada.

Casi la mitad de la vegetación dispersa desapareció ya que después del suceso, esta se distribuía en un 17,8% de la superficie total. Asimismo, las zonas totalmente desprovistas de vegetación abarcaron un 59,5% (figura 17).

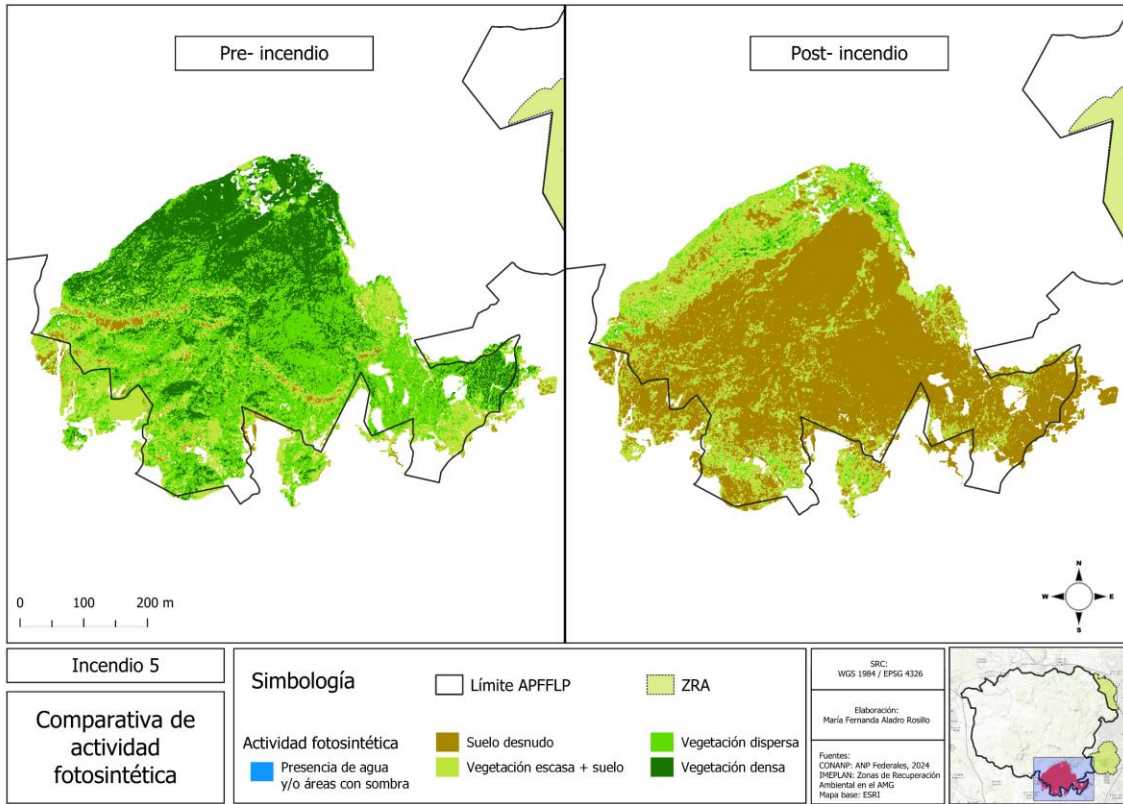


Figura 16. Actividad fotosintética, incendio 5

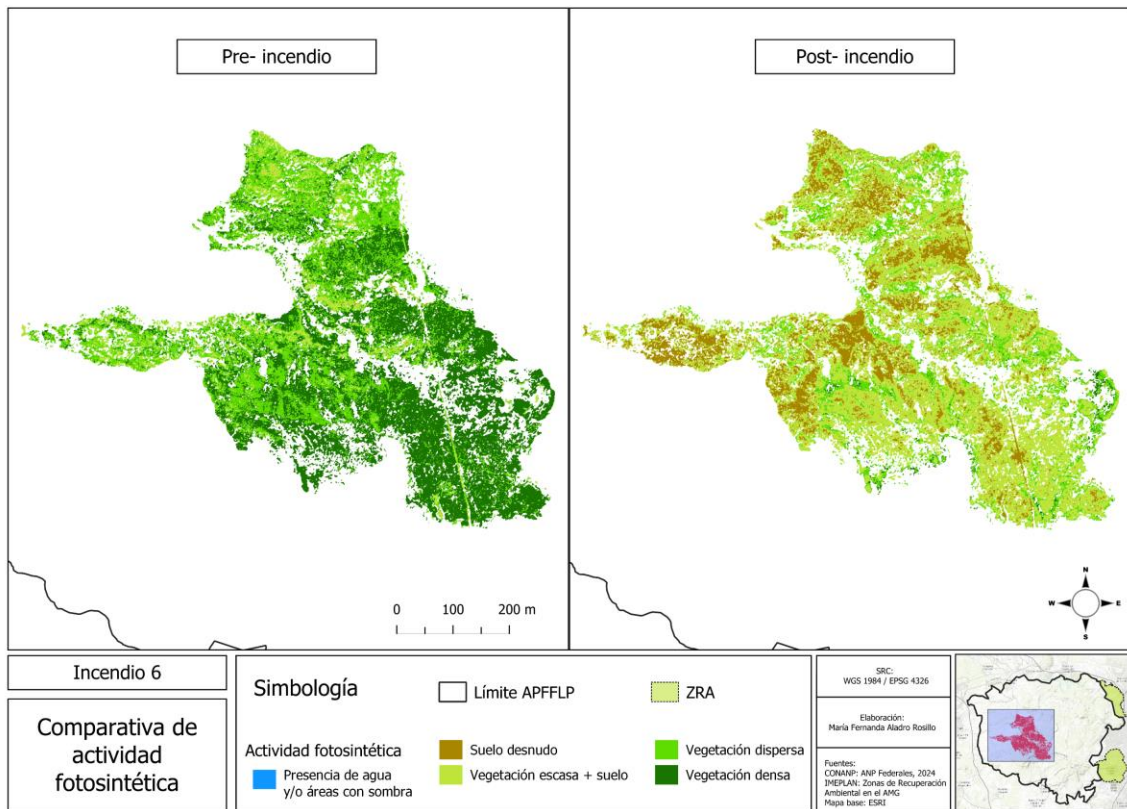


Figura 17. Actividad fotosintética, incendio 6

Por último, el área quemada en el predio Los Avestruces (incendio 7.1) estaba conformado principalmente por vegetación escasa y suelo, la cual abarcaba un 68% de la zona (figura 18). En cambio, en el predio La Tecomata (incendio 7.2), el mismo tipo de vegetación comprendía un 71% de la superficie total que posteriormente fue quemada.

Aunado a lo anterior, el 31% de la zona del primer predio mencionado correspondía a vegetación dispersa. Posterior al incendio, un 61% del área presentó suelo desnudo, dejando un 38% cubierto por vegetación escasa mezclada con suelos.

Asimismo, en la zona del predio La Tecomata, aún se podía observar vegetación dispersa en un 16,2% de la superficie afectada. Además, las áreas con vegetación escasa disminuyeron solamente a un 60% (figura 18).

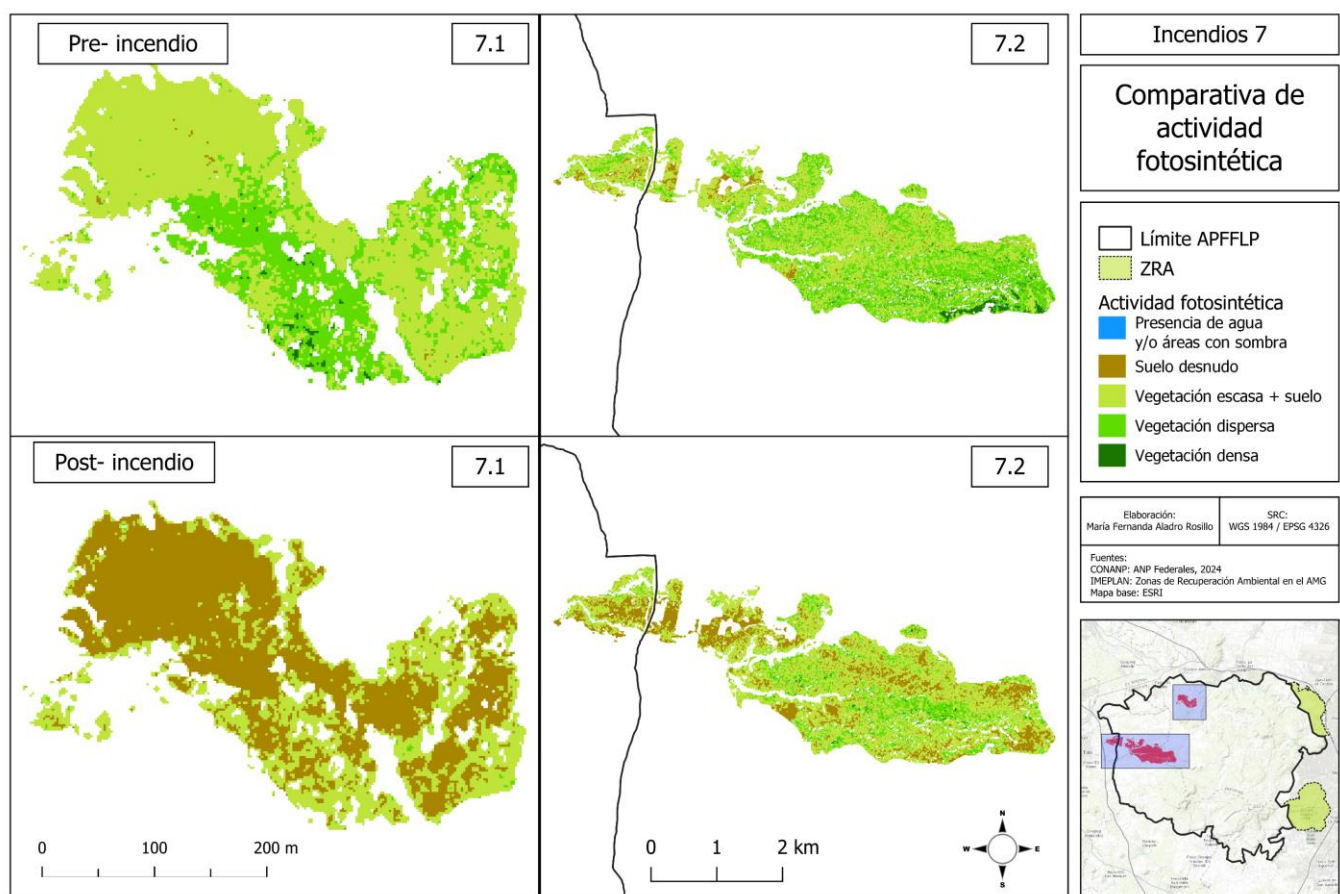


Figura 18. Actividad fotosintética, incendios 7

5.3 Regeneración vegetal

Determinación de la regeneración vegetal mediante Δ NBR

La mayoría de los incendios ocurridos, a excepción del número 5 (predio Volcanes, 2021) y 3 (predio Las Mesitas, 2019), un año después de cada suceso, presentaron una severidad baja, al igual que zonas estables o que ya no manifestaban señales de quemado.

En el incendio 1 (predio San Miguel, 2018), a un año de haber sido afectado por el incendio, únicamente 17 ha presentaron crecimiento de vegetación post-incendio. Un total de 913,52ha de la zona tuvieron un nivel bajo de severidad. Asimismo, aún había áreas que manifestaron severidad moderada-alta y alta, sumando un total de 38 ha. Sin embargo, la mayor parte de la superficie quemada en el año 2018 presentó estabilidad para el año 2020 (figura 19).

Las zonas afectadas por los incendios 2 presentaron en conjunto, más del 50% de la superficie afectada como zonas estables o sin quemar. Sin embargo, la zona ubicada en la parte sur del predio San José de la Montaña, no tuvo una buena regeneración, ya que casi en su totalidad, presentó niveles de severidad entre moderada y moderada-alta (figura 19).

En un 2,3% del total de la superficie afectada en el incendio número 3, aún había presencia de zonas con severidad alta y un 9,8% presentó niveles moderados-altos de severidad. El 37% aún se podía considerar como áreas con severidad baja, mientras que en un 36% existía estabilidad. Por último, menos del 1% de la zona presentaba recrecimientos de vegetación (figura 19).

A pesar de que el área afectada en el predio Cajetes (incendio 4) es una zona de solapes, no se identificaron zonas con severidad alta. Solo el 10% de la zona mostraba niveles de severidad moderada o moderada-alta, mientras que el 47% presentaba niveles de severidad baja. Además, el 42,5% del área ya se encontraba estable y no mostraba señales de afectación por el incendio. Esto podría deberse a que la zona noroeste del área quemada se encuentra cercana a uno de los cauces perennes del APFFLP, así como al hecho de que la zona no es posible acceder fácilmente debido a las pendientes pronunciadas (figura 20).

En el predio Volcanes, 673,3 ha que fueron afectadas en el año 2021, aún presentaban niveles de severidad moderada, las cuales representaban un 30,24% de la superficie total. El 26% todavía mostraba una severidad moderada-alta, y casi el 24% severidad baja. Únicamente el 15% del área presentaba recrecimiento de vegetación o zonas estables (figura 20).

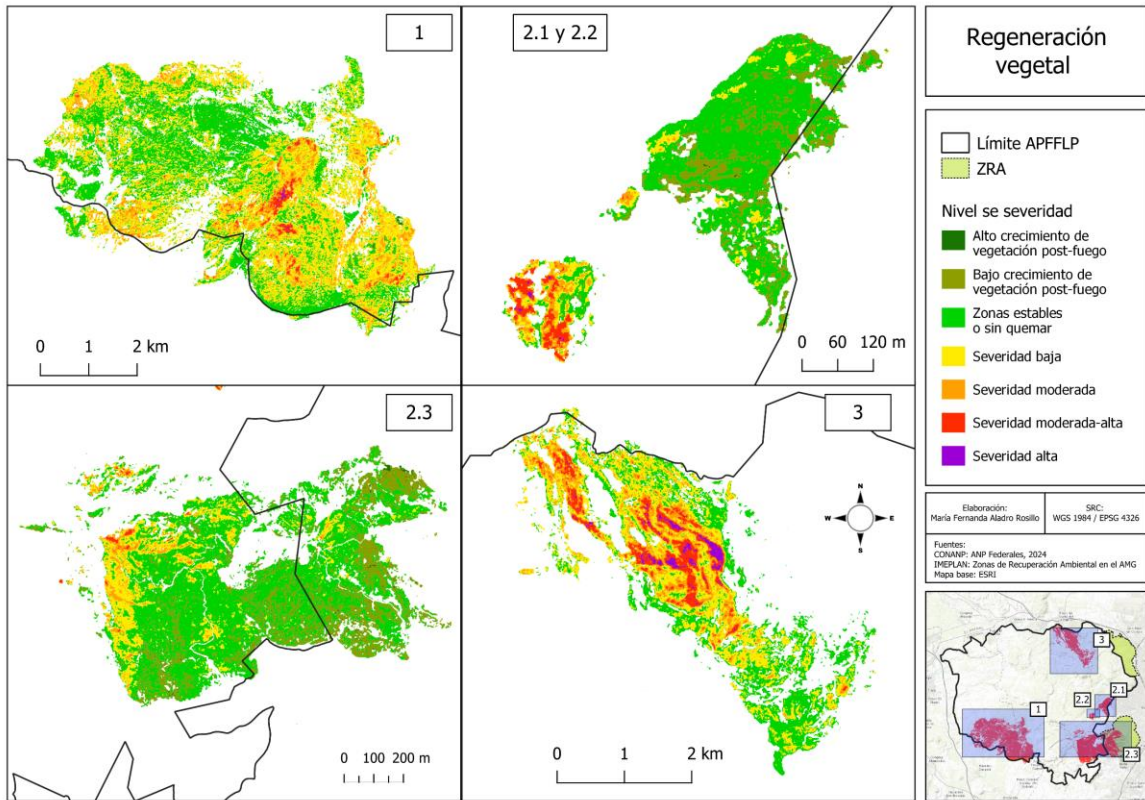


Figura 19. Regeneración vegetal, incendios 1, 2 y 3

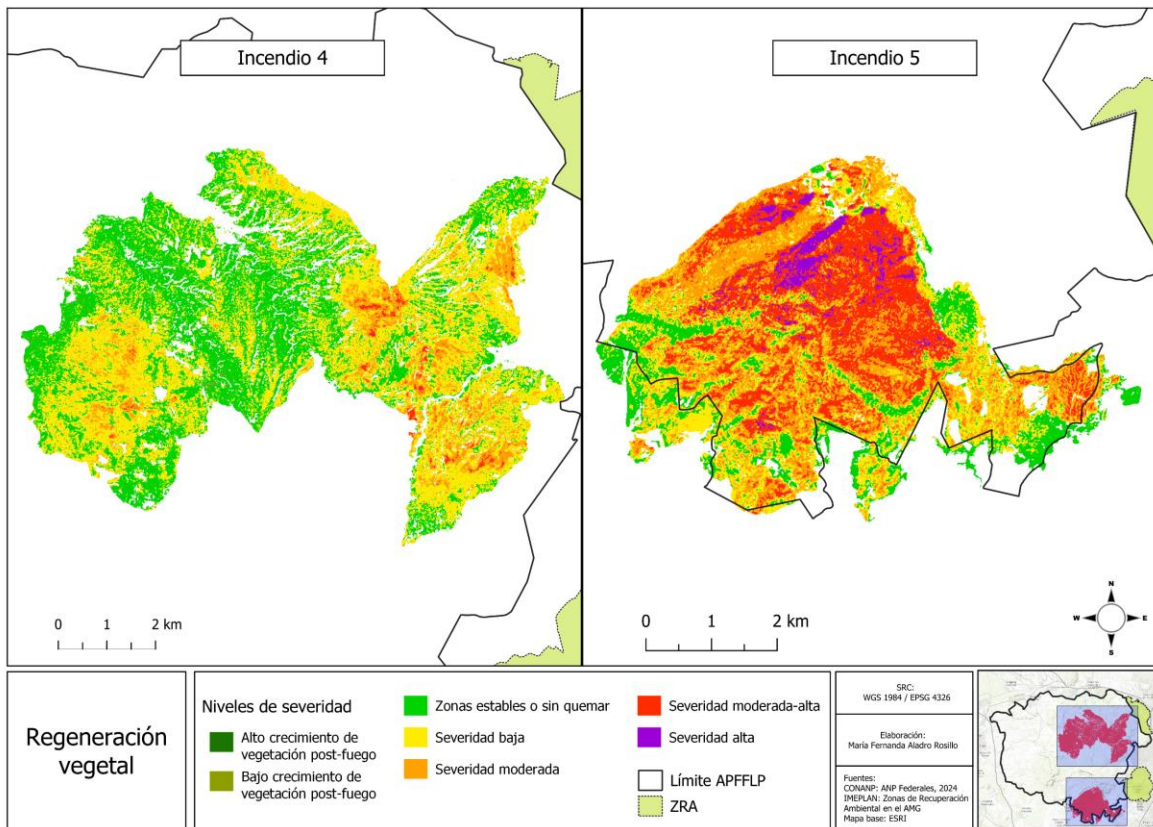


Figura 20. Regeneración vegetal, incendios 4 y 5

El 88,7% de la superficie quemada en el incendio 6 (predio Cajetes, 2021) presentaba niveles de severidad baja (44,7%) y zonas estables o sin quemar (44%). Aunado a lo anterior, aproximadamente 132 ha aún mostraban niveles moderados-altos de severidad. Además, menos el 1% presentó alto crecimiento de vegetación (figura 21).

