



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DE AFECTACIÓN DE INCENDIOS MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE. CASO DE SIERRA BERMEJA

Alumno: José Ramón Galdón Moreno

Tutor: Prof. D. Manuel Ureña Cámara
Prof. D. Francisco Javier Cardenal Escarcena

Dpto: Departamento Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de
Postgrado

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

Estudiante: José Ramón Galdón Moreno

Tutores: Manuel Ureña Cámara y Francisco
Javier Cardenal Escarcena

Fdo. José Ramón Galdón Moreno

Fdo. Manuel Ureña Cámara y Francisco

Javier Cardenal Escarcena

CARDENAL
ESCARCENA
FRANCISCO
JAVIER -
08818663A

Firmado
digitalmente por
CARDENAL
ESCARCENA
FRANCISCO JAVIER
- 08818663A
Fecha: 2022.12.09
19:44:33 +01'00'

UREÑA
CAMARA
MANUEL
ANTONIO -
26035483N

Firmado
digitalmente por
UREÑA CAMARA
MANUEL ANTONIO
- 26035483N
Fecha: 2022.12.09
19:23:45 +01'00'

Jaén, 7 de diciembre de 2022



Agradecimientos

*A mi familia,
por hacer de mi quien soy,
por darme estas alas para llegar tan lejos.*

*A mis padres,
por brindarme la oportunidad que la vida nunca les dio de poder formarme,
por estar siempre a mi lado esté donde esté.*

*A mis hermanos,
por ayudarme a brillar,
por crecer conmigo,
pero sobre todo por aguantarme.*

*A todos mis amigos, en especial a Carlos, Lina, César, Nacho y Antonio,
por acompañarme en este camino,
por ser siempre mi norte,
por cuidarme.*

*Y a los profesores del máster,
por haberme enseñado tanto.*

*En especial a Manuel Ureña y Francisco Javier Cardenal,
por guiarme en este trabajo y compartir sus conocimientos conmigo.*



ÍNDICE

1. Resumen	5
2. Introducción	7
3. Objetivos	10
4. Antecedentes	11
4.1 La geomática y su aportación en los incendios forestales	11
4.1.1 Geomática	11
4.1.2 Incendios forestales	12
4.1.3 Aportaciones de la geomática en los incendios forestales	14
4.2 Metodología de referencia	16
4.2.1 Índices de combinaciones de bandas aplicables a incendios forestales.	16
4.2.2 Evaluación de daños	21
5. Material	29
5.1 Caracterización del área de estudio	29
5.2 Datos de partida	32
5.2.1 REDIAM	32
5.2.2 Instituto Geográfico Nacional	33
5.2.3 Programa Copérnicus	34
6. Metodología	37
6.1 Fase previa al incendio. Estimación del Índice de Riesgo Territorial de Incendio.	38
6.2 Fase posterior al incendio. Evaluación de daños y seguimiento de la regeneración de la cubierta vegetal.	41
7. Resultados	44
8. Conclusiones	59



9. Bibliografía	61
10. Anexos	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estadística general de incendios forestales 1968-2015.	8
Figura 2: Respuesta de la vegetación en las bandas NIR y RED.	23
Figura 3: Respuesta de áreas quemadas en el espectro electromagnético.	27
Figura 4: Contexto de la zona estudio.	30
Figura 5: Visualización de la zona afectada mediante composiciones multiespectrales.	31
Figura 6: Esquema metodológico del trabajo.	37
Figura 7: Modelo de estimación de riesgo de incendio forestal.	45
Figura 8: Modelo de estimación de riesgo de incendio forestal (REDIAM).	46
Figura 9: Distribución de las categorías de riesgo de incendio por superficie en el modelo elaborado en el trabajo.	48
Figura 10: Distribución de las categorías de riesgo de incendio por superficie en el modelo elaborado por REDIAM.	49
Figura 11: Comparación entre índices dNDVI y dNBR de cada incendio.	43
Figura 12: Comparación entre la superficie quemada por rango de dNBR en los incendios 2021 y 2022.	51
Figura 13: Comparación entre la superficie quemada por rango de dNDVI en los incendios 2021 y 2022.	52
Figura 14: Comparación de la severidad en las especies vegetales por categoría de dNBR en 2021.	54
Figura 15: Comparación de la severidad en las especies vegetales por categoría de dNBR en 2022.	55
Figura 16: Evolución de la regeneración de la cubierta vegetal.	58



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Índices asociados al porcentaje de pendiente.	19
Tabla 2: Características dinámicas y energéticas del fuego y unidad de medida.	19
Tabla 3: Índices asociados a los modelos de combustible.	20
Tabla 4: Obtención del índice territorial de riesgo.	21
Tabla 5: Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR.	28
Tabla 6: Tipos de productos disponibles con Sentinel 2.	35
Tabla 7: Modelos de combustible de Rothermel de 1972.	40
Tabla 8: Imágenes satelitales utilizadas.	42
Tabla 9: Comparativa entre la superficie quemada por rango de dNDVI calculada en el TFM y por Copérnicus.	56



1. Resumen

RESUMEN /ABSTRACT

RESUMEN:

El creciente desarrollo de las tecnologías de la información ha traído consigo grandes avances en los sistemas de teledetección satelital en las últimas décadas, haciendo posible la captura de datos georreferenciado fuera de la región visible del espectro electromagnético. La fusión de los datos obtenidos con sistemas de teledetección satelital y herramientas disponibles en los Sistemas de Información Geográfica resulta ser de gran utilidad para la realización de estudios geoespaciales, dada la amplia variedad de aplicaciones que ofrece.

Este trabajo recoge el análisis de la aplicación de las técnicas geomáticas en el estudio de los incendios forestales en la fase previa y posterior del evento. Para ello, se propone un modelo de estimación de riesgo de incendio, se realiza una evaluación de daños y se lleva a cabo un seguimiento de la evolución de la cubierta vegetal una vez ha ocurrido el incendio. El estudio se hace sobre los incendios sucedidos en Sierra Bermeja (Málaga) en 2021 y 2022 sobre los municipios de Jubrique y Pujerra, respectivamente. A través de una revisión bibliográfica, se adaptan diversas metodologías al caso de estudio para cumplir con los objetivos del proyecto.

Palabras clave:

Incendio forestal, Geomática, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica, imágenes satelitales, Copérnicus, NDVI y NBR.

ABSTRACT:

The increasing development of information technologies has made great advances in satellite remote sensing systems in recent decades, making it possible to capture georeferenced data outside the visible region of the electromagnetic spectrum. The fusion of the data obtained using satellite remote sensing systems and tools available



in Geographic Information Systems turns out to be very useful for carrying out geospatial studies, given the wide variety of applications it offers.

This dissertation includes the analysis of the application of geomatic techniques in the study of forest fires in the periods before and after the event. For this, a fire risk estimation model is proposed, a damage assessment is carried out and a follow-up of the evolution of the vegetation cover is carried out once the fire has occurred. The study is carried out on the fires that occurred in Sierra Bermeja (Málaga) in 2021 and 2022 in the municipalities of Jubrique and Pujerra, respectively. Through a bibliographical review, various methodologies are adapted to the case study to meet the objectives of the project.

Keywords:

Forest fire, Geomatics, Remote Sensing, Geographic Information Systems, satellite images, Copernicus, NDVI and NBR.



2. Introducción

En las últimas décadas, evidencias estadísticas nos alertan de que el número de incendios forestales se ha multiplicado exponencialmente debido a diversos factores, por lo que suponen una amenaza constante para los ecosistemas en todo el mundo. Los cambios en los patrones meteorológicos que ha provocado el cambio climático, así como la modificación de los usos del suelo como consecuencia del abandono de las zonas rurales, han generado una situación en la que se favorece la propagación de los incendios forestales (Pereira Obaya, 2020), afectando especialmente a paisajes mediterráneos.

El medio natural andaluz se ha desarrollado bajo la influencia del clima mediterráneo, marcado por el efecto de la sequía estival y matizado por la variabilidad orográfica del territorio. Estas características construyen una biodiversidad vegetal y animal de gran valor ecológico, por lo que la Comunidad Autónoma de Andalucía crea una extensa red de espacios naturales con alguna figura de protección. En conjunto la superficie protegida asciende a 1.596.297 ha, lo que supone el 18,2 % de la superficie geográfica de la Comunidad. En total, se constituyen 127 Espacios Naturales protegidos (Junta de Andalucía, 2003).