Por último, los incendios número 7 (7.1 y 7.2) presentaron en su mayoría zonas estables. Solo un 1,55% de ambos incendios presentó una severidad moderada-alta. Asimismo, había áreas con alto recrecimiento de vegetación, pero representaron un porcentaje menor a 1 (figura 21).

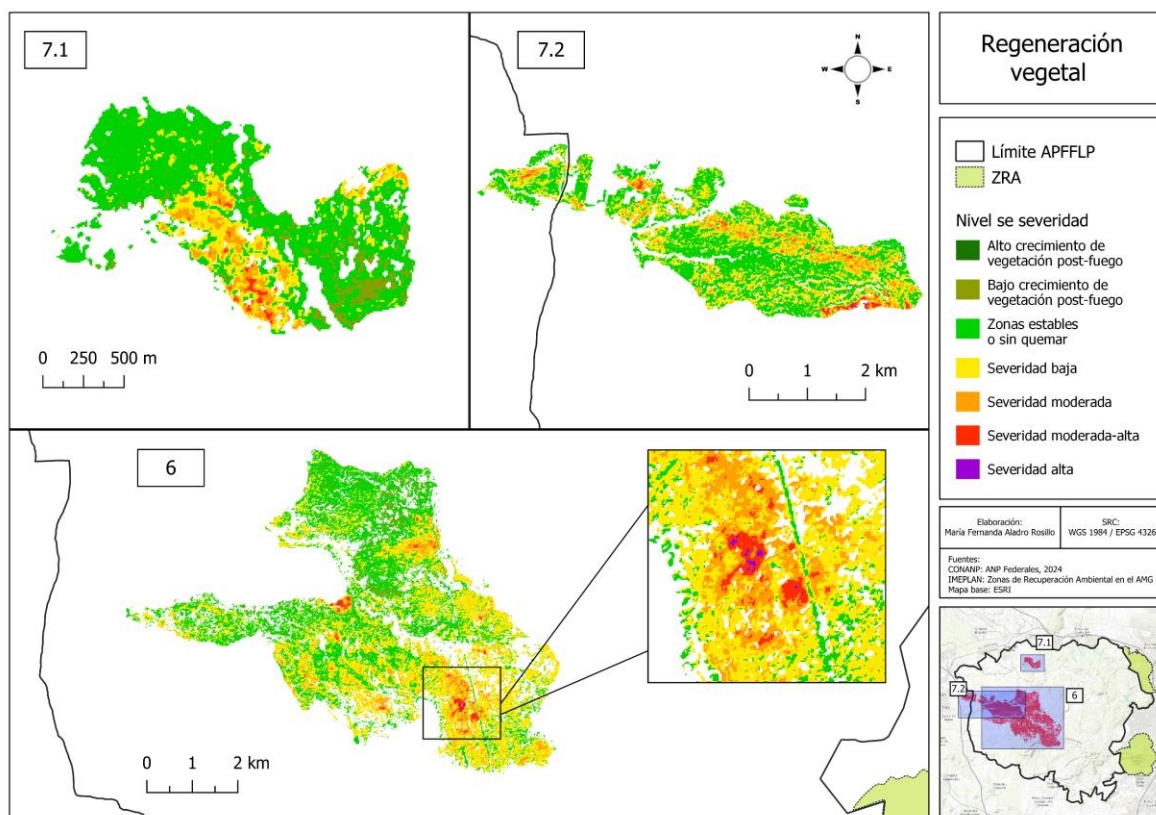


Figura 21. Regeneración vegetal, incendios 6 y 7

Determinación de zonas que presentan afectaciones por incendios mediante la comparativa entre NDVI pre y post-incendio.

Con base en los valores de Δ NDVI obtenidos mediante la diferencia entre el NDVI post-incendio (un año después del suceso) y pre-incendio (fecha más inmediata al suceso) de las imágenes post-incendio, se identificaron las zonas que aún presentan señales de impacto por el fuego. Para ello se realizó el mismo proceso de segmentación descrito en el apartado “Delimitación del área quemada”.

Las áreas resultantes coinciden con las clasificaciones del Δ NBR, ya que las áreas delimitadas por el NDVI son aquellas que previamente se identificaron con algún nivel de severidad un año después.

Al comparar estos resultados con las superficies de cada delimitación de los incendios elegida con base en el índice M en el apartado de “segmentación”, todas las áreas quemadas han tenido una reducción en el total de hectáreas afectadas (tabla 13).

No. Incendio	ha incendio	ha dNVDI reg	diferencia (ha)	% que sigue afectado
1	2.246,27	502,36	1.743,91	22,36
2	1.514,03	83,56	1.430,47	5,52
3	670,91	203,77	467,14	30,37
4	4.377,41	1.039,81	3.337,60	23,75
5	2.226,61	1.567,26	659,35	70,39
6	2.246,27	756,39	1.489,88	33,67
7	931,13	118,14	812,99	12,69

Tabla 13. Porcentaje del área que sigue afectada por el incendio un año después

Como se puede apreciar, el incendio que menor recuperación tuvo fue el ocurrido en el predio Volcanes (número 5), y más de la mitad de la superficie afectada seguía presentando señales de severidad del fuego un año después del suceso.

5.4 Pendientes

Siete de las diez áreas afectadas por incendios están compuestas en un 30-40% de su superficie total por pendientes de un rango entre 10°-20°, solamente las áreas de los incendios 6, 7.1 y 7.2 tienen pendientes de entre 5-10° en un 30% de su superficie. Es decir, las pendientes no son abruptas en casi la mitad de las zonas quemadas (figuras 22 y 23).

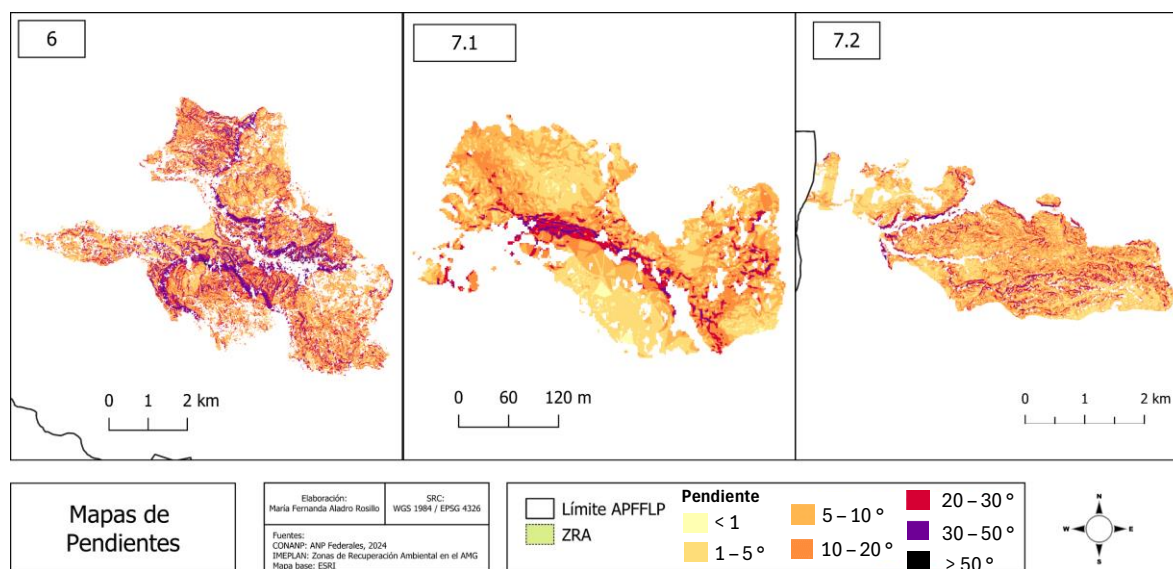


Figura 22. Mapa de pendientes, incendios 6 y 7

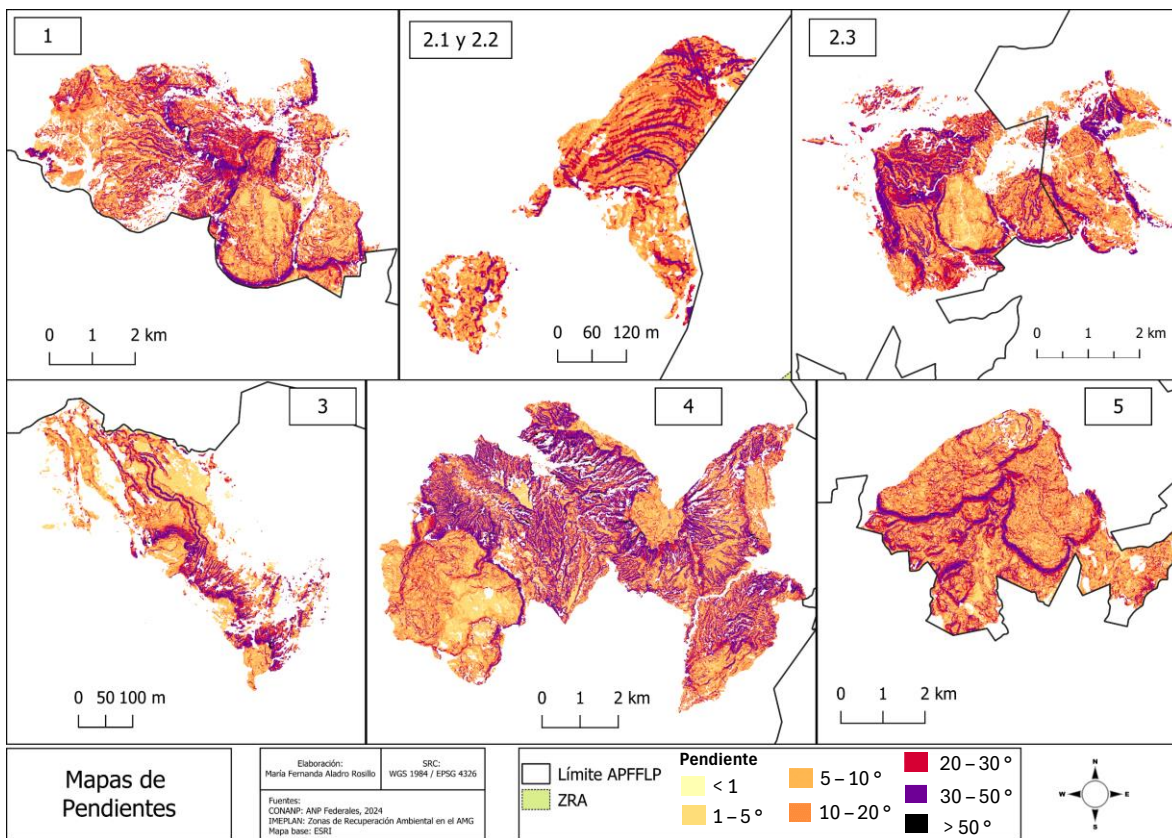


Figura 23. Mapa de pendientes, incendios 1-5.

Es evidente la relación de las clases de las pendientes con la severidad del incendio, ya que donde los niveles de severidad son más altos, las pendientes tienden a ser más pronunciadas. En la zona oeste del incendio 2.3 (predio los Asadores, 2019) y en la parte del sureste del incendio 4 (predio Las Canoas, 2021) se observó que los patrones de inclinación y de severidad son casi idénticos. Además, posterior a un análisis de superposición de capas, en las zonas de los demás incendios, las áreas con una severidad moderada-alta o alta, están ubicadas cerca de pendientes de clase 6 (30°-50°) y 7 (>50°), a excepción del incendio al noreste del predio San José de la Montaña (2.1) y el incendio en el predio La Tecomata (incendio 7.2).

Además de lo anterior, en el predio San Miguel, donde tuvo lugar el incendio 1, el 33% de la superficie afectada consiste en pendientes de clase 4, mientras que el 26% corresponde a pendientes de clase 5 (20°-30°).

En la zona del incendio 2.1 (predio S.J de la M, 2019), menos del 1% de la superficie está formada por pendientes superiores a 5°. Además, el 70% del área está compuesta por pendientes de clase 4 (10°-20°) y 5 (20°-30°), representando el 26% y el 44%, respectivamente, y el 15% de la superficie son pendientes que van desde 5° hasta 10°.

En el incendio 2.2 (predio S.J de la M -sur-, 2019), el 17,76% del área está conformada por pendientes de clase 5 (20°-30°) y no hay presencia de pendientes de clase 7.

La zona afectada por el incendio en el predio Los Asadores está conformada principalmente por pendientes de clase 4 (10°-20°) y 5 (20°-30°), las cuales abarcan un 33 y 26% del área. Asimismo, el 18% son pendientes correspondientes a un rango de entre 30° y 50°.

El 40% de la superficie afectada por el incendio 3 (predio Las Mesitas, 2019) está compuesta por pendientes de clase 2 y 3, representando cada una el 20%. Además, el 27% del área corresponde a pendientes de clase 4, el 18% a pendientes de clase 5 (20°-30°) y el 13% a pendientes de clase 6 (30°-50°).

En el incendio 4 el 1,15% de las pendientes son mayores a 50%, mientras que el 27,6% corresponden a pendientes entre 10° y 20°, seguidas por pendientes que oscilan entre los 30° y 50°, las cuales representan el 22%. Este rango de pendientes está distribuido por toda el área afectada a excepción de la zona al oeste.

Debido a que esta área tiene las pendientes más abruptas, se puede explicar la extensión del incendio, ya que, como se mencionó anteriormente, las pendientes muy inclinadas facilitan la propagación del fuego.

El incendio 5 (predio Volcanes, 2021) presenta mayormente pendientes de clase 4 (10°-20°) y 5 (20°-30°), que en conjunto corresponden aproximadamente al 60% del área afectada. El 19,5% del área está compuesta por pendientes que van de 5° a 10°. Además, casi el 10% corresponde a pendientes de clase 6 (30°-50°) y otro 10% a pendientes de clase 2 (1°-5°).

La zona del incendio 6 (predio Cajetes, 2021) está formada principalmente por pendientes de clase 3 (5°-10°) y 4 (10°-20°), las cuales abarcan el 22 y 35% respectivamente. Aunado a lo anterior, en el 18,5% del área las pendientes varían entre los 20° y 30° de inclinación. En cuarto lugar están las pendientes de clase 2 (1°-5°), que representan al 13% de la zona quemada. Asimismo, el 10,76% tiene pendientes entre 30° y 50°, y menos del 1% son pendientes de clase 7 (>50°).

Por último, los incendios correspondientes a la numeración 7, se encuentran cerca de las periferias del APFFLP en donde las pendientes no presentan cambios abruptos.

La zona afectada número 7.1 está conformada por porcentajes iguales de pendientes de clase 3 (5°-10°) y 2 (1°-5°), que en conjunto representan el 64% de la superficie total del incendio. Además, el 23% tiene pendientes entre 10 y 20°.

El 60% de la superficie incendiada en el predio La Tecomata se conforma por pendientes de las clases 3 (5°-10°) y 4 (10°-20°), cada una abarcando el 30% de la zona. Asimismo, el 27%

son pendientes de clase 2 (1°-5°), el 8,6% de clase 5 (20°-30°) y menos del 1% son pendientes con una inclinación mayor a 50°.

5.5 Identificación de áreas incendiadas en más de una ocasión desde 2012 a 2023

En total resultaron 36 polígonos que suman un total de 5.836,38 hectáreas afectadas por incendios en más de una ocasión. Del total de áreas, 16 (81,75 ha) fueron afectadas en tres años distintos, 20 (5.737,251 ha) en dos años y 2 (17,38 ha) se quemaron durante el mismo año (figura 24).

Aquellas zonas donde han ocurrido incendios en tres años distintos, se encuentran en el Cerro del Colli, ubicado al este del APFFLP. Este cerro es una de las principales áreas de La Primavera que sufre presión para urbanizar.

De las zonas que han sido afectadas en 2 años diferentes destacan aquellas que intersecan con el incendio ocurrido en el 2012. Las demás se distribuyen principalmente por la zona sur del APFFLP, donde se encuentran zonas de agricultura.

El solape más grande corresponde al incendio en el predio Las Canoas en 2021 y al gran incendio forestal ocurrido en 2012, lo que significa que casi toda el área afectada en 2021 se superpone con la del incendio de 2012, dando como resultado un solape de 4.372 hectáreas (figura 24).

El segundo solape más extenso abarca un área de 377,45 ha, habiéndose quemado primero en el año 2018 y en el 2023 por segunda vez. Este solape se encuentra en la zona sur del APFFLP, en el predio San Miguel. Ambos incendios se catalogaron como intencionales por actividades agrícolas.

El tercer solape de incendios con mayor superficie afectada se encuentra en el predio Las Mesitas, al norte del área de estudio, y tiene un total de 326,64 ha, las cuales sufrieron el impacto del fuego en los años 2012 y 2019.

La mayoría de los solapes ocurren en zonas cercanas a la periferia del ANP, y de acuerdo con el CNPIF, ninguno de estos incendios ha ocurrido por causas naturales, a excepción del ocurrido en el predio Cajetes (incendio 6).

Asimismo, el Cerro del Colli es donde hay más frecuencia de este tipo de fenómenos, ya que desde el año 2015, este sufre por lo menos 1 incendio al año, lo cual podría deberse a la presión que la población ejerce sobre la zona con el fin de urbanizar.

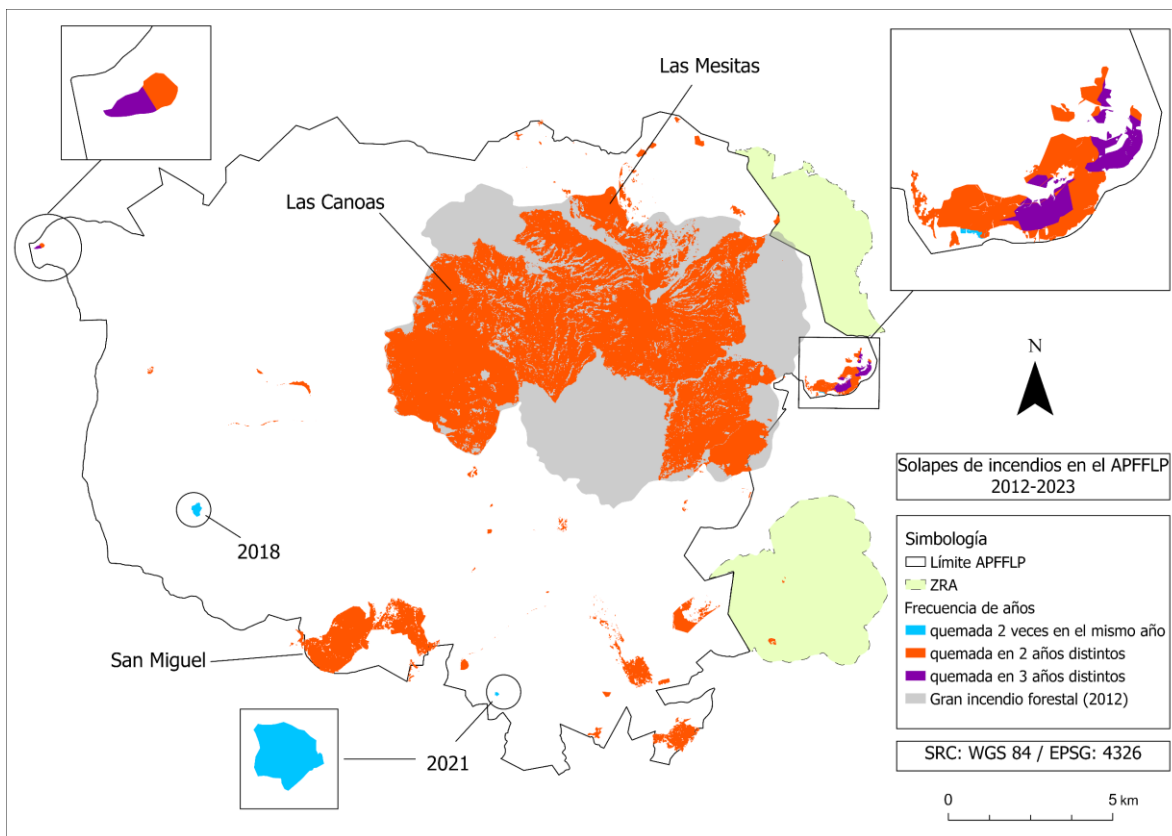


Figura 24. Solapes de incendios en el APFFLP

Llama la atención que las zonas más extensas que para el 2024 analizadas en el apartado “Estado actual del APFFLP” siguen presentando severidades altas de incendios, no siempre se sobreponen con las delimitaciones de las áreas que han sido quemadas en más de una ocasión. Sin embargo, hay superficies que para 2024 aún presentan niveles de severidad bajos que sí coinciden con zonas de solapes de incendios. Aquellas que destacan se encuentran en la parte norte del APFFLP, donde ocurrió el incendio 3 (predio Las Mesitas, 2019); al este del incendio 4 (Las Canoas, 2021) y sobre todo, en la periferia del Cerro del Colli.

Además hay solapes con menor superficie donde la vegetación muestra niveles de severidad baja o moderada. Estos se encuentran a las orillas de la zona que afectó el incendio ocurrido en 2021 en el predio Volcanes; también hay solapes ubicados en la parte central del APFFLP y en el área del incendio 2.2 (predio S.J de la Montaña -sur-, 2019) que intersecan con zonas con algún nivel de severidad (anexo 13).

5.6 Cambios en la cantidad de edificaciones y vías de comunicación

En cinco de las diez áreas afectadas por incendios, incluyendo el radio de 500m a su alrededor, la cantidad de vías parece haberse reducido desde 1995 a 2019. Tal es el caso del incendio 1 (predio San Miguel, 2018), ya que, según las cartas vectoriales de topografía del INEGI, en 1995 existían 36 vías, y en el año 2019 se redujeron a 27. Se deduce que la causa de esta diferencia es que dos senderos fueron abandonados y los demás linderos que no se trazaron en 2019 pertenecían a parcelas que han cambiado su superficie abarcada (figura 25).

El segundo buffer de incendio en donde resultó un decremento de vías fue el número 2.2, ocurrido en la sur del predio San José de la Montaña. En esta zona la diferencia es de 2 vías no representadas en la capa vectorial de 2019. Sin embargo, mediante vistas satelitales de Google Earth Pro y el mapa de Open Street Map se pudieron identificar 6 vías más para 2023, dos de las cuales son circuitos aparentemente pavimentados (figura 26).

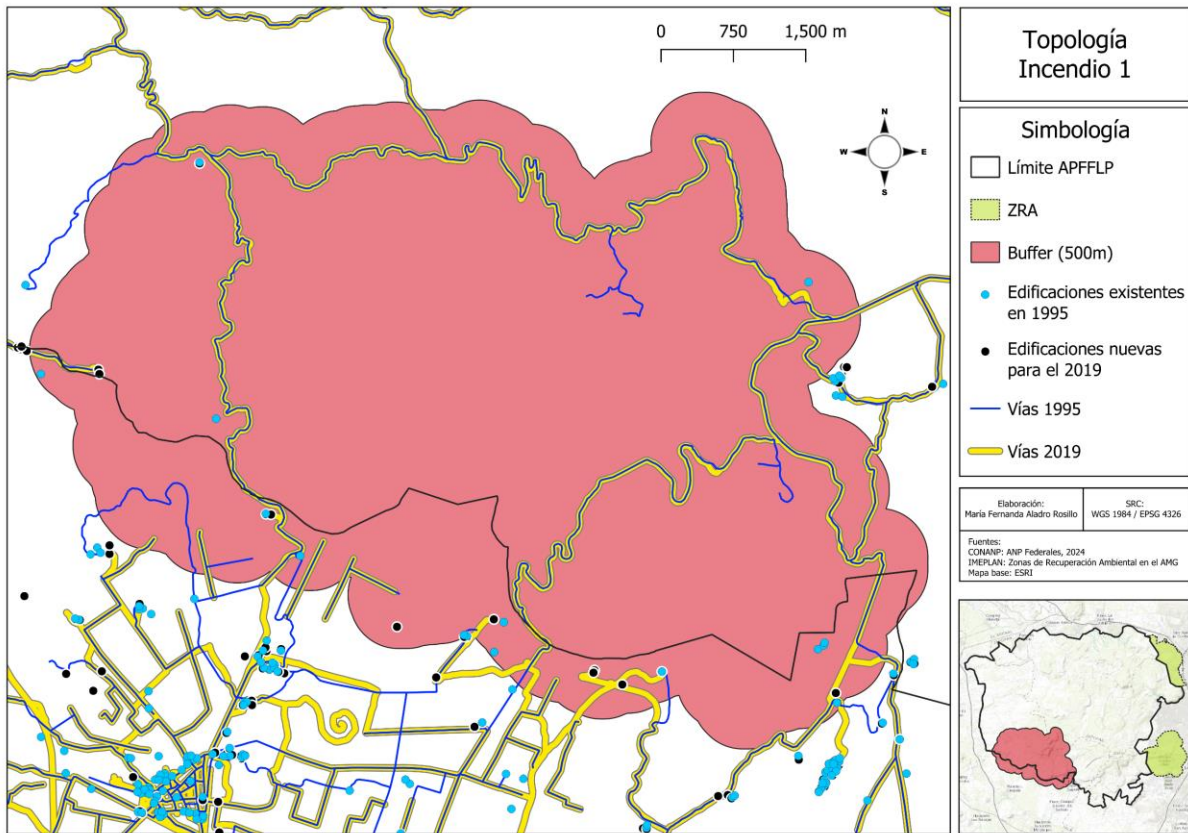


Figura 25. Topología del incendio 1

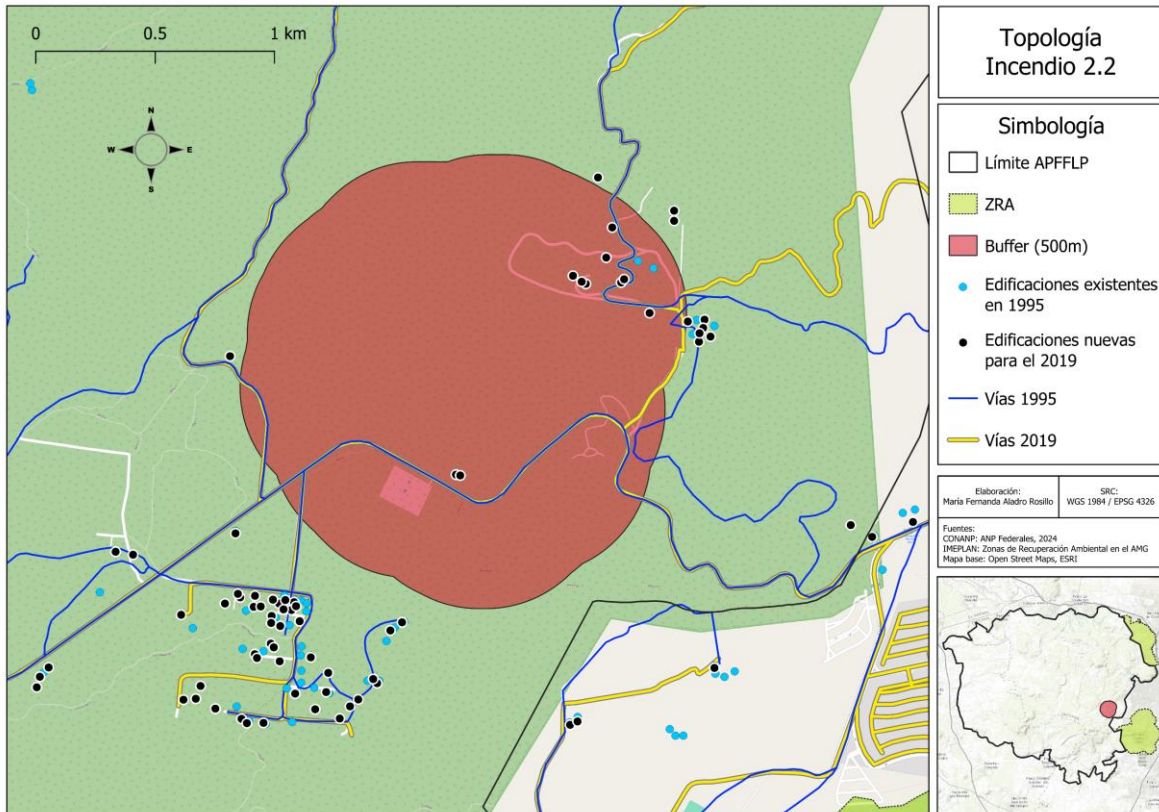


Figura 26. Topología del incendio 2.2

En la zona del incendio 7.2, al oeste del APFFLP, hubo una disminución de 8 vías de comunicación. En el año 2019 no se trazaron algunas sendas de terracería y dos caminos parecen haber sido abandonados.

Aunado a lo anterior, en la vista satelital del año 2010 se puede observar que en la parte noroeste del área afectada se inicia un cambio en el uso del suelo, y mientras pasan los años, la zona se convierte en una pista para motocross, la cual no se encuentra trazada ni en las cartas de topografía del INEGI ni en mapas base como Open Street Map (figura 27).

Las zonas restantes donde se mostraban decrementos de vías (incendios 3 y 6), resultó por diferencias en los trazados en cuanto a la cantidad de segmentos utilizados para digitalizar calles, senderos, etc. Pero en realidad hubo un aumento de vías (figuras 28 y 29).