Los incendios forestales suponen una de las más importantes causas de degradación de estos ecosistemas junto a otros desastres naturales ligados al cambio climático y a las plagas. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) elabora cada año una estadística general de incendios forestales, obtenida a partir de los datos remitidos por las comunidades autónomas de cada incendio.

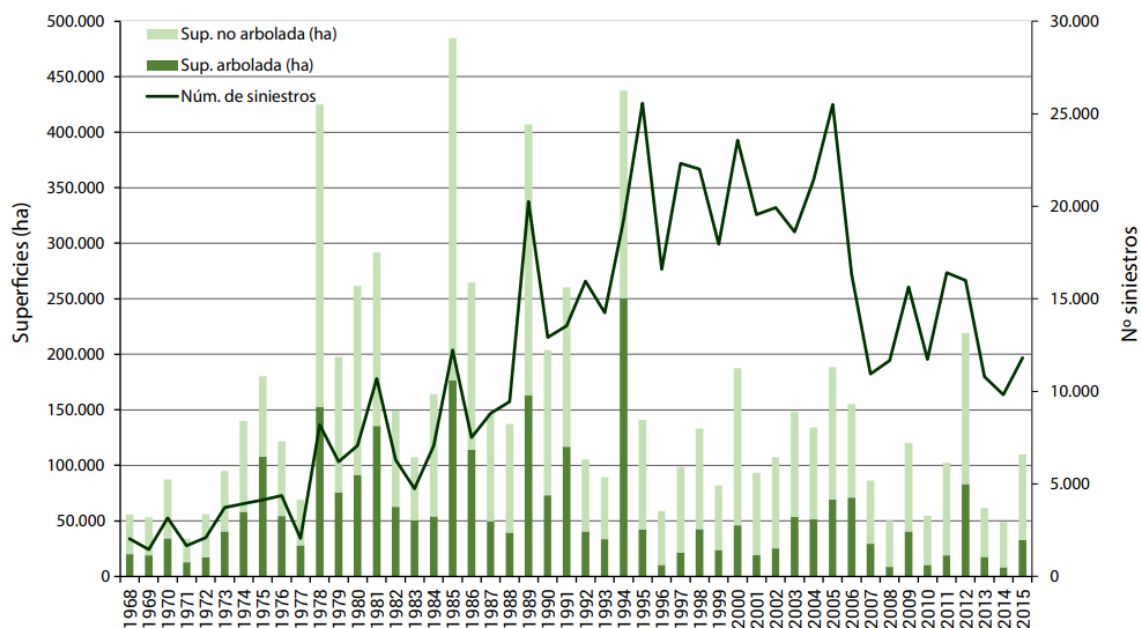


Figura 1: Estadística general de incendios forestales 1968-2015.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019.

Tal y como puede observarse en la figura 1, aunque en las últimas décadas el número de incendios ha tendido a ir a la baja, siguen siendo cifras considerablemente más altas que en la primera mitad de los años con registro de estos datos. Sin embargo, la superficie quemada si se ha ido reduciendo con el paso de los años, debido en gran medida a la mejora en los medios de prevención y extinción.

La importancia y magnitud de estos desastres unidas al desarrollo de nuevas tecnologías para su estudio hacen que se trabaje con un gran volumen de datos, por lo que son numerosas las disciplinas que intervienen en su gestión y planificación. Es en este campo donde se presentan las geociencias, y más concretamente la geomática como disciplina, metodología y conjunto de herramientas mediante la captura, tratamiento, análisis, interpretación y almacenamiento de datos, en particular de información geoespacial.

La geomática constituye una herramienta excelente en el apoyo a la toma de decisiones, análisis y ejecución de tareas complejas en todas las etapas de la gestión de los incendios forestales. La observación terrestre de este fenómeno se ha trasladado mayoritariamente a los medios aéreos o a los satélites, debido a la alta



tecnología que emplean las cámaras aerotransportadas y los sensores integrados (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019). Los datos obtenidos por satélites de teledetección han resultado ser una poderosa fuente de información para la realización de este tipo de estudios en los últimos años. Esto es debido a la incorporación de sensores multiespectrales que posibilitan obtener datos visibles y no visibles del espectro electromagnético, lo que abre un amplio campo de aplicaciones para el análisis técnico en este ámbito.

Los satélites, método de captura de geoinformación empleado en este trabajo, cuentan con la ventaja de poder cubrir grandes áreas y puede prescindirse de un soporte propio más costoso para la captura de estos datos (como en el caso de otros métodos de captura como drones o avionetas), lo que supone un considerable ahorro en recursos. El uso de estas tecnologías se aplica tanto en la fase de prevención, como la de lucha activa contra el incendio y también en para realizar un seguimiento de la regeneración en repoblaciones posteriores.

En los últimos años la geomática se ha consolidado como una ciencia de común aplicación y apoyo para la observación, estudio, análisis e interpretación del estado y comportamiento del medio físico en relación a la casuística de los incendios forestales. Como es sabido, una valoración de daños del área afectada es fundamental para la distribución de recursos y demás actuaciones. En las centrales de operaciones se han integrado todas las funciones descritas sobre una base SIG (Sistema de Información Geográfica) de manera que la información es manejada en forma parecida a como se haría sobre el terreno (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019).



3. Objetivos

En este trabajo se pretende analizar la aplicación de técnicas geomáticas en la investigación de incendios forestales mediante imágenes de satélite multitemporales de acceso libre. Para ello se tienen en cuenta fundamentalmente dos aspectos: la estimación del riesgo potencial de incendio en una zona (fase pre incendio), la evaluación de daños causados y seguimiento de la regeneración de la cubierta vegetal (fase post incendio). Para ello se emplean técnicas geomáticas basadas en sistemas de información geográfica y teledetección para la obtención, clasificación, cálculo y estudio de los datos. Se han escogido los incendios sucedidos en Sierra Bermeja en 2021 y 2022 por su repercusión mediática, magnitud, severidad e implicaciones sobre el territorio y biodiversidad.



4. Antecedentes

4.1 La geomática y su aportación en los incendios forestales

Hasta hace relativamente pocos años los análisis espaciales de los incendios no tenían un uso tan extendido. En lo referente a los modelos de riesgo de incendio, se llevaban a cabo con datos tomados directamente en campo por medio de mediciones de parámetros forestales como la altura y diámetro de la vegetación, lo que imposibilitaba la modelación de áreas extensas. De la misma manera, la toma de datos para la evaluación de los daños también se hacía en campo con levantamientos topográficos para establecer perímetros, lo que al igual que en el caso de los modelos de riesgo de incendio, requiere grandes inversiones en recursos.

Sin embargo, el rápido y reciente desarrollo de las tecnologías de la información y, particularmente la geomática y los sistemas de información geográfica, junto a la presencia de una geoinformación cada vez más accesible ha permitido la realización de este tipo de estudios de una forma más eficaz.

4.1.1 Geomática

La Geomática engloba las Geociencias con la integración y aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), aunque tiene sus raíces en la topografía. Es reconocida como una disciplina integradora de los conocimientos técnicos y científicos que hacen referencia a la captura, procesamiento, manipulación, análisis, interpretación, almacenamiento y difusión de la información geoespacial.

(Pinto, 2012)

Esta ciencia está compuesta por un grupo principal de disciplinas que le dan identidad propia como los sistemas de referencia geodésica, la teledetección, los sistemas de posicionamiento global y los SIG. Sin embargo, además de su propio cuerpo de conocimiento necesita recurrir a un conjunto de ciencias auxiliares que la dotan de mayor envergadura (las matemáticas, las tecnologías de satélite, la física, geoestadística, etc.). Sin embargo, la Geomática es también una disciplina de apoyo cuyos resultados y productos, utilizados de forma adecuada, pueden ser empleados



para cubrir una amplia y diversa demanda cuya característica común es el análisis y representación de fenómenos espaciales (cartografía, inventarios catastrales, gestión territorial, aplicaciones de la teledetección), entre los que también se incluyen la hidrología y, en este caso, la gestión sobre incendios forestales y zonas susceptibles de sufrirlos. Una de las grandes ventajas que ofrece la Geomática, es que cuenta con la capacidad de reducir considerablemente la inversión en tiempo, recursos y personal para la obtención y tratamiento de información y resultados (Aguilar, et al. s.f).