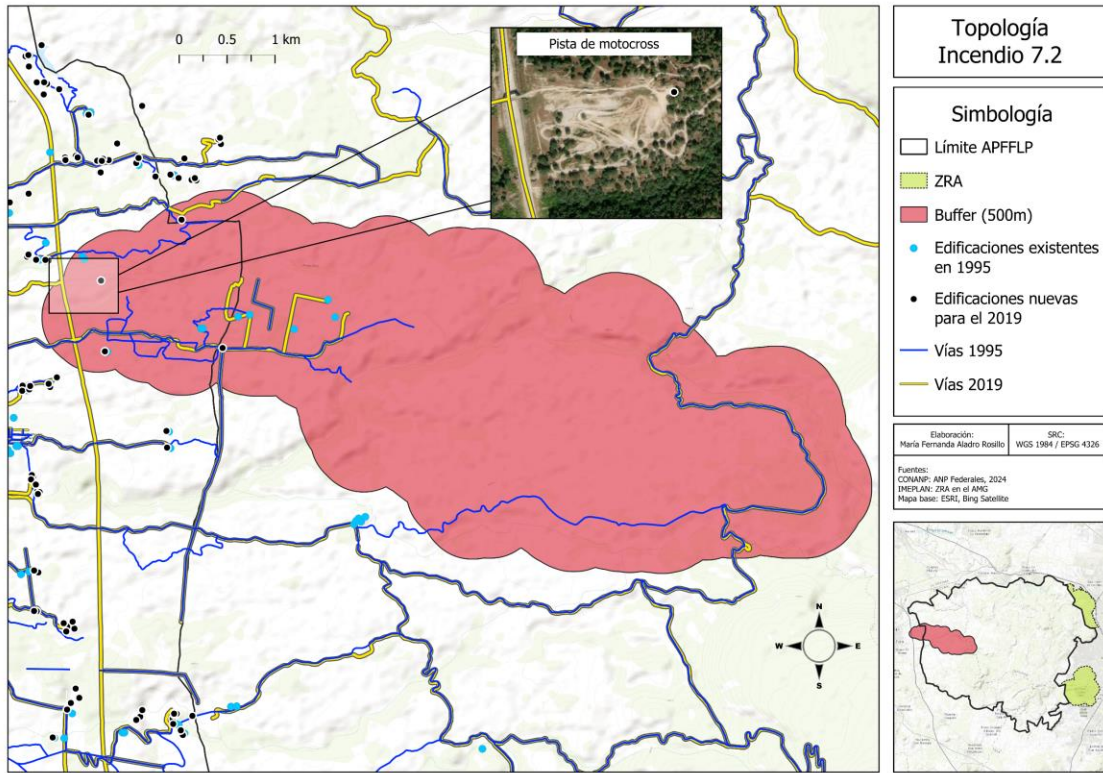


Figura 27. Topología del incendio 7.2

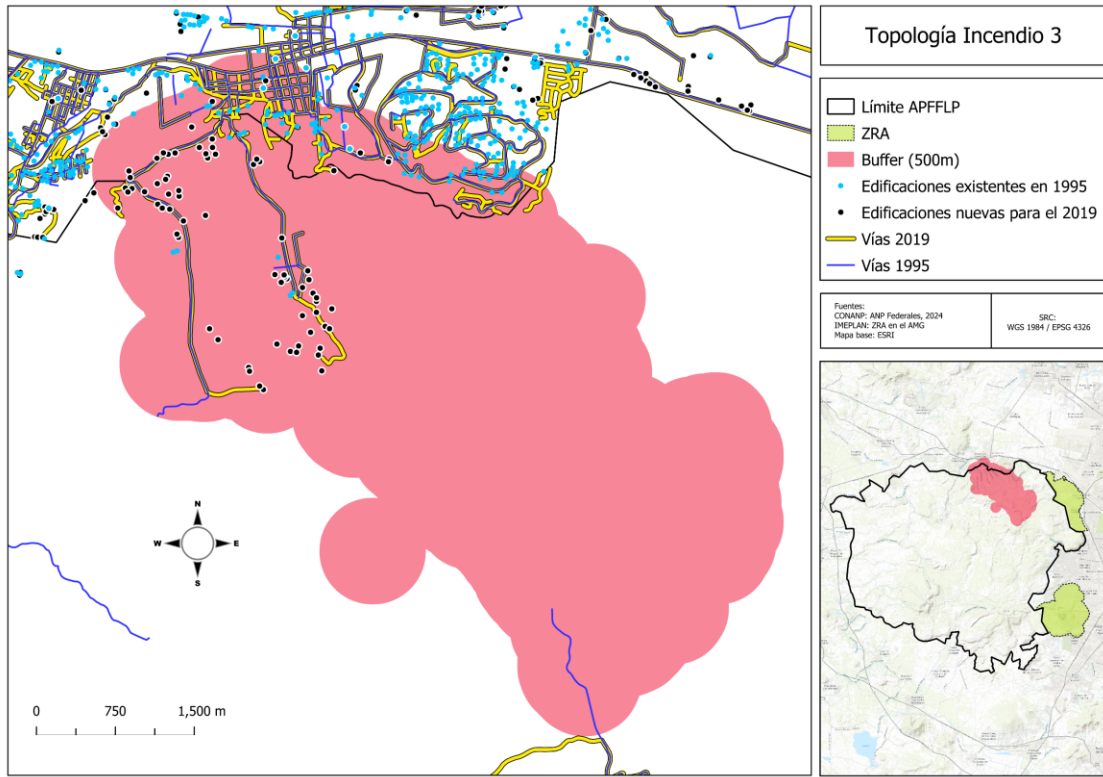


Figura 28. Topología del incendio 3

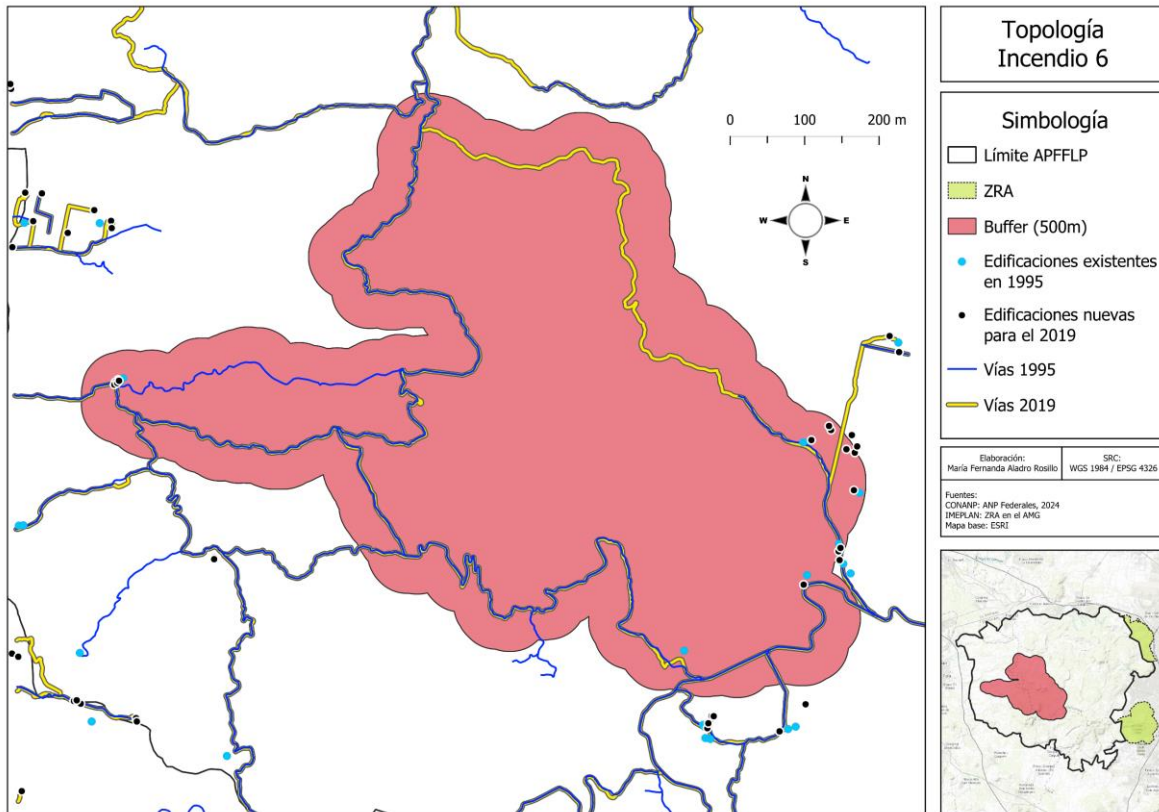


Figura 29. Topología del incendio 6

El área donde hubo un mayor incremento en la cantidad de calles fue en el incendio 2.1 (predio S.J de la M, 2019), ya que entre 1995 y 2019 se construyeron 134 vías nuevas. Asimismo, en la zona del incendio 2.3 (predio Los Asadores, 2019) se añadieron 114 vías. En los incendios 4 y 5 se registró un aumento de 32 y 45 vías respectivamente, mientras que en el área afectada del predio Canoas se despejaron únicamente 4 caminos nuevos. Sin embargo, uno de estos nuevos senderos es uno de los más extensos en todas las áreas afectadas por el fuego.

En algunas zonas de la periferia del ANP se puede notar por las digitalizaciones de vías que ha habido una expansión de las zonas residenciales. Esto es evidente especialmente en los buffer de los incendios 2.1, 2.3, 3, 4 y 5 (figuras 30, 31, 28, 32 y 33) aunque en donde hubo un mayor incremento de edificaciones es en el área del incendio en el predio Canoas (incendio 4), ya que en 1995 se registraron 40 edificaciones y en 2019 estas aumentaron a 72. Cabe señalar que en esta zona se ubican las hectáreas destinadas al aprovechamiento de geotermia de la CFE (figura 32).

Asimismo, en la superficie del incendio 5 (predio Volcanes, 2021), así como en su área de influencia, hubo un incremento de 27 edificaciones. En las áreas de los incendios restantes también se observaron más edificaciones en 2019 que en 1995, aunque este aumento no

rebasó las 10 edificaciones, se debe tomar en cuenta que el conjunto de datos topográficos no incluye absolutamente todas las edificaciones y éstas pueden representarse en conjunto como “área urbana”, las cuales no suelen digitalizarse dentro de ANP, es por esto que en los casos de los buffers de las zonas quemadas donde se aprecia un aumento en infraestructura como calles, caminos y carreteras, es más eficiente analizar dichas vías que las edificaciones para valorar la situación de cada zona.

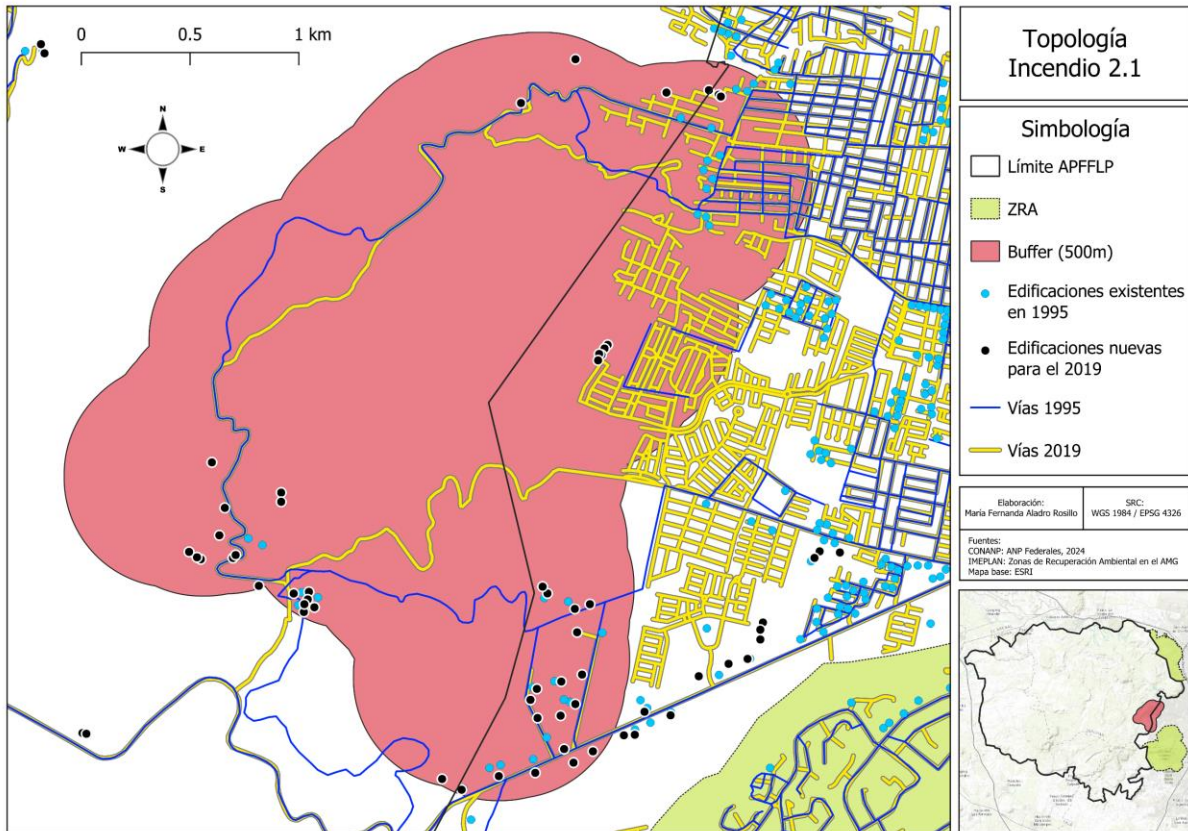


Figura 30. Topología del incendio 2.1

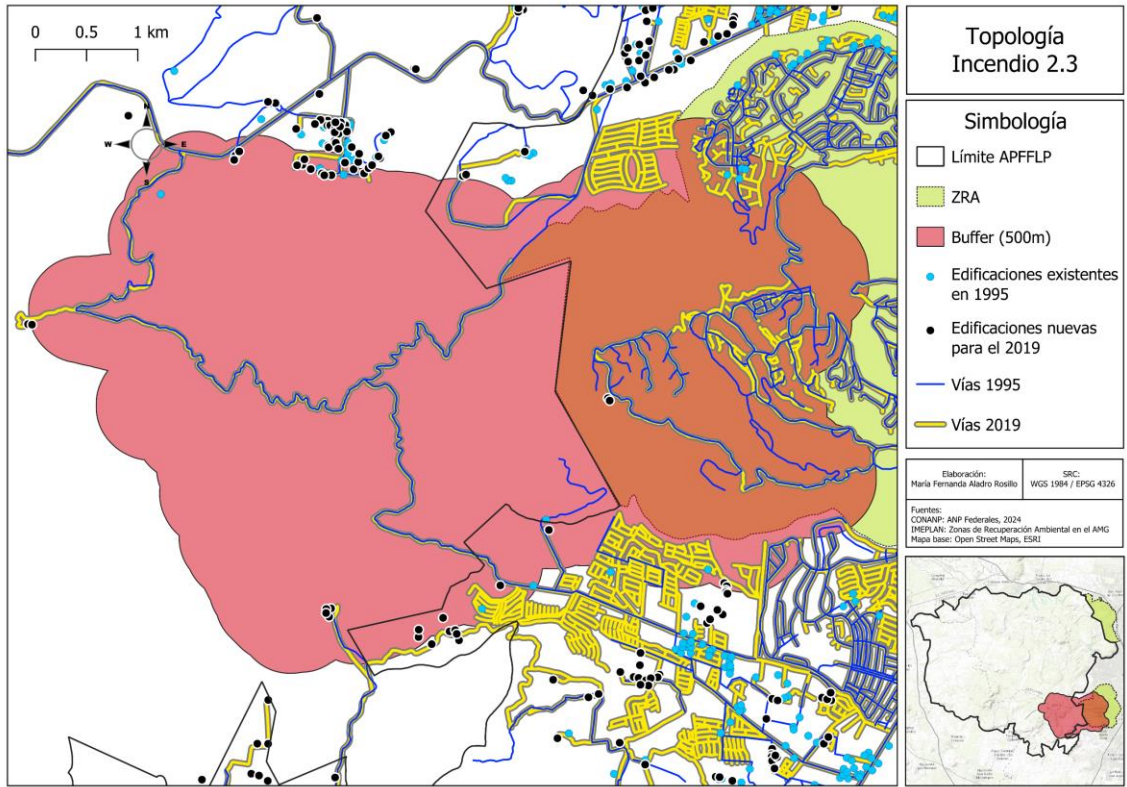


Figura 31. Topología del incendio 2.3

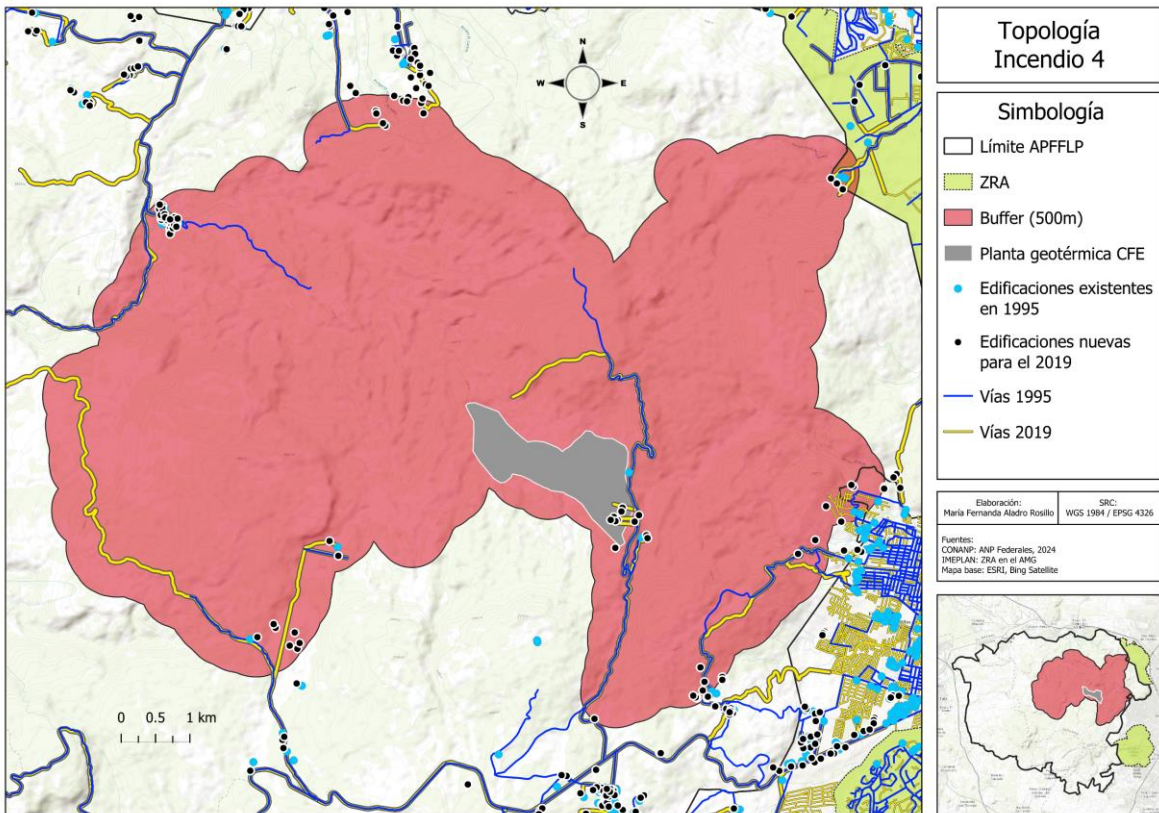


Figura 32. Topología del incendio 4

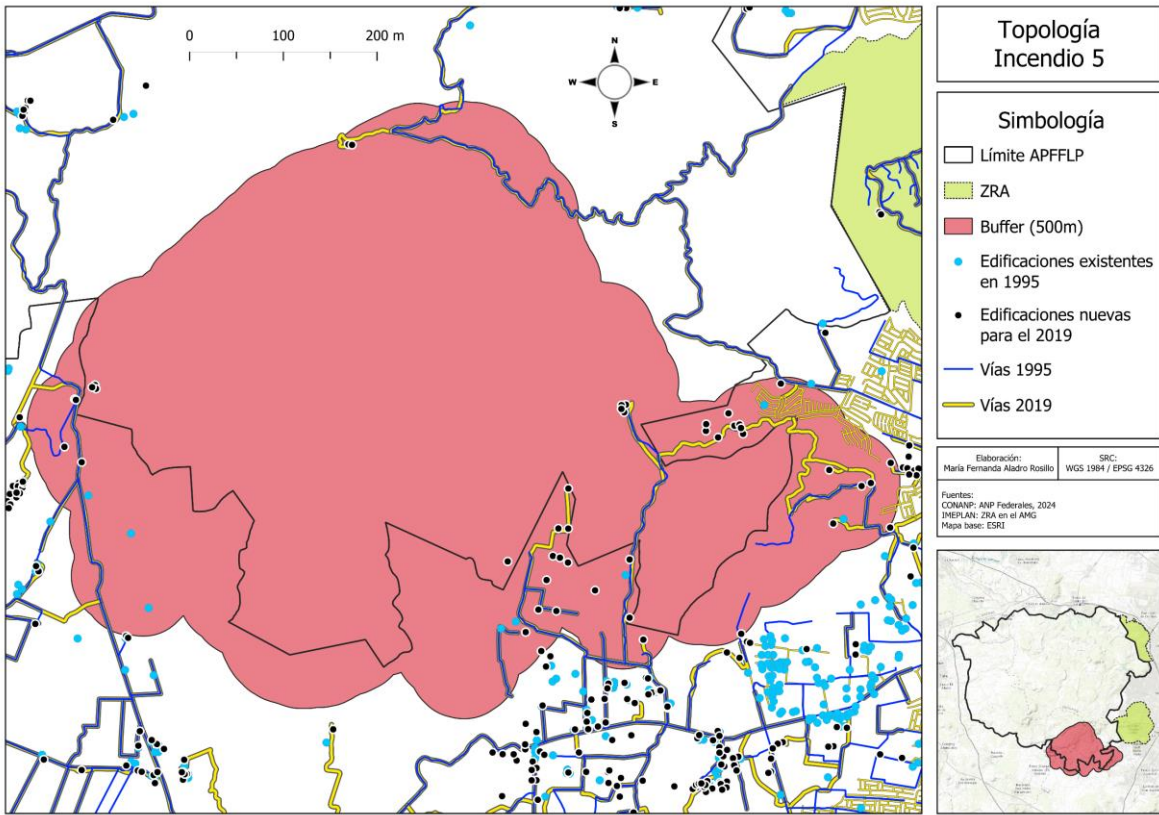


Figura 33. Topología del incendio 5

5.7 Temperaturas máximas en los días de inicio de los incendios

En ninguno de los días en que se originaron los incendios, las temperaturas fueron inferiores a los 30°C, y la temperatura máxima promedio registrada en el mes de abril para el estado de Jalisco fue de 30,8°C.