Encuadrada dentro de la geomática, se desarrolla como técnica de captura de geoinformación desde sensores instalados en plataformas espaciales, basándose en la energía reflejada por la superficie terrestre. Para el modelado y análisis de datos, en el estudio nos valdremos de sistemas de información geográfica por ser una herramienta robusta y eficaz con la que poder trabajar un gran volumen de geoinformación. Pueden ser de carácter vectorial o ráster, diferenciándose ambos en la integridad topológica de su información. Los sistemas vectoriales tienen una integridad en su estructura, formadas sus capas por nodos (puntos) y arcos, mientras que los sistemas rasterizados carecen de integridad topológica y la información está almacenada en teselas (Aguilar, et al. S.f). Además, para el manejo de la información de un SIG se utilizan herramientas que proporcionan la información de forma inmediata, permitiendo a los usuarios analizar los datos que contienen cada una de las capas de información. Estas herramientas son los denominados «visores», que son igualmente utilizados de forma estandarizada por organismos como el Plan de Prevención y Extinción de Incendios de Andalucía (INFOCA en adelante) o el servicio Copernicus.

4.1.2 Incendios forestales

La R.A.E define incendio forestal como todo aquel fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte, a lo que la Dirección General de la Protección Civil añade que éste debe extenderse de forma descontrolada por un terreno que no estaba destinado a arder (Real Academia Española, s.f). Asimismo, hay que subrayar que su superficie ha de superar 1 ha, ya que siendo inferior a ésta se clasifica como conato de incendio. Conforme a la Ley 2/1992, Forestal de



Andalucía, de 15 de junio, es terreno forestal, toda superficie rústica cubierta de especies arbóreas, arbustivas, de matorral, o herbáceas, de origen natural o procedente de siembra o plantación, que cumplen funciones ecológicas, protectoras, de producción, paisajísticas o recreativas (Junta de Andalucía, 2003).

Tal y como se adelanta en los objetivos, parte del trabajo consiste en analizar el riesgo potencial de incendio en las zonas delimitadas, por lo que es conveniente señalar algunos detalles sobre el concepto. De acuerdo con lo expuesto por el Plan INFOCA (Junta de Andalucía, 2003), el riesgo de incendios se define como la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona y en un intervalo de tiempo determinado y dependerá de las variables fundamentales que determinan el comportamiento del fuego, que son las características de la vegetación y orográficas y el clima.

Estas variables son también utilizadas con el mismo fin por organismos públicos y oficiales como el Instituto Cartográfico de Valencia o el programa Copernicus, por lo que su uso está estandarizado. De igual manera, también inciden actividades humanas y otros agentes susceptibles de originar incendios, aunque este estudio se centrará en las dos primeras variables por ser más estáticas, como veremos a continuación.

Además del riesgo potencial de incendio, la intensidad del incendio es un factor que determina su alcance y por tanto objeto de este estudio. “Las diferentes intensidades del incendio son debidas sobre todo a la carga y características del combustible presente (humedad, componentes volátiles e inflamables, etc.), a las condiciones meteorológicas en las que se desarrolla el incendio (con la importante influencia de la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura), y a la variabilidad topográfica de la zona afectada. Así, en la mayoría de incendios forestales, sus efectos se revelan en un mosaico de niveles de daño causados a la vegetación y al suelo en función de la virulencia con la que las llamas transcurrieron por cada zona. Además, cuanto mayor es la superficie afectada, mayores las diferencias en los patrones de severidad.” (Masot et al., 2016).



4.1.3 Aportaciones de la geomática en los incendios forestales

El uso de nuevas tecnologías aplicadas a la defensa frente a incendios forestales permite optimizar los medios utilizados, pero requiere una estructura apropiada que favorezca su aplicación. En materia de incendios forestales, las técnicas geomáticas tienen multitud de aplicaciones. Los datos pueden proceder de diversas fuentes:

- a. Datos espaciales: indican la ubicación geográfica de los diferentes elementos, así como la información de sus atributos. Por regla general, este tipo de datos da lugar a las denominadas coberturas.
- b. Datos en formato de imagen: incluyen imágenes de satélites, fotografías aéreas y otros datos recopilados de forma remota o mediante barrido electrónico.
- c. Datos en forma de tablas: incluyen cualquier conjunto de datos con información de carácter geográfico: ficheros Dbase, Informix, datos en formato texto.

Existen programas que utilizan estos datos para simular la propagación de un incendio y el comportamiento del frente de llama basados, en general, en datos espaciales del territorio, cartografía de combustibles y condiciones meteorológicas. En este sentido, la Comisión Europea (CE) ha creado el Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS), que a través de esta información ha creado un visor que contiene, entre otros, una evaluación por zona de peligro de incendio y detección de incendios activos.

Por su parte, el simulador para la propagación de incendios utilizado en el Plan INFOCA es Visual Cardin mediante datos sobre combustibles, viento, humedad y protección de los combustibles y pendientes. Además, proporciona informes periódicos o específicos que contienen acerca de los perímetros afectados (Junta de Andalucía. 2003).

Otro ejemplo podemos encontrarlo en Cuba, donde se implementó un sistema automatizado con el empleo de imágenes del satélite GOES-12, para la detección y vigilancia operativa de incendios forestales. Esto se consigue con sensores



multiespectrales mediante la detección de puntos calientes, utilizando datos de albedo y temperatura (Mejías, E & Setzer, A. 2005).

Entre otras aplicaciones basadas en las nuevas tecnologías desarrolladas por el INFOCA y Corpernicus destacan:

- a. Red de estaciones de meteorología.
- b. Sistema Bosque de detección automática de incendios.
- c. Riesgo estructural de incendios en el territorio forestal.
- d. Nivel de riesgo por el estrés hídrico de la vegetación.
- e. Medición de áreas quemadas.
- f. Evaluación de los daños de la vegetación.
- g. Sistema de transmisión de imágenes.
- h. Seguimiento en tiempo real de la situación de las aeronaves. (Junta de Andalucía. 2003)

Parte del estudio se basa en la información capturada por misiones espaciales. Aunque la primera imagen satelital de la tierra se capturó en 1959, su utilización como fuente de datos no comenzó a extenderse hasta los años 70. Esto fue gracias a los avances en teledetección y la llegada de las primeras misiones espaciales de Landsat que incorporan sensores multiespectrales, ofreciendo la ventaja de poder capturar información del espectro electromagnético fuera del alcance del ojo humano. Ello ha contribuido a que cada vez más, por parte de las administraciones públicas se requiera de estos estudios. Con arreglo al Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre, quedó aprobado el actual y vigente Plan de Emergencias por Incendios Forestales de Andalucía, y entre las funciones básicas definidas del Plan, recogidas en el apartado 1.2, se especifica: “Como anexos al Plan se incluirán mapas, confeccionados sobre cartografía oficial, con la información territorial que resulte significativa a los efectos señalados.[...] El Análisis de riesgo, zonificación del territorio y épocas de peligro: La zonificación del territorio en función del riesgo y de las previsibles consecuencias de



los incendios forestales, así como la determinación de las épocas de peligro”. (RD 893/2013, de 15 de noviembre).

4.2 Metodología de referencia

El desarrollo de las técnicas geomáticas la constituyen hoy como una herramienta fundamental en análisis multitemporales aplicados al territorio. En efecto, actualmente son numerosos los estudios que utilizan esta geociencia para analizar el riesgo y alcance de los incendios forestales en una zona, abordados con distintas metodologías.

“La teledetección se ha utilizado ampliamente para determinar a diferentes escalas el nivel de severidad de los incendios, la pérdida de cobertura vegetal y la tasa de recuperación de las comunidades vegetales. Un elemento común dentro de este tipo de estudios es la utilización de información espectral con el diseño de índices con información de diferentes bandas espectrales que han demostrado tener niveles de correlación con parámetros biofísicos de la vegetación como la cantidad de biomasa, la actividad fotosintética, la productividad y el contenido hídrico. En definitiva, la teledetección permite la caracterización de la superficie quemada según varios métodos” (Masot et al., 2016).

Sin embargo, teniendo en cuenta que en el estudio se toma de partida el análisis del riesgo de incendio, el marco metodológico de referencia para este proyecto puede dividirse en dos grupos o fases:

4.2.1 Riesgo de incendio

Según el informe de la Junta de Andalucía sobre el incendio de Sierra Bermeja en 2021 preparado con el aporte de todo el personal involucrado en el manejo y extinción de este evento de emergencia.

El informe se redacta con el fin de describir la evolución del incendio de Sierra Bermeja el 8 de septiembre de 2021, así como las diferentes variables que influyeron en el comportamiento del fuego y determinaron su propagación. Es de especial interés el apartado 2.4 Régimen de riesgo de incendios. En él se adjunta la siguiente cartografía:



- Un mapa de riesgo de continuidad de combustible asociado al riesgo extremo,
- Otro asociado a la topografía que combina pendiente y exposición. utilizado también previamente para para describir la topografía propia del terreno.
- Un mapa de riesgo histórico asociado al régimen de incendios, que muestra grandes áreas con más de dos incendios mayores de 100 ha en un mismo área.
- También se analiza en un cuarto mapa la vulnerabilidad asociada a la interfaz urbano-forestal (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 2021).

Estos mapas son obtenidos a partir de la información del Estudio Básico de Riesgos Asociados a Incendios Forestales del Plan INFOCA y suponen el punto de partida para la elaboración de la cartografía de riesgo de incendio. En este sentido, el análisis de peligro de incendios forestales incluye un enfoque integral en el que intervienen diversos subíndices, por lo que conviene analizar la metodología que ha seguido INFOCA que le ha permitido estimar el riesgo para todos los terrenos forestales de Andalucía. Para ello, en el apartado “V. Análisis del riesgo” de su memoria, (Junta de Andalucía, 2003), se basa en tres variables fundamentales que determinan el comportamiento del fuego:

- Las características de la vegetación y las condiciones en que se encuentran los combustibles vegetales.
- Las características orográficas (pendiente y orientación)
- El clima y las condiciones meteorológicas in situ.

Dada la complejidad del término riesgo de incendio, en la memoria del Plan INFOCA se consideran los siguientes tipos de riesgos (Junta de Andalucía, 2003):

- a. Riesgo estructural. Determinado básicamente por la orografía del terreno y las características de la vegetación.
- b. Riesgo meteorológico. Derivado de las condiciones meteorológicas existentes como son la temperatura, la humedad, las precipitaciones y el viento.



- c. Riesgo de estrés hídrico. Que tiene en cuenta las condiciones de estrés de la vegetación que vienen determinadas por la evolución de las condiciones meteorológicas.
- d. Riesgo de frecuencia de incendios. Para el que se tiene en cuenta el número de incendios producidos y que está muy ligado a la causalidad de los mismos.

Evaluando los objetivos del trabajo y la disponibilidad de los datos, en el caso de este estudio se tendrá especialmente en cuenta el riesgo de tipo estructural. La orografía del terreno y las características de la vegetación son factores con carácter más permanente que, por ejemplo, el riesgo derivado de las condiciones meteorológicas o el estrés hídrico, de esta manera la aplicación de los índices obtenidos a partir de estos factores puede ser más prolongable en el tiempo, a un medio y largo plazo.

Para la aplicación del riesgo estructural de incendios forestales la Consejería de Medio Ambiente desarrolló en el año 2001 una metodología propia que ha permitido estimar dicho riesgo para todos los terrenos forestales de Andalucía. Ésta se basa en el análisis conjunto del riesgo por pendiente y por combustibilidad, que permiten obtener un índice territorial de riesgo a través de la categorización de los campos de ambas capas de información. El índice distingue aquellas zonas en las que el comportamiento esperado del fuego pueda ser más o menos desfavorable.

Clasificación del riesgo por pendiente

La pendiente es un factor topográfico de gran influencia en el comportamiento del incendio, al favorecer la continuidad vertical del combustible y el calentamiento de los combustibles próximos a las llamas como consecuencia de las corrientes de convección ascendentes que se forman.

La clasificación del riesgo por pendiente establecida en el informe para el cálculo del riesgo territorial y que seguiremos en el estudio se recoge en la tabla 1.



INTERVALO DE PENDIENTE (%)	CLASE DE RIESGO POR PENDIENTE	ÍNDICE NUMÉRICO
0–10	muy bajo	1
10–20	bajo	2
20–30	medio	3
30–50	alto	4
>50	muy alto	5

Tabla 1: Índices asociados al porcentaje de pendiente.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

Clasificación del riesgo por combustibilidad

Cada uno de los modelos de combustible presenta distinto comportamiento frente al fuego, contribuyendo a una mayor o menor velocidad e intensidad en la propagación del mismo. El índice numérico de combustibilidad ha sido determinado en función de las características dinámicas y energéticas del fuego, representadas en la tabla 2.

Característica dinámica	Unidad de medida
Intensidad de reacción (IR)	kw/m ²
Velocidad de propagación (VP)	m/min
Intensidad lineal (IL)	kw/m
Calor por unidad de área (Calor/S)	kj/m ²
Longitud de llama	m

Tabla 2: Características dinámicas y energéticas del fuego y unidad de medida.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.



En el siguiente cuadro se recogen las clases de riesgo por combustibilidad de las formaciones vegetales, según modelos de combustible de Rothermel, que al igual que en el caso de las pendientes constituye la base de nuestro modelo de riesgo de incendio.

MODELOS DE COMBUSTIBLE	CLASES DE RIESGO POR COMBUSTIBILIDAD	ÍNDICE NUMÉRICO
Sin combustible apreciable	muy bajo	1
8-5	bajo	2
11-9-1-3	moderado	3
7-6-2	alto	4
4	muy alto	5

Tabla 3: Índices asociados a los modelos de combustible.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

Obtención del índice territorial de riesgo

El índice territorial de riesgo se obtiene por la combinación del índice de riesgo por pendiente y el índice de riesgo por combustibilidad, según la siguiente matriz que figura en el cuadro siguiente, distinguiendo cinco clases de riesgo: muy bajo (1), bajo (2), medio (3), alto (4) y muy alto (5).



		ÍNDICE DE COMBUSTIBILIDAD				
		1	2	3	4	5
ÍNDICE DE PENDIENTE	1. Muy bajo					
	2. Bajo					
	3. Medio					
	4. Alto					
	5. Muy alto					

Tabla 4: Obtención del índice territorial de riesgo

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

4.2.2 Evaluación de daños

Por otro lado, para seguir los objetivos del trabajo se requiere cuantificar los daños producidos por el incendio para poder contrastar y buscar que correspondencia existe entre las zonas de más riesgo y las zonas más afectadas, para así poder evaluar la eficacia del método. También hay varias investigaciones que se centran la cuantificación del daño producido por un incendio, para lo que se calculan de índices espectrales de imágenes de satélite estandarizados.

En este sentido, el Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales y Graduados en Ingeniería Forestal y del Medio Natural han creado “Café Forestal”, una serie de seminarios web con el objetivo de la divulgación científica, técnica y cultural relacionada con la Ingeniería Forestal. Uno de sus seminarios es “aplicación de la teledetección a la gestión de incendios forestales”. El coordinador es Juan José Fernández Ortiz, miembro de UNAP, la unidad de análisis y planificación del servicio de extinción incendios forestales en Castilla La Mancha (INFOCAM). Describe numerosos ejemplos de aplicación de la teledetección para la gestión de los incendios forestales en todas sus fases (preparación, operación y recuperación).



Describe como las imágenes satelitales cobran un papel esencial por la cantidad y calidad de datos que nos ofrecen. Sentinel 2 está compuesto por una serie de bandas, cada una de ellas operante en una franja del espectro electromagnético diferente, por lo que se puede obtener información sobre el estado y salud de la vegetación.