En los días de los incendios ocurridos en el año 2021 presentaron las temperaturas más altas, coincidiendo que en las tres fechas, la temperatura máxima fue de 37°C.

Asimismo, durante la fecha de inicio de los incendios ocurridos en el predio San Miguel, Las Mesitas y en la zona sur del predio San José de la Montaña, la temperatura alcanzó los 35°C.

Fecha de imagen Sentinel 2	No. Incendio	Predio (CNPIF)	fecha inicio	Temperatura máxima °C
13 de abril de 2018	1	San Miguel	10-abr-18	35
18 de abril de 2019	2	2.1: San José de la Montaña	11-abr-19	34,5
		2.2: San José de la Montaña	09-abr-19	35
		2.3: Los asadores	12-abr-19	34
18 de mayo de 2019	3	Las Mesitas	12-may-19	35
7 de abril de 2021	4	Las Canoas	31-mar-21	37
17 de abril de 2021	5	Volcanes	13-abr-21	37
17 de mayo de 2021	6	Cajetes	06-may-21	37
27 de abril de 2023	7	7.1: Los Avestruces	09-abr-23	30,8 **
		7.2: La Tecomata	24-abr-23	

** Datos del promedio de temperatura máxima mensual en el estado de Jalisco (cifra correspondiente al mes de abril 2023)

Elaboración a partir de datos de CONAGUA, 2024

Tabla 14. Temperatura máxima media en las fechas de los incendios

Como se puede observar, aparentemente existe una relación entre las temperaturas máximas alcanzadas en los días de inicio de los incendios, la extensión de ellos y la severidad, ya que en los incendios 4, 5 y 6 la temperatura máxima es mayor que en los demás; la extensión de los incendios mencionados (4, 5 y 6) es mayor a 2.000 ha y son incendios que presentaron severidades elevadas, a excepción del ocurrido en el predio Las Canoas (incendio 4).

5.8 Estado actual del APFFLP

De acuerdo con el Δ NBR calculado, el 74% del APFFLP se encuentra estable y sin señales de afectaciones por incendios y en el 13% hay presencia de bajo crecimiento de la vegetación post-fuego, y el 10,3% aún muestra una severidad baja de afectaciones por fuego. Sin embargo, con base en las cifras resultantes del Δ NDVI, el 5% de la vegetación en el ANP aún presenta impactos por incendios (figuras 35 y 36).

Además, en el 2018 se podían observar 13.360,4 ha de vegetación escasa combinada con suelos, las cuales aumentaron a 14.158,5 para 2024. Asimismo, en el 2018 las zonas cubiertas por vegetación densa representaban únicamente el 8% del APFFLP, las cuales disminuyeron al 6% para el 2024. Asimismo, en el año 2018, el 43% representaba áreas con vegetación dispersa, pero en el 2024 la superficie declinó a un 41% (figura 37).

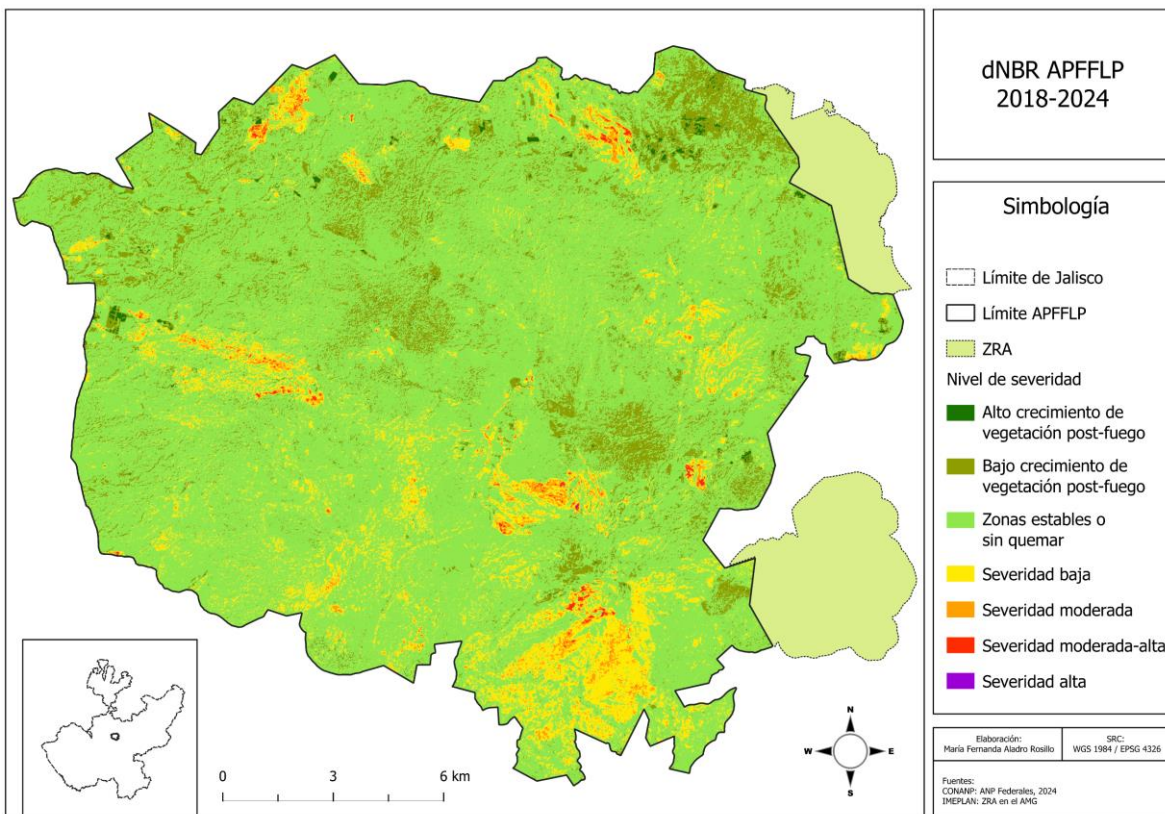


Figura 35. ANBR, APFFLP, 2018-2024

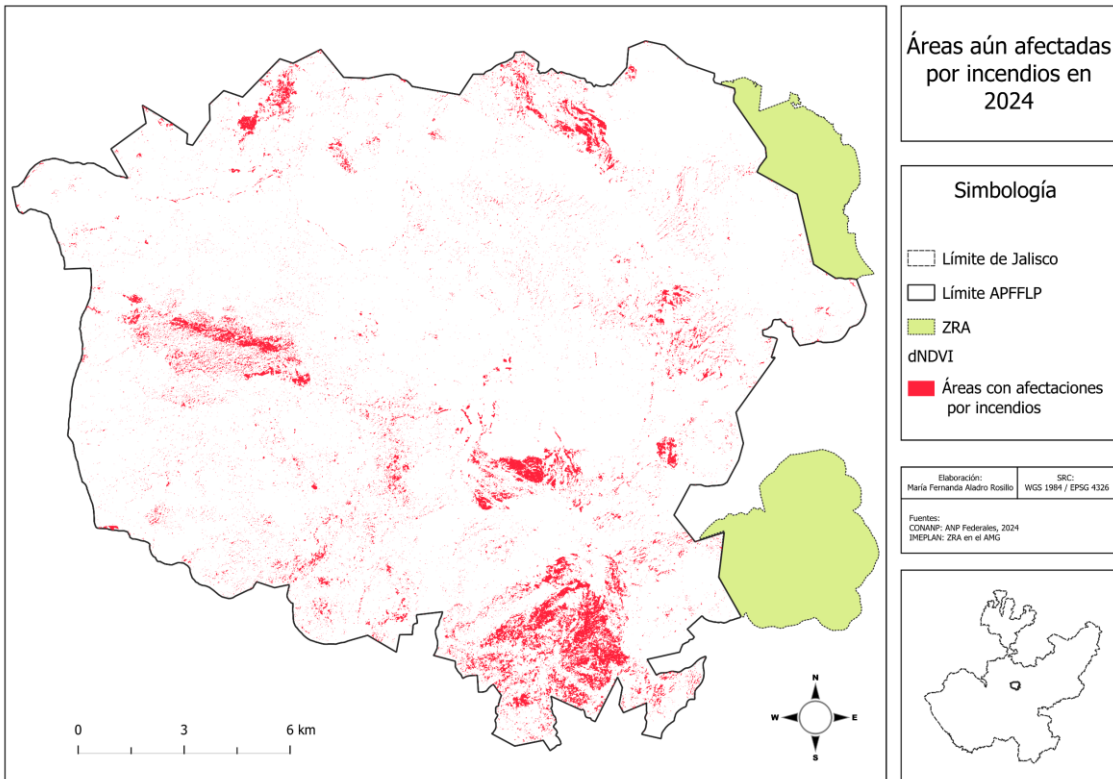


Figura 36. Áreas aún afectadas por incendios en 2024

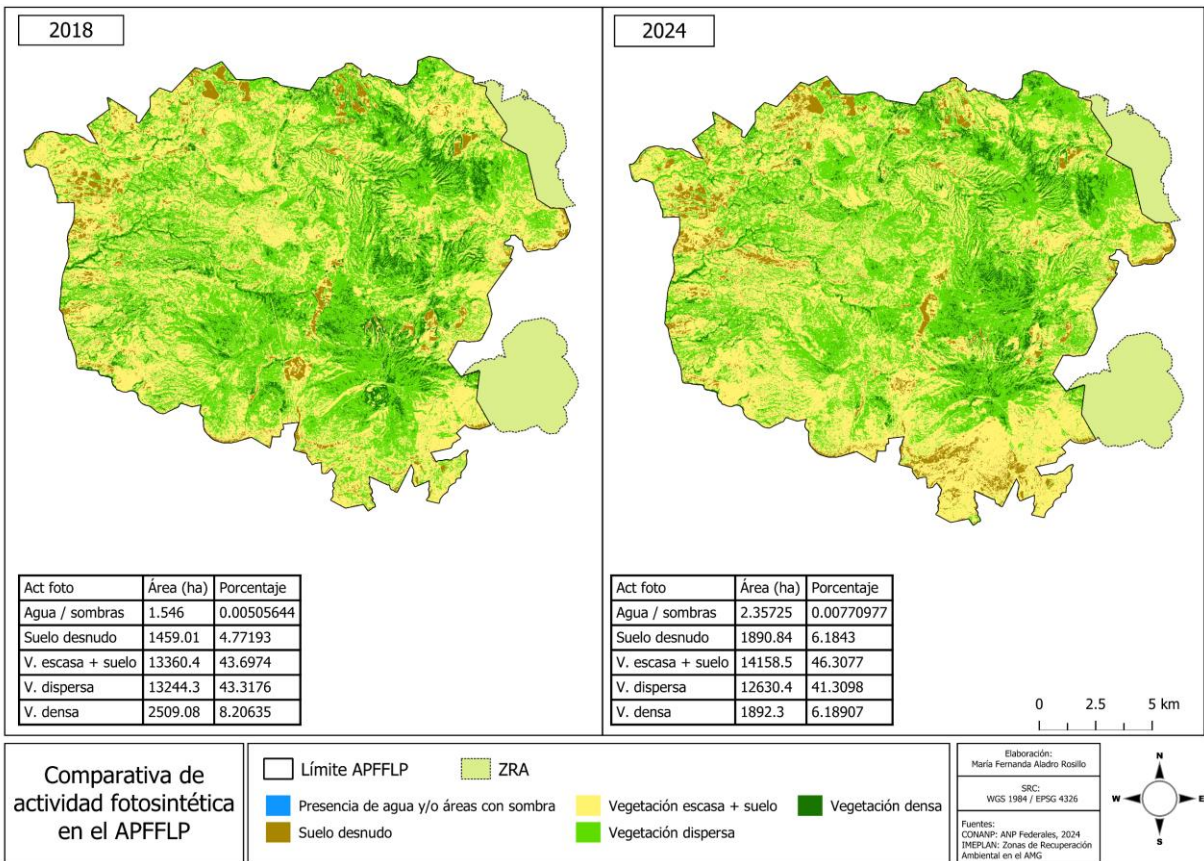


Figura 37. Comparativa de actividad fotosintética del APFFLP 2018-2024 (“.” Se utiliza como separador decimal)

Capítulo 6. Discusión y Conclusiones

La mayoría de los incendios no mostraron niveles de severidad tan elevados un año después de su sofocamiento. Asimismo, una gran cantidad de zonas, especialmente en las superficies de los incendios 5 y 6, se mantienen estables y presentando signos de regeneración vegetal; aunque, cabe mencionar que esto no significa que la vegetación haya vuelto a un estado completamente sano, sino que podría deberse a que existen brotes nuevos y crecimiento de pastos.

Además, hay zonas, como en los predios de Las Mesitas, Volcanes y La Tecomata, donde la regeneración es más lenta, por lo que existe la necesidad de un monitoreo continuo, porque además se encuentran muy cercanas a las áreas de cultivo, donde no se realizan rozas controladas que terminan por afectar a la vegetación y fauna del APFFLP. También se observó que los incendios recurrentes en las mismas áreas tienden a reducir la capacidad de regeneración de la vegetación, lo cual podría generar efectos negativos a largo plazo en la biodiversidad y estabilidad del APFFLP.

Aunado a lo anterior, la mayoría de las áreas incendiadas tuvieron una transformación significativa en la cobertura vegetal, ya que altos porcentajes de la vegetación fueron reemplazados por zonas con suelos desnudos, por lo que las acciones de restauración ecológica son esenciales, no solamente en cuanto a la vegetación, sino directamente sobre los suelos con el fin de evitar su erosión.

Las condiciones climáticas y topográficas jugaron un papel importante tanto en la propagación como en la severidad de los incendios. Las áreas con pendientes elevadas demostraron tener una mayor vulnerabilidad debido a la rápida propagación del fuego. Además, se identificó que las temperaturas en los días de inicio de todos los incendios consistentemente superaban los 30°C, lo que indica una correlación directa entre las altas temperaturas y el descontrol de los incendios forestales.

Llama la atención el aumento, tanto de vías de comunicación como de edificaciones, ya que podría estar relacionado con los cambios de uso de suelo, influyendo potencialmente en la probabilidad de ocurrencia de más incendios y la degradación del APFFLP. Esto sugiere que es de suma importancia una actualización en el Programa de Manejo del ANP, incluyendo la zonificación, así como un aumento en las medidas preventivas contra incendios forestales, al igual que un refuerzo en la legislación correspondiente a las rozas en las zonas de cultivo.

Es importante señalar que la comparación con los polígonos de incendios del CNPIF ha mostrado discrepancias en las delimitaciones, destacando la importancia de una actualización y transparencia de las metodologías utilizadas por las instituciones para crear información

geoespacial, así como una constante comunicación entre las diferentes entidades encargadas de gestionar áreas naturales y su protección.

Se encontró que los resultados obtenidos no coinciden con los oficiales. Por ejemplo, además de haber mostrado discrepancias en las delimitación, los valores de severidad del incendio ocurrido en el predio Volcanes (incendio 5) mostrados en el reporte creado por la SEMADET, y los valores estimados en el presente TFM también discrepan.

Los datos de severidad proporcionados en el informe oficial del incendio 5 indican que 53,93 hectáreas experimentaron una severidad alta, 829,38 hectáreas una severidad moderada-alta, 923,45 hectáreas una severidad baja a moderada, y 526,49 hectáreas un nivel de severidad bajo. Sin embargo, los cálculos realizados en este estudio muestran discrepancias en las áreas con severidad alta (809 hectáreas), moderada-alta (140,28 hectáreas), moderada (424,16 hectáreas), y baja (357,93 hectáreas).

Esto podría deberse a que la SEMADET consideró únicamente 4 clases de severidad, y se asume que se utilizó otra metodología (el informe no contiene información sobre la metodología).

Aunado a lo anterior, el reporte del incendio ocurrido en el predio Las Canoas publicado por la misma Secretaría antes mencionada, señala que el incendio tuvo en su mayoría una severidad baja, cuando en los valores calculados en el presente TFM indican que las zonas con niveles moderados suman la superficie más extensa (1.997,66 ha). Al contrario del informe del incendio 5 (predio Volcanes, 2021), el reporte del incendio en el predio Las Canoas sí explica la metodología utilizada. La mayor diferencia con la elegida para este estudio es que la SEMADET contaba con datos obtenidos en campo.

En este análisis se ha demostrado la eficacia de la teledetección y los SIG como herramientas para el monitoreo y evaluación de incendios en ANPs. Sin embargo, es importante señalar que los resultados obtenidos en el presente TFM podrían ser más precisos si se completara con salidas al campo, ya que la teledetección, a pesar de ser una excelente herramienta, no ofrece exactitud absoluta por sí sola. Por ejemplo, para determinar correctamente la severidad habría que validar el presente estudio con un trabajo de campo post incendio donde se calculen índices como el Composite Burn Index (CBI) y se relacionen con los valores espectrales de diferentes puntos de muestreo. Además, a pesar de que las segmentaciones de zonas quemadas resultaron con valores de índice M mayores a 1, los umbrales utilizados para las delimitaciones se probaron originalmente en ecosistemas mediterráneos, por lo que habría que validarlos en campo.

Otra razón por la que utilizar únicamente técnicas de teledetección merma la exactitud de los resultados es la limitación que pudiera existir de imágenes satelitales. Muchas veces no es posible obtener imágenes post o pre incendio inmediatas debido a las condiciones atmosféricas que presentan.