Hay que tener en cuenta que no toda la vegetación responde de la misma manera a la luz solar. La caracterización espectral de las masas vegetales presenta algunas dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la señal finalmente detectada por el sensor. En primer lugar, se encuentra la propia reflectividad de la hoja, que depende de su estado fenológico, forma, ángulo frente a los rayos solares, y contenido de humedad. Por otra parte, las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, índice de área foliar, etc., tienen notable influencia sobre su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores que también condicionan la recepción de la señal emitida por las diferentes cubiertas vegetales serían los derivados de la situación geográfica de la vegetación: pendiente, orientación, asociación con otras especies y geometría de la plantación (Viedma y Chuvieco, 2005).

De esta manera, en primer lugar en el seminario a través de una composición de bandas 8 (en infrarrojo cercano, de alta reflectividad de la vegetación viva) en el canal del rojo, 4 y 3 puede resaltarse en rojo las zonas donde más vegetación hay, en función de su reflectancia y, por tanto, de la carga de vegetación.

Debido a la estructura celular de las hojas, la vegetación verde refleja mucho el NIR (infrarrojo cercano) y la clorofila (un pigmento indicador de salud) absorbe considerablemente la luz del NIR. Por el contrario, la vegetación seca con mayor estrés hídrico y menor contenido de humedad, en NIR refleja menos. Este hecho puede observarse en la figura 2.

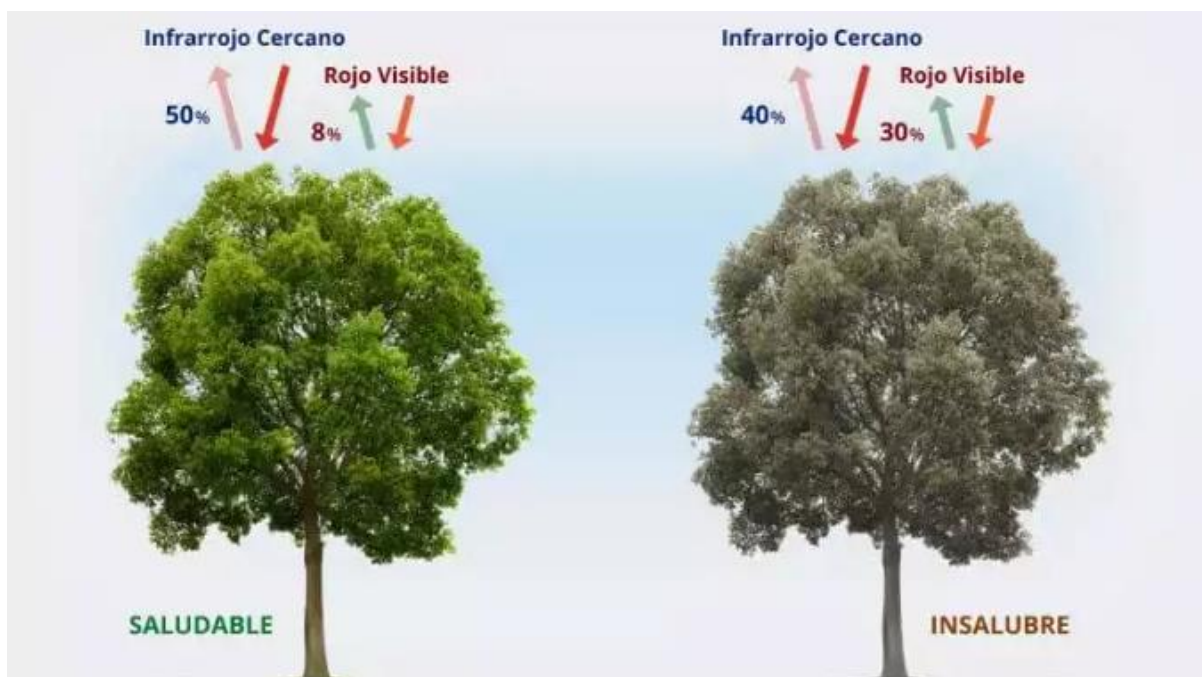


Figura 2: Respuesta de la vegetación en las bandas NIR y RED.

Fuente: EOS Data Analytics (s.f).

Los incendios forestales modifican la estructura de la cubierta vegetal y disminuyen la cantidad de clorofila y humedad de la planta, a la vez que aumenta la superficie de suelo desnudo. Estas variaciones provocan también cambios en la reflectividad de la luz solar, que se estima en este estudio con dos índices:

Son numerosos los métodos que se desarrollan para cartografiar superficies quemadas utilizando técnicas de teledetección. Uno de los métodos más utilizados para realizar esta cartografía es la comparación entre dos imágenes, una antes y otra después del incendio, mediante el método de diferencia entre bandas espectrales o índices de vegetación. El objeto de estos índices es realzar las diferencias espectrales de las zonas quemadas respecto a las demás cubiertas (Masot et al., 2016).

Entre estos índices, en el seminario se utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para identificar zonas con mayor estrés hídrico mediante la comparación con los valores máximos y mínimos históricos. Se trata de uno de los índices de teledetección más aceptados y utilizados por la comunidad científica. Se obtiene una respuesta del infrarrojo cercano (NIR), que incide directamente en la



clorofila por lo que, a mayor clorofila, mayor índice NDVI, con lo que podemos identificar la distribución de y tipo de vegetación y cuantificar la superficie dañada utilizando la ec. 1. Mide la densidad y salud de la vegetación captada en una imagen satélite en valores entre -1 y 1.

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

(1)

Donde NIR = infrarrojo cercano

RED = luz roja visible

En el resultado, los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los negativos cercanos a cero se corresponden principalmente con rocas y suelo descubierto. Los valores muy bajos (0,1 o menos) de la función NDVI detectan a áreas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores altos (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales (EOS Data Analytics, s.f). Es un buen indicador de sequía, aunque también se utiliza para cuantificar superficies forestales y en agricultura de precisión.

Para la actuación en la fase post incendio, en el seminario se describe el índice dNDVI, que se basa en la comparación del NDVI calculado en la fase de preparación con el calculado después del desastre (ec.2).



$$dNDVI = (NDVI_{post} - NDVI_{pre})$$

(2)

Este es el primer paso para estimar los daños del incendio (por ejemplo, perímetros), aunque también se utiliza para cuantificar la evolución de la regeneración (calculando los valores pre y post incendio) de la zona al ser un índice sensible a la actividad de la vegetación.

Sin embargo, para tener en cuenta el NDVI en la evaluación de daños es necesario contrastarlo con otros indicadores, por lo que también en la fase post incendio se utiliza el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR) para evaluar daños en incendios forestales y analizar la evolución de la regeneración de la cubierta vegetal. Está diseñado para resaltar grandes áreas quemadas de un incendio a través de una operación entre bandas (ec.3).



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

(3)

Donde NIR = infrarrojo cercano

SWIR = infrarrojo de onda corta

El resultado de este índice también oscila entre -1 y 1. Un valor alto indica que la vegetación tiene un buen estado de salud, mientras que si es cercana a -1 se corresponde con suelo desnudo y, por tanto, en este caso área quemada.

También incide en el comportamiento de las masas vegetales frente al espectro electromagnético en el infrarrojo, obteniendo una alta reflectancia nuevamente en el NIR, y una baja en el sector del espectro SWIR. Por el contrario, en las áreas calcinadas ocurre la situación inversa, como muestra la figura 3.