En conclusión, el presente TFM contribuye a una mejor comprensión de la dinámica de los incendios forestales en el Bosque La Primavera y proporciona una base sólida para futuras investigaciones y acciones de gestión y conservación en esta área natural protegida. Es esencial continuar desarrollando y aplicando tecnologías para el monitoreo ambiental, así como fomentar la colaboración entre instituciones y la participación de las comunidades locales, especialmente de los ejidatarios, para proteger y restaurar los ecosistemas afectados por incendios forestales.

Capítulo 7. Referencias Bibliográficas

Anzar Ortiz, K., Castorena Regalado, E. S., González Zamora, B., Guerrero Gamboa, P., Lamas Amezcua, M., Pasaye Esquivel, M. Á., & Franco Valencia, T. (2023). Restauración ecológica del Predio Sur del ITESO en el Bosque La Primavera. [Informe de proyecto]. Consultado el 9 de marzo del 2024. Obtenido de

<https://hdl.handle.net/11117/9478>

Arteaga Ccanchi, M. M., & Cornejo Serrano, E. S. (2021). Análisis multitemporal de Incendios Forestales en el Santuario Histórico de Machupicchu, 2008–2020. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad César Vallejo, Lima. Perú. 91 pp. Consultado el 15 de abril del 2024. Obtenido de

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72529>

Bastarrika Izagirre, A. & Chuvieco Salinero, E. (2006). Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones: aplicación en entornos mediterráneos con imágenes tm y etm+. *GeoFocus*, nº 6, p.182-204, ISSN: 1578-5157

Bastarrika, A., Chuvieco, E. & Martín, M. (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*. 115. 1003-1012. DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.005.

Carmo, M., Moreira, F., Casimiro, P., & Vaz, P. (2011). Land use and topography influences on wildfire occurrence in northern Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 100: 169-176. DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.11.017

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2021). Respuestas a Preguntas TEMA 1. Gobierno de México. Consultado el 20 de marzo de 2024. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/628521/RESPUESTAS_CHAT_TEMA1.pdf

Chuvieco, E. (2015). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta, S.A.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Base de datos climatológica. Estación 14351, Tala. Consultado el 10 de abril 2024. Obtenido de https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Diarios/jal/dial4351.TXT

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2000). Programa de Manejo: Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. (SEMARNAT, Ed.)

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2024). Metadatos: Áreas Naturales Protegidas Federales de México, 2024. Catálogo de metadatos geográficos. CONABIO. Consultado el 20 de febrero 2024. Obtenido de <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpfb2024gw.html>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010). Incendios Forestales: Guía práctica para comunicadores. Consultado el 5 de abril del 2024. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Programa de Manejo del Fuego 2020-2024. Consultado el 10 de abril del 2024. Obtenido de https://old-snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Incendios/2021/VF_Programa%20de%20Manejo%20del%20Fuego%2020-2024.pdf

Dye, B. (2012). La apasionante geología del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. *Revista Ciencia y Desarrollo*, 38(2), 45-56.

European Space Agency (ESA). (2017). Datos de Sentinel. Consultado el 20 de abril del 2024. Obtenido de https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Datos_de_Sentinel.

España-Boquera, M. L., Champo-Jiménez, O., & Uribe-Salas, M. D. (2024). Extensión y severidad de incendios forestales en Michoacán en 2021 a partir de imágenes Sentinel-2. *Polibotánica*, (57), 125-144. DOI: 10.18387/polibotanica.57.7.

FAO, Food and Agriculture Organization (2007). *Fire Management- Global assesment 2006*. FAO forestry paper No. 151. Rome, Italy.

Flores Garnica J.G, Flores Rodríguez A.G, Lomelí Zavala, M.E., Guzmán Ruiz, E., & García Bernal J.M., (2020). Evaluación de la respuesta de la regeneración natural en áreas bajo diferentes condiciones de impacto por incendios forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). ISBN: 978-607-37-1294-1.

Flores Garnica J.G, Flores Rodríguez A.G, & Lomelí Zavala, M.E. (2021). Análisis de imágenes satelitales y aplicación de índices espectrales en incendios forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. ISBN: 978-607-37-1322-1.

Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2021). Análisis comparativo

de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. *Investigaciones geográficas*, (106). DOI: 10.14350/rig.60396

Flores-Rodríguez A.G., Flores-Garnica J.G., González-Eguiarte D.R., Zarazúa-Villaseñor P., & Mena-Munguía S. (2022). Estimación de regeneración mediante variables ambientales e índices espectrales en ecosistemas con incendios forestales. DOI: 10.32870/ecucba.vi18.238.

Fornacca, D., Ren, G., & Xiao, W. (2018). Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing* 10, 1196. DOI:10.3390/rs10081196.

Gallegos Rodríguez, A., González Cueva, G. A., Cabrera Orozco, R. G., Marcell Sánchez, C., & Hernández Álvarez, E. (2014). Efecto de la recurrencia de incendios forestales en la diversidad arbórea. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 110-125.

Gil-López, M. J., Segarra-Moragues, J. G., & Ojeda, F. (2014). Fuego y diversidad en la herriza. *Revista de la Sociedad Gaditana de Historia Natural*, 8, 11-14.

González-Tagle, M. A., Cerano-Paredes, J., Himmelsbach, W., Alanís-Rodríguez, E., & Colazo-Ayala, Á. A. (2023). Fire records based on dendrochronological techniques for a coniferous forest in the southeastern region of Jalisco, Mexico. *Historial de incendios basado en técnicas dendrocronológicas para un bosque de coníferas. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1). DOI: 10.5154/r.rchscfa.2022.03.018

Huerta-Martínez, F. M., & Ibarra-Montoya, J. L. (2014). Incendios en el bosque la primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT*, 9(1), 23-32.

Hunt, E. R., Jr., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43-54. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90046-1.

Ibarra-Montoya, J. L., & Huerta-Martínez, F. M. (2016). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 11(1), 35-49. DOI: 10.4136/ambiente.1536

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1983). *Geología de la República Mexicana* : 1982. 1983. Página 25.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1992). Síntesis geográfica del estado de Hidalgo: 1992. ISBN: 968-892-735-X.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología escala 1: 250,000 serie II. ISBN: 978-607-494-162-3.

Jakubauskas, M. E., Lulla, K. P., & Mausel, P. W. (1990). Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 371-377.

Jardel Peláez E., Balcázar Medina O. E., & Aguilar Ramírez A. (2021). Evaluación preliminar del incendio forestal “Las Canoas-Nejahuete-Pedernal” en el Bosque La Primavera. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). Consultado el 12 de febrero de 2024. Obtenido de https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/reporte_tecnico_incendio_las_canoas.pdf

Jiménez Martínez, D. (2022). Estudio de incendios forestales en la Península Ibérica aplicando técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica: Caso del incendio de Casavieja (Ávila) 2005. Trabajo Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid. Consultado el 2 de mayo del 2024. Obtenido de <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/198af6a2-74b2-40a2-912a-b032ef49c648/content>

Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review. *International Journal of Wildland Fire*, 116-126.

Key, C.H., & Benson, N. (2006). Landscape Assessment (LA). Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55.

Kushla, J. D., & W. J. Ripple 1998. Assessing wildfire effects with Landsat thematic mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 19(13): 2493-2507. DOI: 10.1080/014311698214857.

Pinty, B. & Verstraete, M. (1992). GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*. 101. 15-20. DOI: 10.1007/BF00031911.

Llovería R. M., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova L., & De la Riva Fernández J. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. ISBN 978-84-617-3212-8, págs. 427-440.

López García, M. J., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6, 31-37. DOI: 10.1080/10106049109354290.

López García, A. R. (2020). Estudio de la severidad del incendio de 2012 y regeneración de la vegetación del Bosque La Primavera, México, mediante imágenes LANDSAT 7. *Revista cartográfica*, (101), 35-50.

Manzo Delgado, L., & López García, J. (2013). Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578- 5157.

Martín M. P. (1998). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA AVHRR. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.

Martín, M. P., & Chuvieco, E. (1998). Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 109-128. Consultado en mayo 2024. ISSN 1136-5777.

Moreno Tapia, M. A., & Álvarez Ramírez L.A. (2018). Manual de elaboración de pendientes a través de imágenes satelitales. Consultado el 27 de mayo del 2024. Obtenido de <https://grd.pe/admin/aplicacion/pdf/89125871.%20Manual%20GRD%20Geoconsultores%20-%20Elaboraci%C3%B3n%20de%20Pendientes%20ALOS.pdf>

Navazo Arenas Guadalupe, Nieto Masot A., & Moreno Marcos, G. (2016). Análisis de incendios forestales mediante Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Estudio de caso en Sierra de Gata (2015). *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario*, 247-268.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2022). El número de incendios forestales aumentará un 50% en 2100 y los gobiernos no están preparados, advierten los expertos. Consultado el 02 abril 2024. Obtenido de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-numero-de-incendios-forestales-aumentara-un-50-en>

Ordóñez, J.L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. Manual formativo de ACTA, (62), 17-31. ISSN 1888-6051

Organismo Público Descentralizado (OPD) Bosque La Primavera. (2024). Conoce el Bosque. Consultado en marzo 2024. Obtenido de: <https://bosquelaprimavera.com/conoce-el-bosque/>

Peláez, E. J. J., Medina, O. E. B., & Ramírez, A. A. Evaluación preliminar del incendio forestal “Las Canoas-Nejahuete-Pedernal” en el Bosque La Primavera. Reporte técnico. Universidad de Guadalajara. Gobierno de Jalisco. 28 pp.

Pérez Vega, R. (2016). Explotación Geotérmica de La Primavera: Un peligro inminente. MAGIS, No. 453. Consultado en mayo 2024. Obtenido de <https://magis.iteso.mx/nota/explotacion-geotermica-de-la-primavera-un-peligro-inminente/>

Rodríguez Toral, J. C. (2021). Más del 80% de La Primavera es de propiedad privada. Meganoticias. Consultado el 10 de marzo del 2024. Obtenido de <https://www.meganoticias.mx/guadalajara/noticia/mas-del-80-de-la-primavera-es-de-propiedad-privada/244016>

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A. Document ID: 19740022592.

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). (2021). Reporte individual de Incendios Forestales 2021. Obtenido mediante una solicitud realizada a la Unidad de Transparencia.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Informe de la situación del medio ambiente en México. ISBN 968-817-500-5.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). Cierre estadístico 2023. Consultado en abril 2024. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/879026/Cierre_de_la_Temporada_2023.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). NOM-015-SEMARNAT/AGRICULTURA-2023: especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales, temporalmente forestales, preferentemente forestales, en los terrenos de uso agropecuario y colindantes.

SentinelHub. (2020). Additional Request Parameters. Consultado el 27 de mayo 2024. Obtenido de <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/api/ogc/additional-request-parameters/#atmospheric-correction>

Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF), (2021). Manejo del Fuego. Consultado en abril 2024. Consultado en abril 2024. Obtenido de <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>

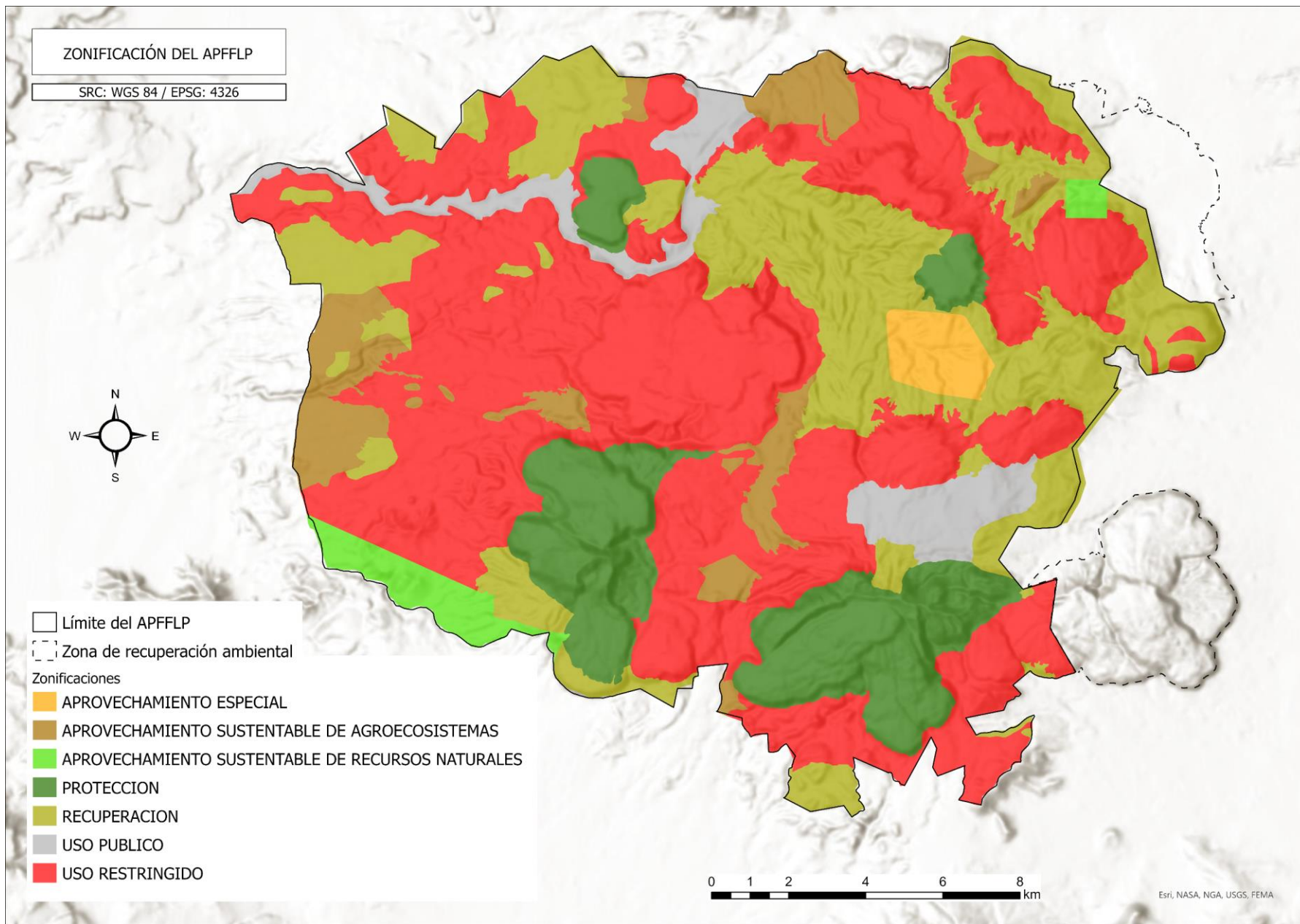
Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN). (2018). Informe de Medio Ambiente. Consultado en abril 2024. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap2.html#tema4>

Sobrino, J. A. (2000). Teledetección. Universitat de Valencia. ISBN: 8437042208

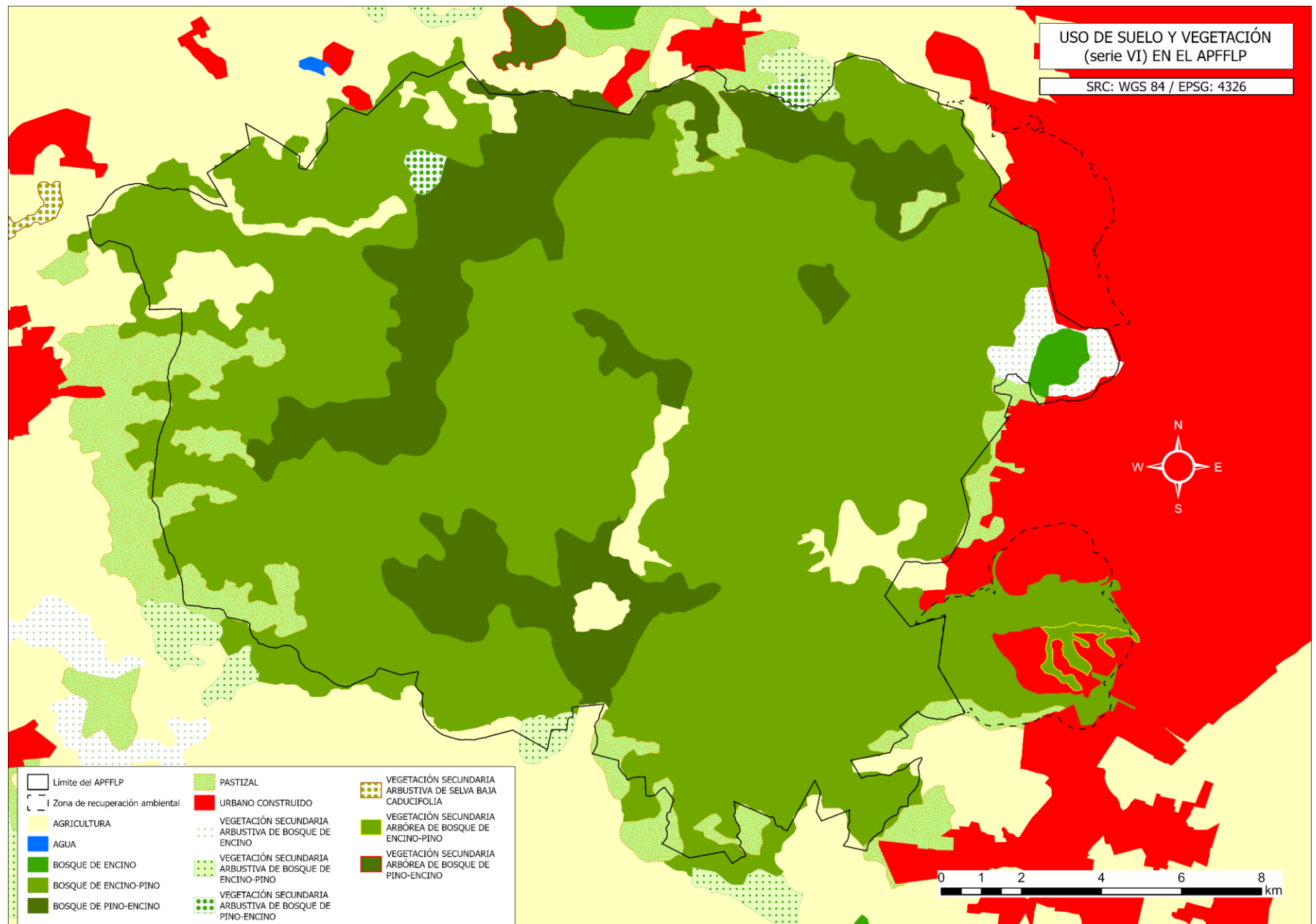
Sobrino, J. A., Llorens, R., & Fernández C. (2022). Incendios Forestales: Estimación del perímetro de severidad mediante teledetección desde satélite. Universitat de València. Consultado el 02 de abril de 2024. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/patrimonio-natural/20220427_sobrino_josea_llorens_rafael_teledeccion_incendios_forestales_tcm30-540477.pdf

Van Leeuwen, W., Casady, G., Neary, D., Bautista, S., Alloza, J., Carmel, Y., Wittenberg, L., Malkinson, D., & Orr, Barron J. (2010). Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA and Israel. International Journal of Wildland Fire. DOI: 19.10.1071/WF08078.