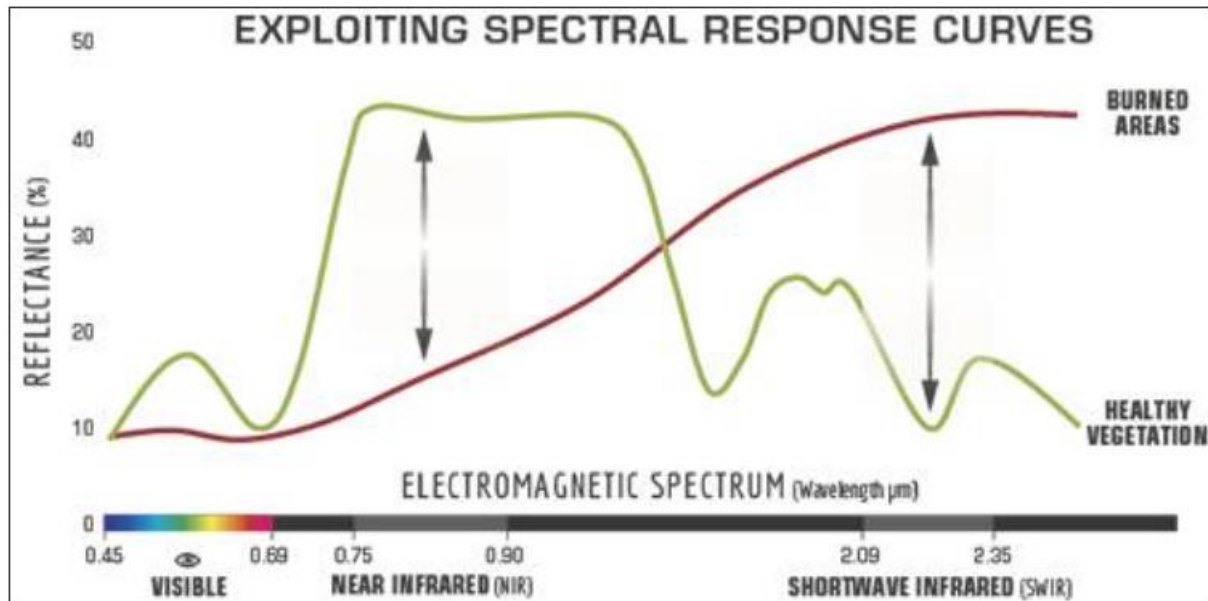


Figura 3: Respuesta de áreas quemadas en el espectro electromagnético.

Fuente: United Nations, (s.f).

El producto del diferencial entre el NBR post incendio y NBR pre incendio (dNDBR), es especialmente utilizado como base para analizar la severidad del desastre(ec.4). Esto permite visualizar y cuantificar qué zonas han sufrido más cambios y estableciendo algunos rangos pueden establecerse las zonas con mayor daño de forma automática (esto se correspondería con zona con mayor variación de NBR, es decir, mayor número de valores lejanos a 0 en el índice dNBR).

$$dNBR = (NBR_{post} - NBR_{pre})$$

(4)



El dNBR supone el índice normalizado de severidad del fuego y muestra también valores entre -2 y 2, que por el contrario relaciona un valor más alto con un daño más severo.

Para la visualización de los resultados del dNBR, el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) establece los rangos de severidad y simbología más utilizados por la comunidad científica.

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10^3)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Tabla 5: Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR.

Fuente: United Nations, (s.f).

Estos índices implican una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la imagen (Speranza y Zerda, 2002) y están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales. Sus variaciones se utilizan para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación.

A través de las imágenes de satélite, aprovechando que algunos satélites, como Landsat 5 llevan más de 40 años en órbita, puede hacerse una reconstrucción del histórico de incendios, que permite tener un registro de los incendios más determinantes y significativos para estudiar qué patrones han seguido e identificar bajo qué condiciones sinópticas y de riesgo se han dado para así poder anticiparse a futuros escenarios.

A través de esta revisión bibliográfica, se propone una metodología para valorar la entrada de procedimientos geomáticos en la gestión de los incendios forestales acontecidos que se describen a continuación.



5. Material

5.1 Caracterización del área de estudio

Tal y como se ha mencionado en el resumen, el ámbito de estudio se sitúa al suroeste de la provincia de Málaga, en el macizo de Sierra Bermeja. Este enclave separa la Serranía de Ronda de la costa mediterránea y pertenece a la región de la Costa del Sol. Sierra Bermeja es un macizo con una altura media en torno a 1000 msnm, formado por fuertes pendientes y abruptos desniveles de terreno muy accidentado con quebradas y lomas. Esto es debido a la naturaleza geológica de la zona, que está formada por afloramientos de peridotitas que generan un alto índice de endemismo vegetal y crea zona de alto valor biológico. Estas condiciones elevan el grado de pedregosidad además de dificultar mucho las operaciones terrestres y movilización sobre el terreno de los dispositivos contra incendios.

El clima se caracteriza por una precipitación relativamente elevada (1022 mm/año) y una temperatura media anual de 16,8°C. El régimen de temperaturas es de tipo térmico y el régimen hídrico xérico (Soil Taxonomy, 1997), con más de 100 días de déficit de humedad a pesar de la importancia de las precipitaciones en términos anuales (Aguilar et al. 1997).

La zona afectada se caracteriza por un riesgo de extremo de incendio por la continuidad de combustibles pesados con alta probabilidad de generar grandes incendios forestales, de acuerdo con el Estudio de Riesgo de Incendios Forestales de Andalucía (2015). La vegetación dominante está constituida por un sotobosque con abundancia de *Alyssum serpyllifolium*, *Halymium atripicifolium*, *Genista*, *Stochelina betica* sobre la que se instala una vegetación arbórea dominada por *Pinus pinaster* y el *Abies pinsapo* a partir de 1200 msnm. (Aguilar et al. 1997). Los modelos combustibles con mayor presencia en el área afectada son los dominados por el estrato arbóreo, en su mayoría con sotobosque arbustivo, siendo los modelos 4, 7, 8 y 10 los predominantes según la Clasificación de la fórmula de Rothermel, que utilizaremos en posteriores apartados. Los modelos de maleza bajo pinar están compuestos por *Pinus pinaster* (pino), *Cistus sp* (jaras o estepas), *Ulex* (arbusto) y *Stipa*, con una fracción de cobertura arbórea entre 60-80% (Martín & Zotano, 2021).



En la figura 4 se representa la localización del ámbito de estudio y los incendios forestales objeto de estudio (delimitado en naranja en el caso de 2021 y azul para 2022) en el contexto de España y de la provincia de Málaga sobre una imagen satelital (véase anexo 1).

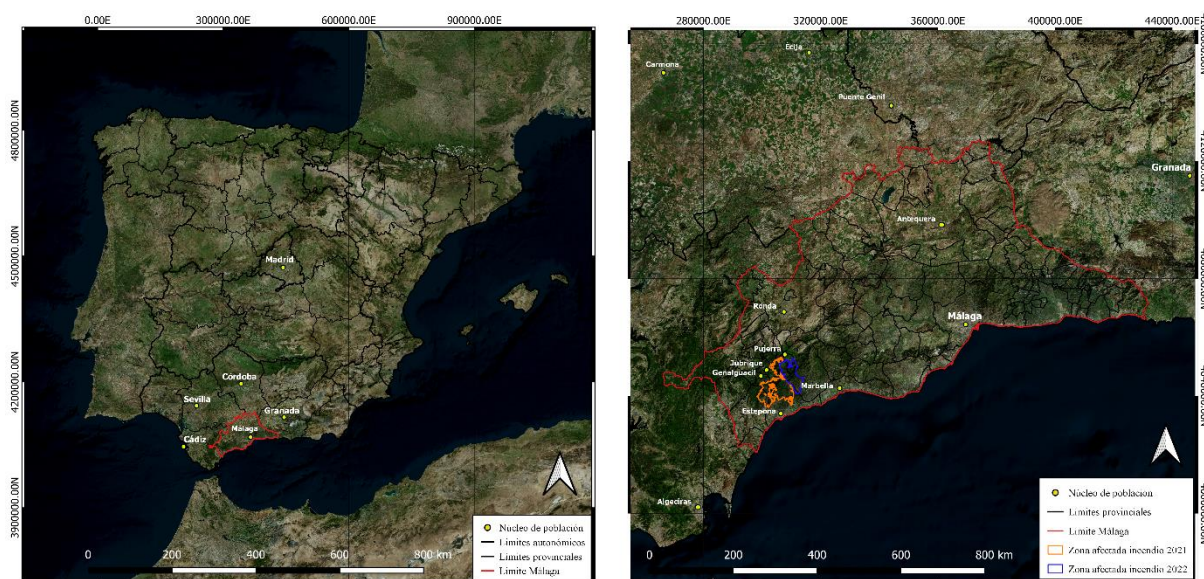


Figura 4: Contexto de la zona estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IGN y DERA.

Son dos los incendios que se analizan en este estudio, encontrándose limítrofes. El primero de ellos fue detectado en el municipio de Jubrique el 9 de septiembre de 2021 a las 21:35 horas, y no fue considerado extinguido hasta el 24 de octubre del mismo año, a las 19:00 horas. La superficie del fuego fue de 8.401 ha, con un perímetro de 240,69 km de longitud, afectando a los municipios de Estepona (4.117,77 ha), Casares (1.305,29 ha), Jubrique (1.177,44 ha) y Genalguacil (1.043,33 ha), Júzcar (471,45 ha), Farajan (285,26 ha) y Benahavís (0,48 ha), todo según datos de la Dirección General del Medio Natural, Biodiversidad y Espacios Protegidos de la Junta de Andalucía. Afectó al bosque más gran del mundo de pinsapos, calcinando más de 1000 ejemplares. La especie se caracteriza por tener un crecimiento muy lento y en peligro de extinción (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 2021). El segundo fue detectado el 8 de junio de 2022 en el municipio de Pujerra, al este del incendio de Jubrique, calcinando un total de 4.860 ha en los municipios de Benahavís,



Estepona, Faraján, Igualeja, Jubrique, Júzcar y Pujerra, a falta de publicación oficial. Fue declarado extinguido el 26 de junio del mismo año (Vázquez, 2022).

Para una visualización de la zona afectada por ambos incendios, resulta de especial interés tener en cuenta que emplear parámetros radiométricos a través de una composición espectral, facilita la discriminación de la vegetación afectada por el incendio, debido a la sensibilidad de la energía que emite o absorbe la superficie en función de su estado.

En base a ello, las dos combinaciones de bandas que han resultado ser más eficaces para representar este contraste son por un lado la 7, 6 y 5 (infrarrojo onda larga, infrarrojo onda corta e infrarrojo cercano), a la izquierda, y 7, 5 y 4 (infrarrojo onda larga, infrarrojo cercano y rojo), a la derecha, aplicando la misma simbología que para el anexo 2.

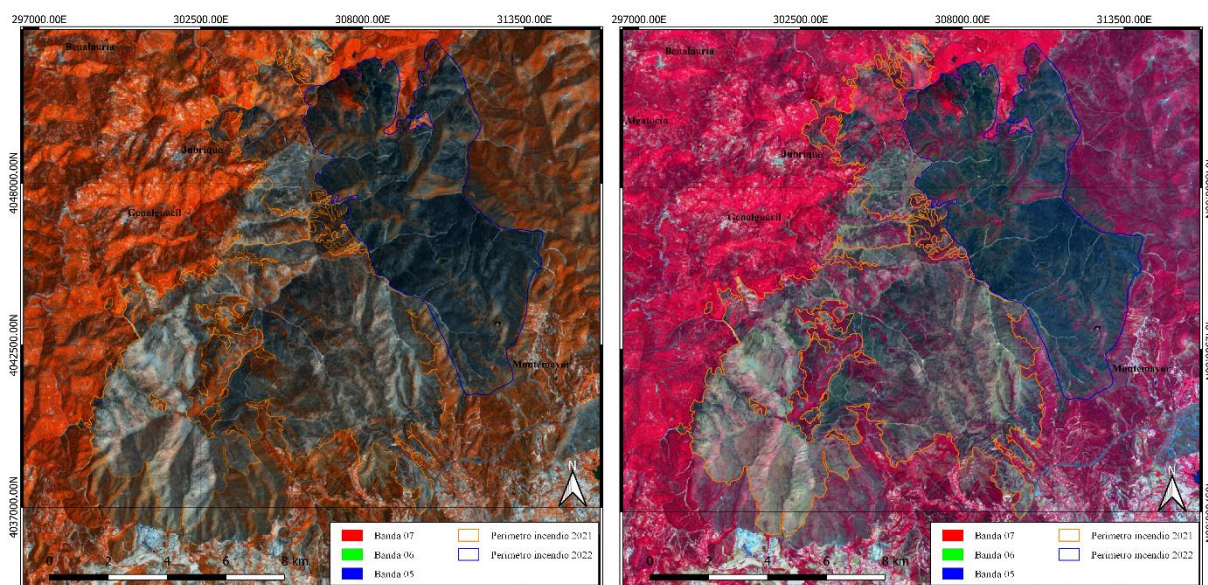


Figura 5: Visualización de la zona afectada mediante composiciones multispectrales.

Fuente: Elaboración propia.



5.2 Datos de partida

Dado que los productos necesarios para abordar el estudio son variados, también lo son las fuentes de información necesarias para obtenerlos, tanto en formato ráster como vectorial y basadas en consultas a organismos oficiales. En la primera parte del estudio, relativa al riesgo de incendio, son necesarios datos sobre la vegetación y características orográficas. Para ello se han utilizado la Red de Información Ambiental de Andalucía (en adelante REDIAM) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN) por ser fuentes de datos estandarizadas, oficiales y apropiadas para el estudio.

Por otra parte, para la valoración de daños causados por el fuego se precisan imágenes de satélite obtenidas con sensores multiespectrales que nos permitan el cálculo de algunos índices necesarios para poder cuantificarlo. Para ello, nos basaremos en imágenes del satélite Sentinel 2 del programa Copérnicus.

5.2.1 REDIAM

Como ya se ha comentado en primer lugar se lleva a cabo un análisis de riesgo potencial de incendio en la zona. Entre las variables que determinan el comportamiento del fuego, destacan las características de la vegetación y las condiciones que los combustibles vegetales presentan (véase 4.2.1 Índices de combinaciones de bandas aplicables a incendios forestales).

Para llevarlo a cabo, tomamos de partida los datos obtenidos de REDIAM, que integra toda la información que sobre el medio ambiente se produce con referencia espacial en Andalucía. Entre sus servicios destacan el catálogo de datos e importación ambiental, estadísticas ambientales, geoportal, observación y caracterización del territorio mediante teledetección y un centro de descargas de información ambiental e información del territorio que utilizaremos para la elaboración del estudio.

De forma más específica, REDIAM contiene un estudio de “riesgo por combustibilidad” que incluye coberturas vectoriales y ráster clasificadas de los distintos riesgos de incendios asociados a la combustibilidad y representados en tres escalas distintas (Paisaje, Cuencas y Local). Entre los productos obtenidos por la red, se ha seleccionado la capa vectorial “Modelos de Combustible Forestal. Año 2006-200”



creada a partir de las clases de la capa del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) de 2011, en formato shape. Las estructuras vegetales son agrupadas según dos tipos de clasificación: los modelos de combustible de Rothermel adoptados y estandarizados mundialmente (13 modelos agrupados en pastos, matorral, hojarasca bajo arbolado y resto de operaciones silvícolas) y los modelos de combustible UCO40 (40 modelos de mayor detalle, desarrollados por la Universidad de Córdoba).

5.2.2 Instituto Geográfico Nacional

Otra de las variables que determinan el comportamiento del fuego es la orografía, por lo que resulta esencial obtener un modelo digital de pendientes preciso. Para ello, nos basaremos en el Modelo Digital del Terreno (en adelante MDT) en formato ráster del Instituto Geográfico Nacional de España (en adelante IGN).

Entre las aplicaciones disponibles en IGN, cabe destacar el Geoportal SIGNA (Sistema de Información Geográfica Nacional), que tiene como objetivo integrar todas las bases de datos geográficos digitales del IGN en un SIG. Además, contiene un Sistema de Información del Atlas Nacional de España virtual mediante la web SIANE, que conlleva la redefinición, desarrollo y mantenimiento del Atlas Nacional de España. También dispone del geoportal IBERPIX, una aplicación de gran utilidad, en la que pueden visualizarse cartografía actual e histórica, mapas ráster, imágenes de satélite y ortofotos actuales e históricas, además de dar la posibilidad de descargar imágenes georreferenciadas entre otras funciones.

Asimismo, el IGN dispone de un centro de descargas a través del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) que contiene entre otros; mapas vectoriales y bases topográficas, mapas en formato imagen, fotos e imágenes aéreas y modelos digitales de elevaciones, que incluyen coberturas LiDAR, Modelo digital de Elevaciones (en adelante MDE) y MDT.