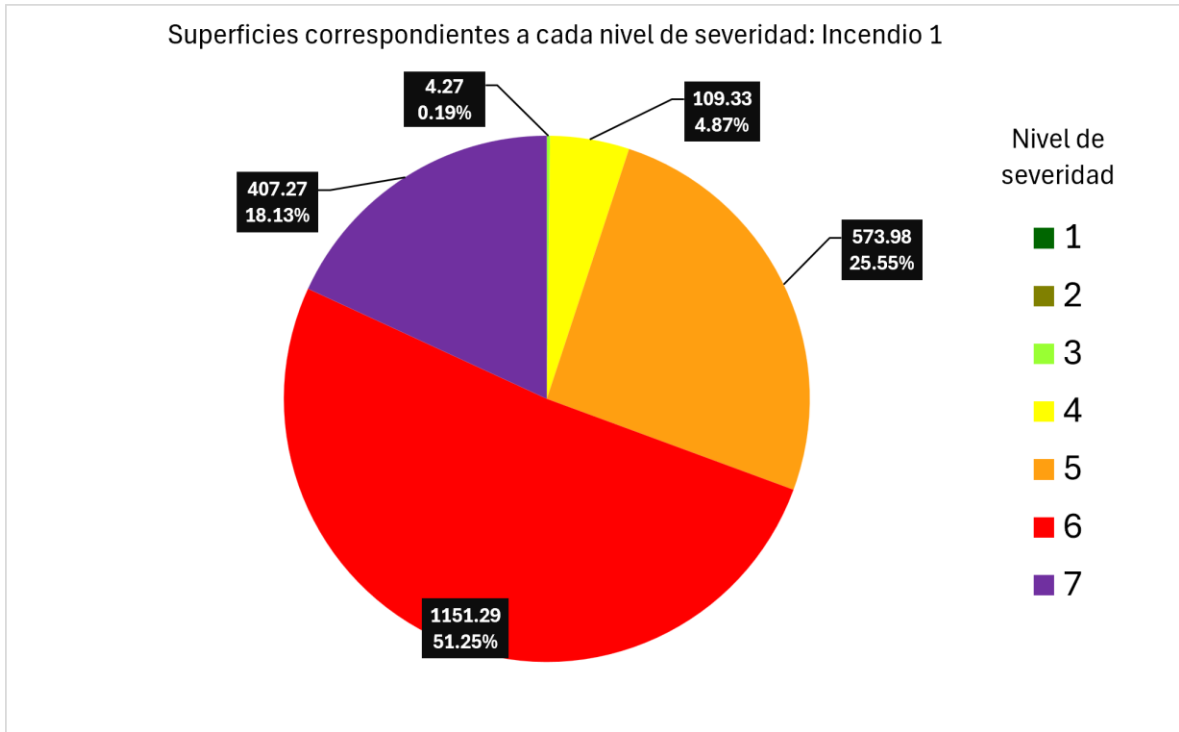
ANEXOS



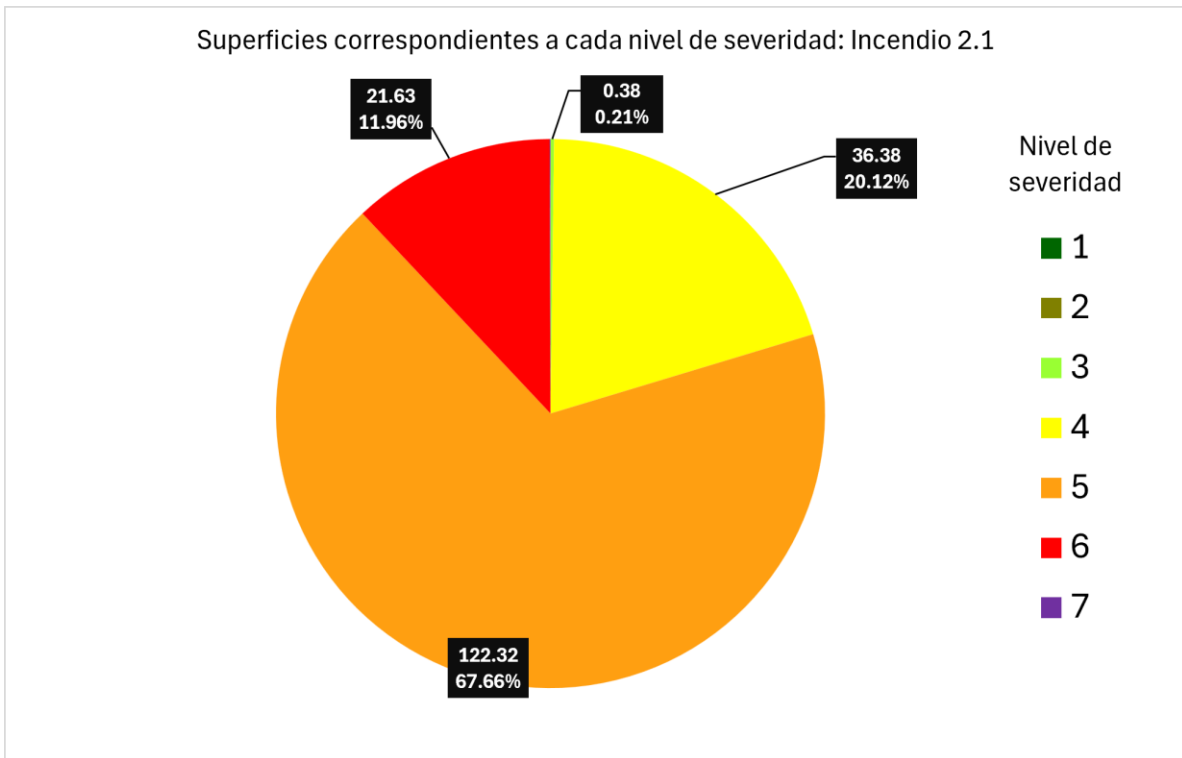
Anexo 1. Zonificación del APFFLP



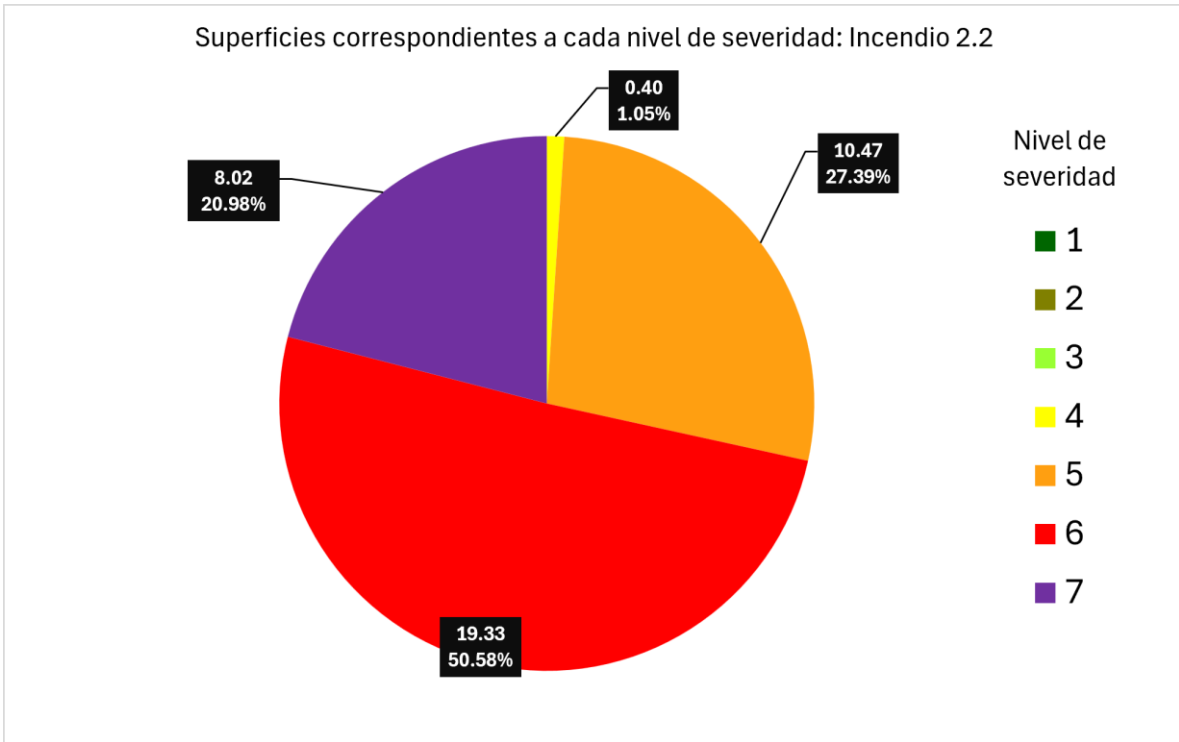
Anexo 2. Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI, APFF



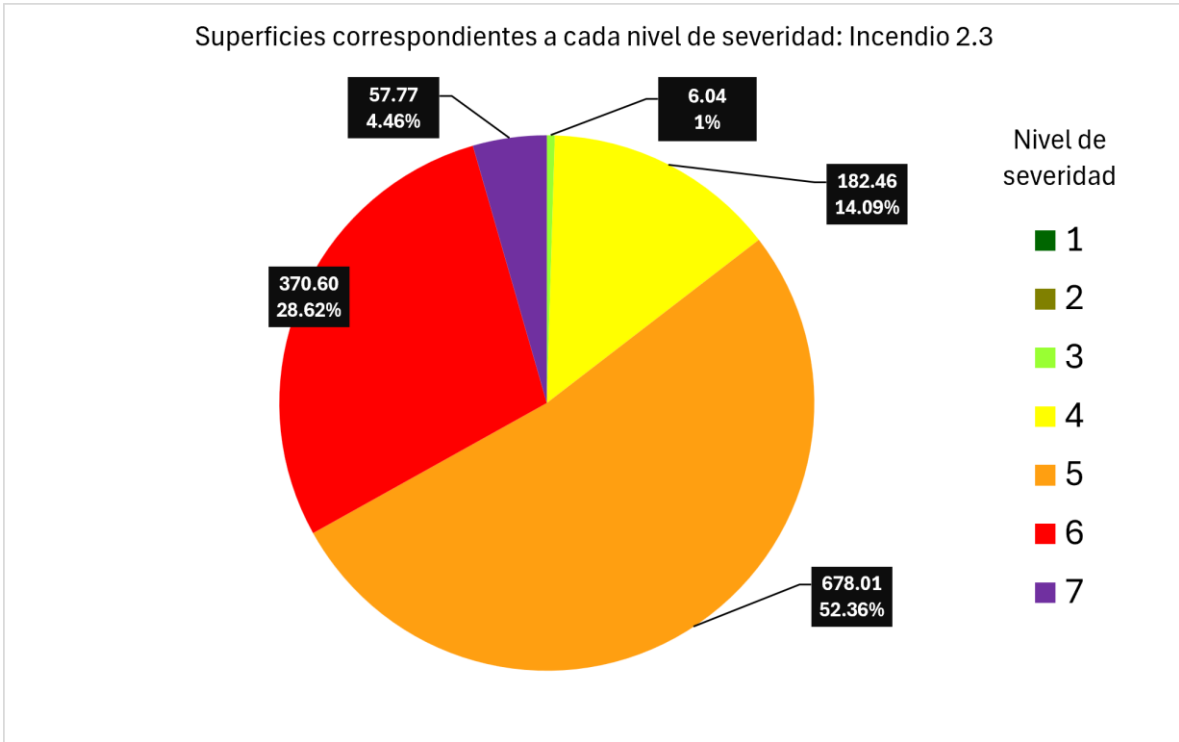
Anexo 3. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 1. ("." Separador decimal)



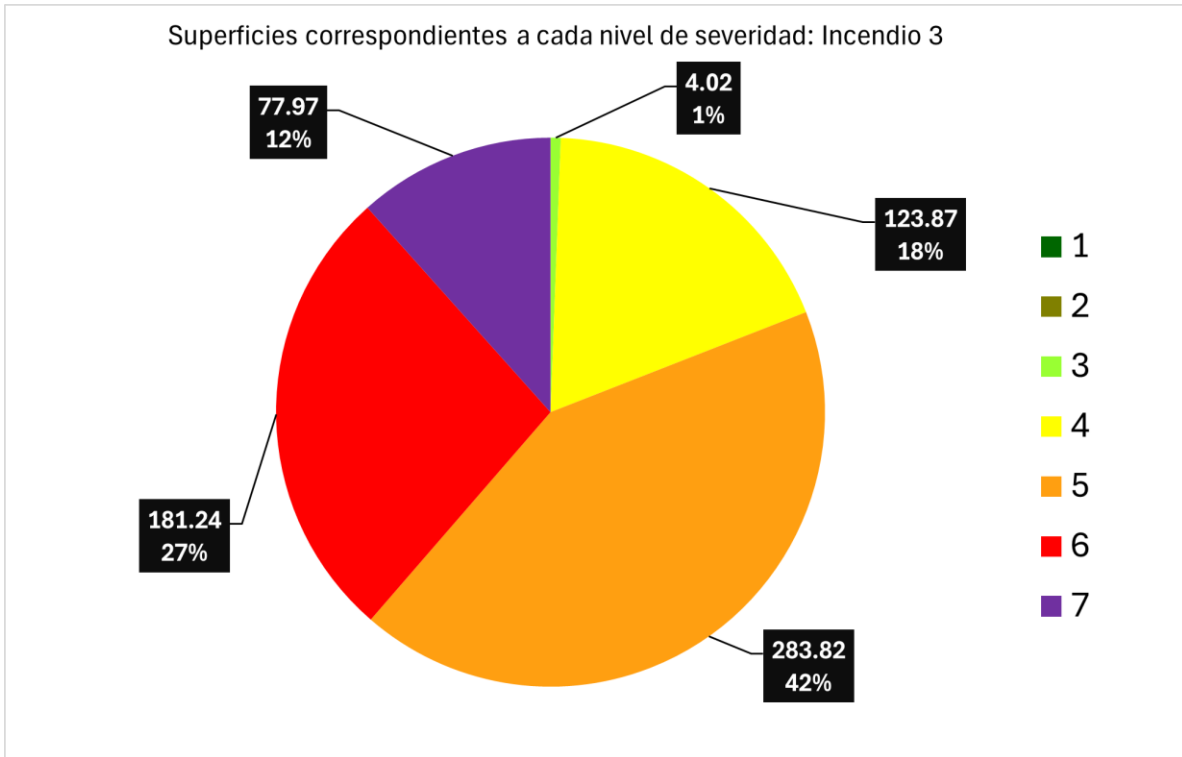
Anexo 4. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.1 ("." Separador decimal)



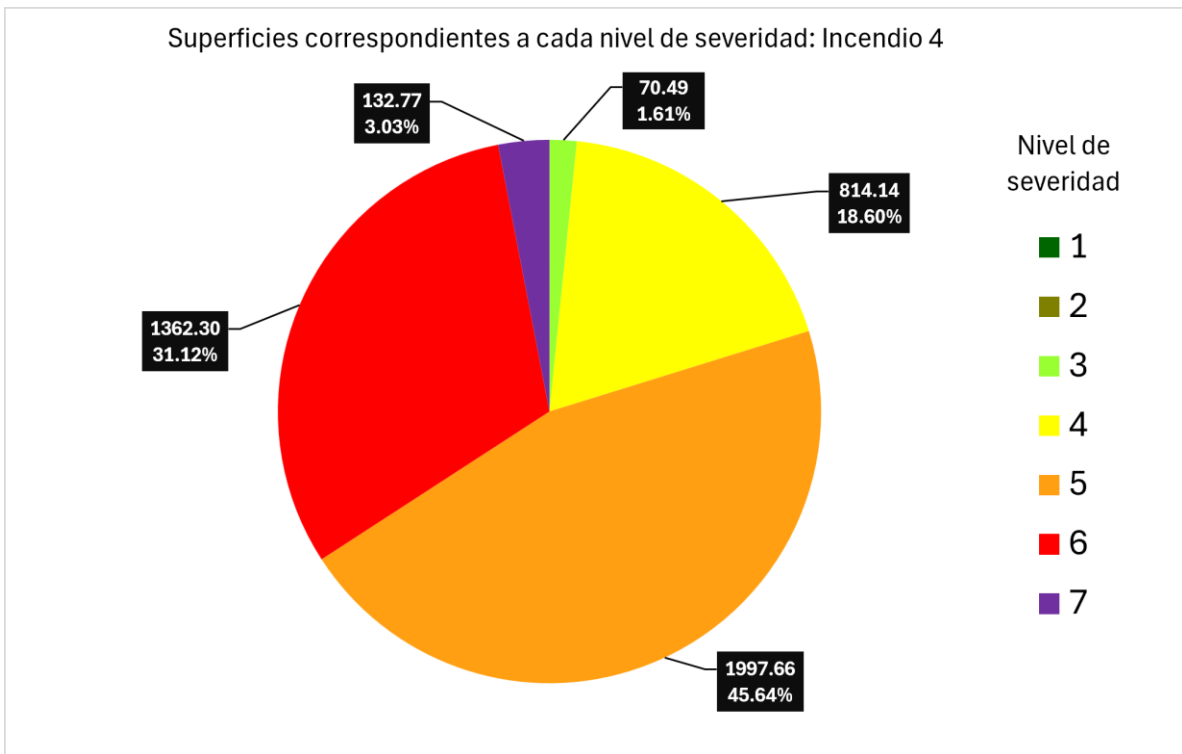
Anexo 5. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.2 (“.” Separador decimal)



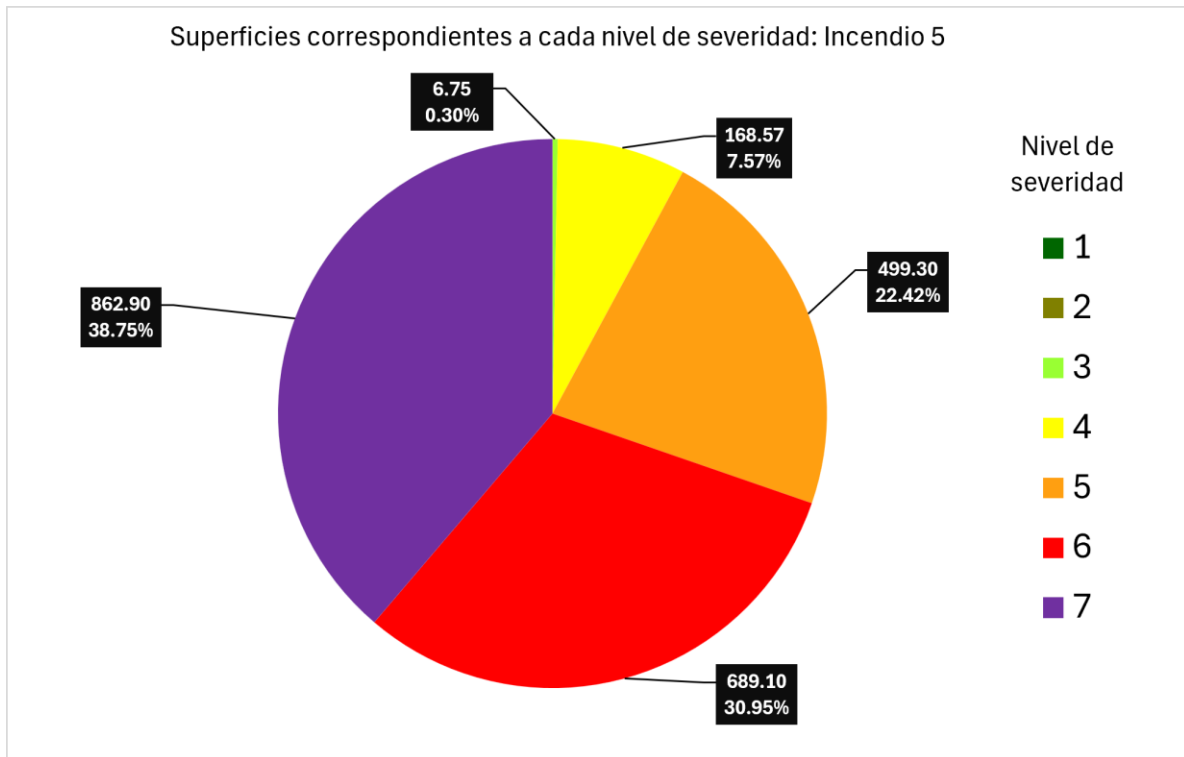
Anexo 6. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 2.3 (“.” Separador decimal)



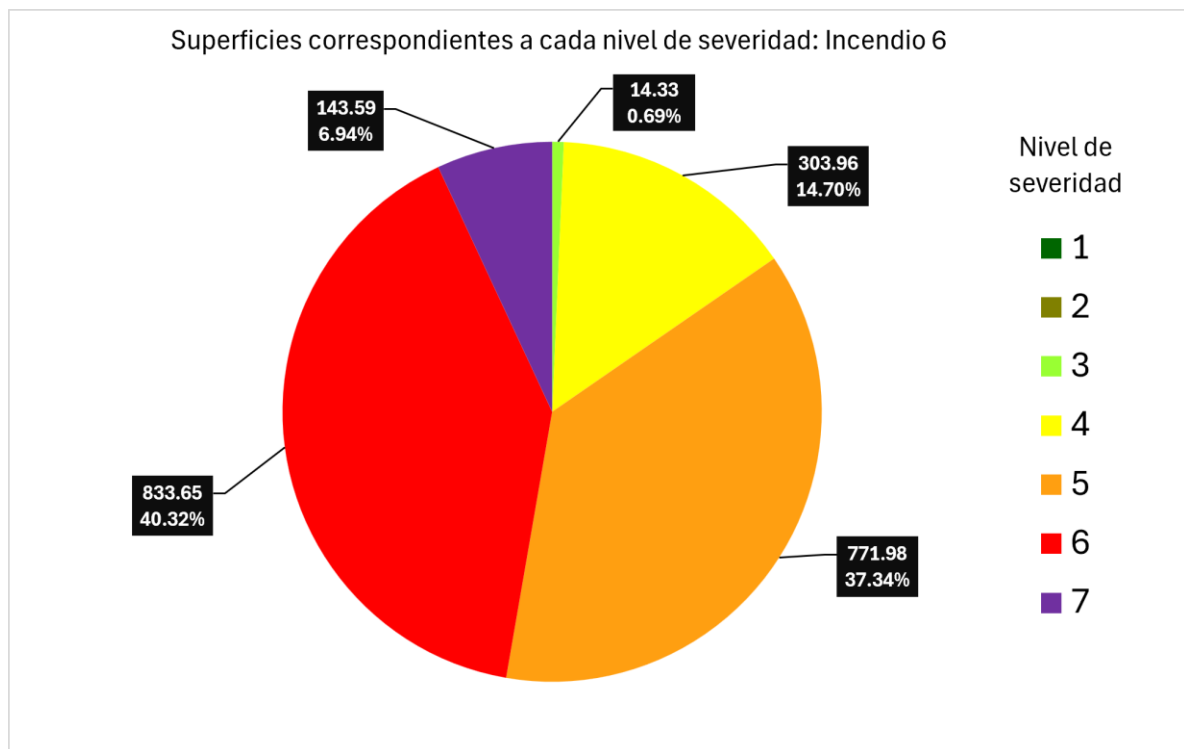
Anexo 7. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 3 ("." Separador decimal)



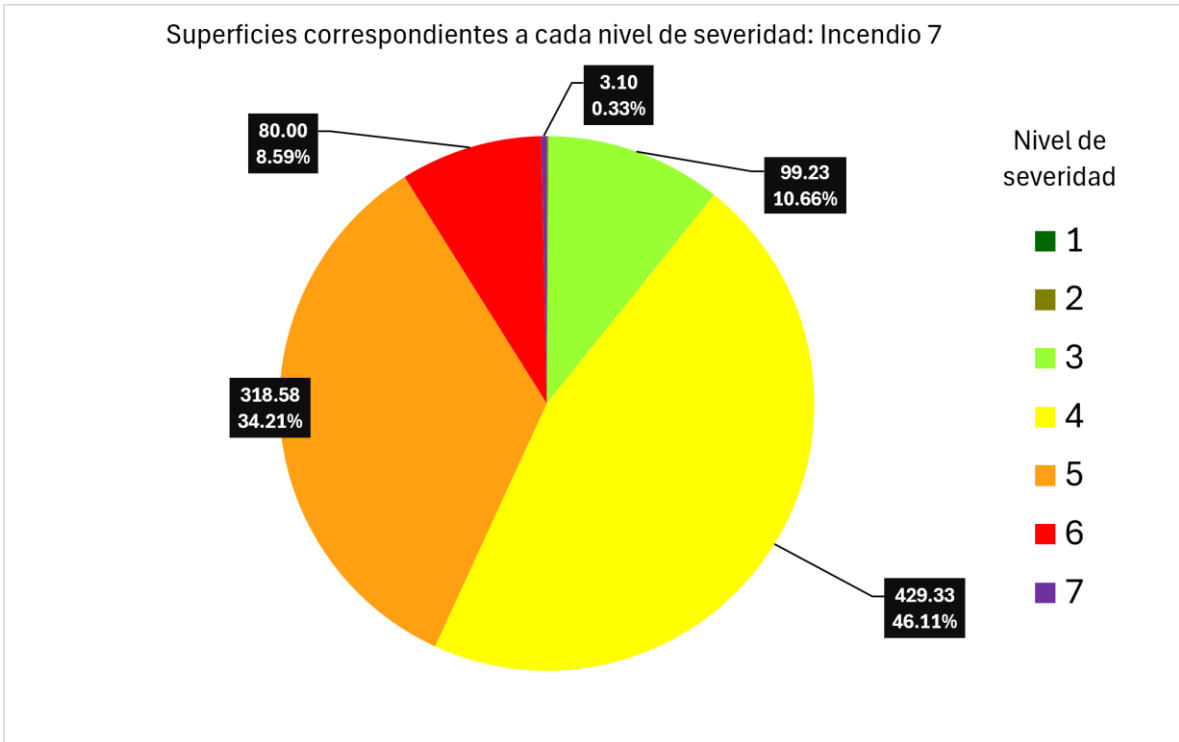
Anexo 8. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 4 ("." Separador decimal)



Anexo 9. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 5 (“.” Separador decimal)

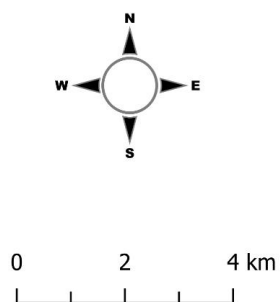


Anexo 10. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 6 (“.” Separador decimal)



Anexo 11. Superficies correspondientes a cada nivel de severidad, Incendio 7 (“.” Separador decimal)

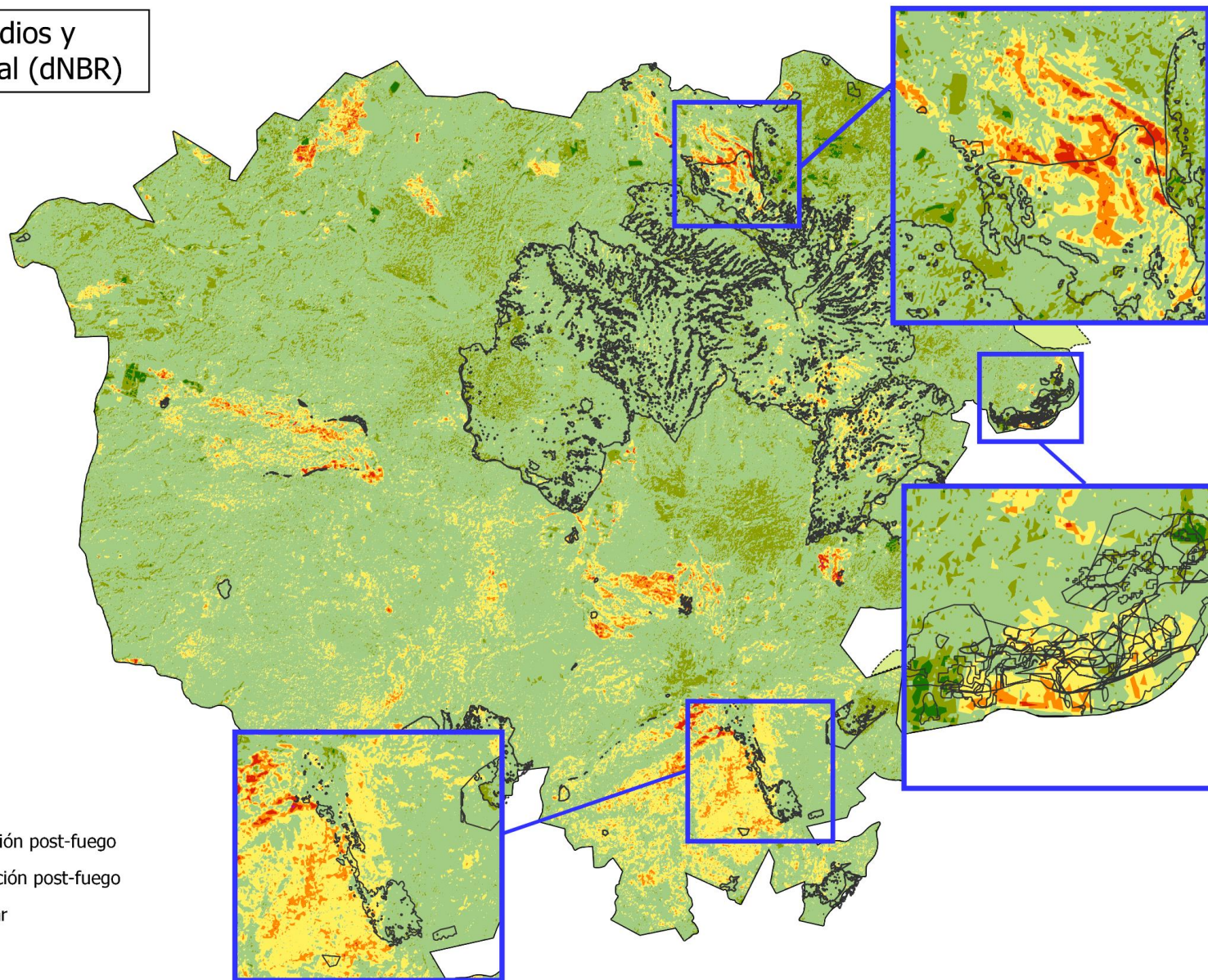
Solape de incendios y regeneración vegetal (dNBR)



- Límite APFFLP
- ZRA
- solapes

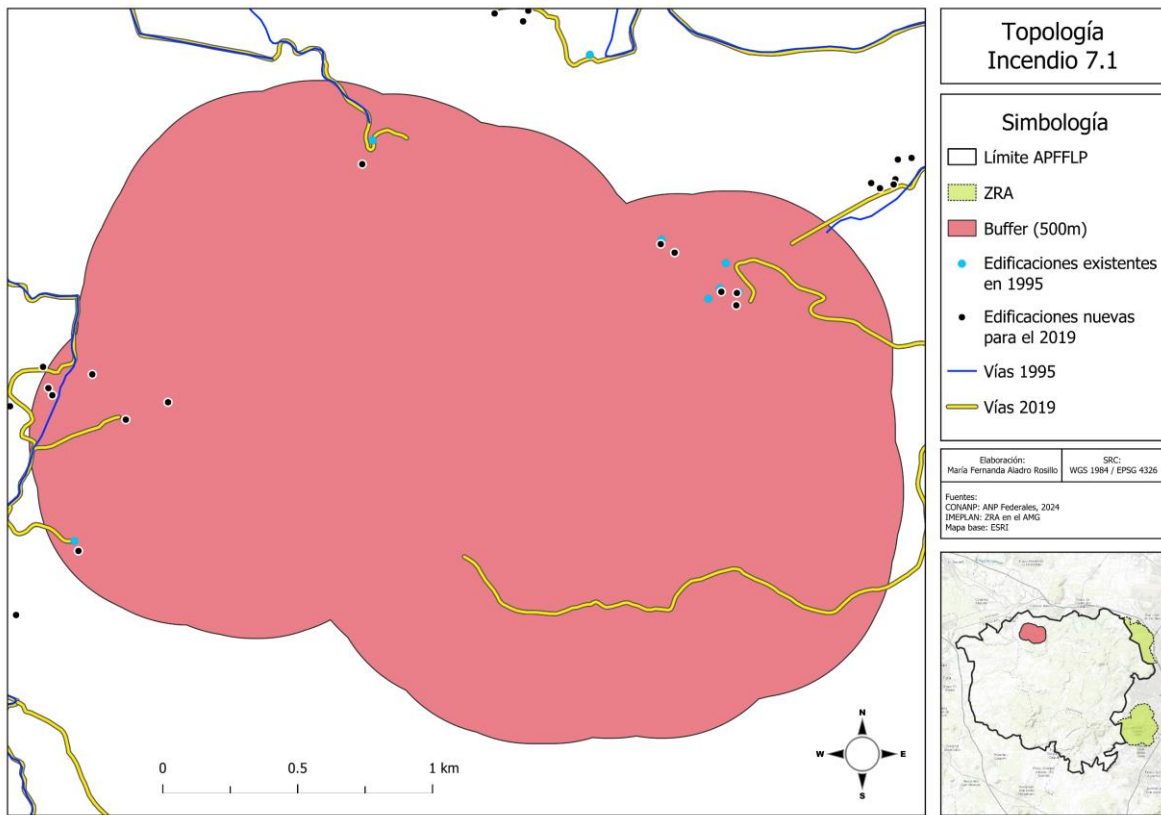
Niveles de severidad

- Alto crecimiento de vegetación post-fuego
- Bajo crecimiento de vegetación post-fuego
- Zonas estables o sin quemar
- Severidad baja
- Severidad moderada
- Severidad moderada-alta
- Severidad alta



Fuentes: CONANP: ANP Federales, 2024 IMEPLAN: ZRA en el AMG	SRC: WGS 1984 / EPSG 4326
---	------------------------------

Anexo 12. Solapes de incendios y estado actual de la vegetación en el APFFLP (abril 2024)



Anexo 13. Topología del incendio 7.1