A través del centro de descargas se obtienen los productos necesarios para el estudio. Concretamente se utiliza el MDT 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m para posteriormente elaborar una cartografía de pendientes. El MDT se ha obtenido por



interpolación a partir de la clase terreno de vuelos LIDAR de la primera cobertura entre 2014 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable.

5.2.3 Programa Copérnicus

Copérnicus es el Programa de observación de la tierra de la Unión Europea. Ofrece servicios de información basados en datos de observación de la Tierra por satélite y en datos in situ (no espaciales).

La Comisión Europea coordina y gestiona el programa, en cuya ejecución colaboran los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a medio plazo, las agencias de la UE y la empresa Mercator Océan.

Se utilizan enormes cantidades de datos globales procedentes de satélites y sistemas de medición terrestres, aéreos y marítimos para proporcionar información que ayude a los proveedores de servicios, las administraciones públicas y otras organizaciones internacionales a mejorar la calidad de vida de la ciudadanía europea. Los servicios de información proporcionados son de acceso gratuito y abierto para sus usuarios.

Concretamente para la elaboración de la segunda parte del estudio descrita en los objetivos, la valoración de daños causados una vez ocurrido el desastre, se utilizan imágenes de satélite descargadas del servicio Copernicus Open Access Hub con las que se calculan los índices necesarios para llevar a cabo el análisis.

Se ha utilizado la misión Sentinel-2, que comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita heliosíncrona. Su ancho de franja orbital es de 290 km, con una resolución temporal de 10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones libres de nubes, lo que resulta en 2-3 días en latitudes medias. Contiene un total de 13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de resolución espacial. Las bandas que utilizaremos en el estudio son las 4, 5, 8 y 12, por lo que la resolución sobre la que trabajaremos será de 20 m.



Sentinel-2 tiene dos tipos de productos. En el nivel 1C las imágenes se encuentran ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA), mientras que en el nivel 2A se encuentran también ortorectificadas pero con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera (BOA), por lo que éstas están corregidas atmosféricamente (Tabla 6).

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution	600 MB (each 100x100 km ²)
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectance in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution and generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	800 MB (each 100x100 km ²)

Tabla 6: Tipos de productos disponibles con Sentinel 2.

Fuente: European Space Agency (s.f).

Para la caracterización espectral mediante imágenes satelitales, hay varios factores a tener en cuenta a la hora de obtenerlas para que nos proporcionen una cobertura válida para el proyecto. Esto se debe a que el tipo de señal que recibe el satélite puede variar considerablemente y derivar en conclusiones erróneas del estudio, por lo que han de obtenerse bajo una serie de condiciones similares:

- Conviene seleccionar imágenes a un nivel 2A, ya que se encuentran corregidas atmosféricamente y son más adecuadas para realizar procesos analíticos basados en reflectancias de bandas y diferentes épocas.
- Es importante que las imágenes estén libres de nubes, ya que éstas distorsionan los resultados de los productos.
- La zona de estudio comprende dos zonas de captura de Sentinel-2, por lo que para evitar fluctuaciones en los valores de reflectancia las imágenes han de estar capturadas a horas y fechas próximas (en el caso de este trabajo, la hora es la misma).
- Para garantizar una cicatriz de quema discriminable, las imágenes han de adquirirse en fechas próximas al evento tanto en la fase previa como



posterior en ambos eventos y a una misma hora para que la posición del sol sea similar.



6. Metodología

Tal y como apuntan los objetivos, el trabajo se basa en estudiar la viabilidad de la aplicación de diversas técnicas geomáticas para analizar el riesgo de ignición en una zona y evaluar los daños y severidad del evento. Se trata por tanto de un estudio de carácter teórico-metodológico que se basa en la adaptación de las metodologías referidas en los antecedentes a este caso de estudio.

En la figura 6 se representa el esquema de la metodología llevada a cabo para la elaboración de los resultados.

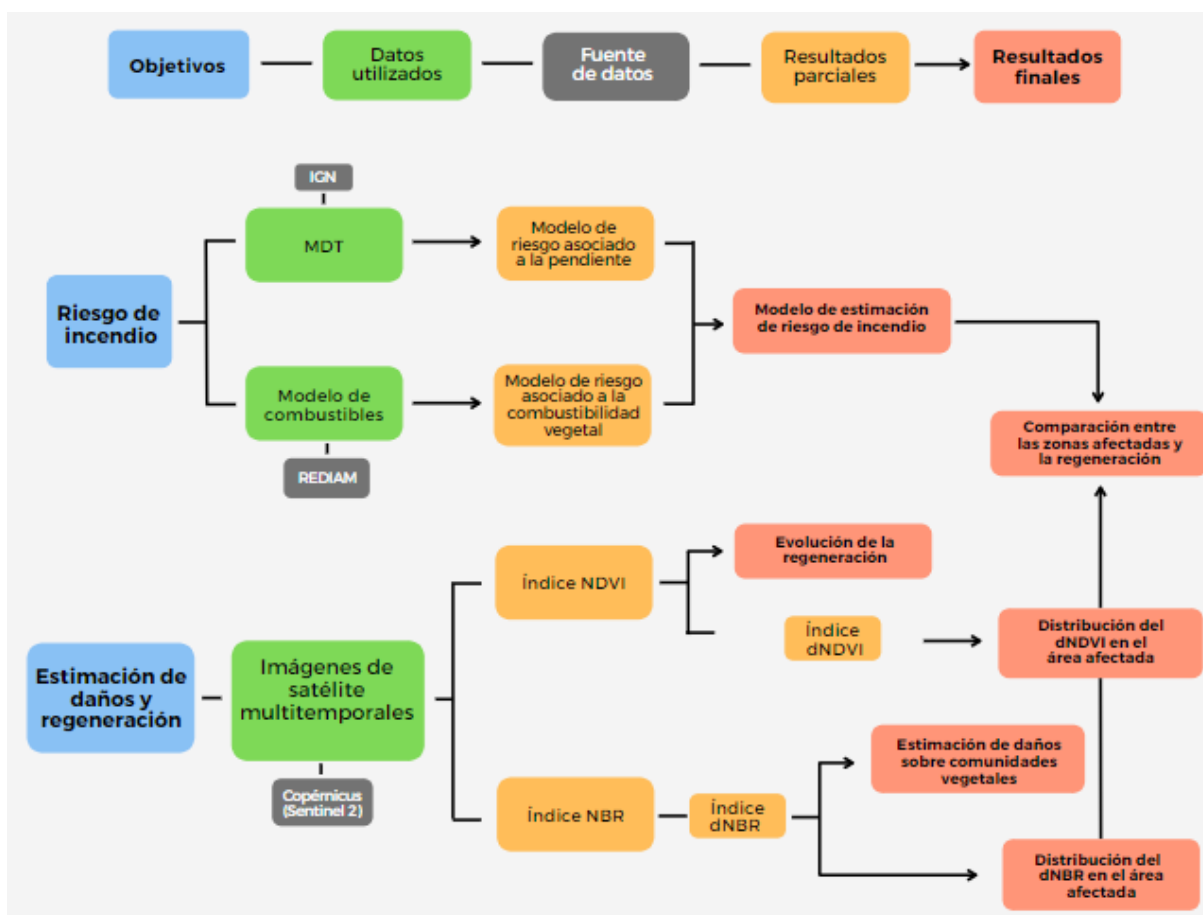


Figura 6: Esquema metodológico del trabajo.

Fuente: Elaboración propia



Ya que el estudio se lleva a cabo primeramente en la fase previa al incendio para después contrastar esos datos con los obtenidos en la fase posterior, tal y como señala el esquema se divide la metodología en dos partes bien diferenciadas.

6.1 Fase previa al incendio. Estimación del Índice de Riesgo Territorial de Incendio.

Para estimar el índice de riesgo de ignición se sigue un procedimiento multicriterio que consta de varios pasos, de acuerdo con la metodología descrita del Plan INFOCA que tomamos de referencia. Ya que principalmente se considera que el riesgo de incendio viene determinado por la orografía y caracterización de la vegetación y su estado, comenzaremos por el índice orográfico de la zona, que se mide mediante el análisis de la pendiente.

Podríamos definir la pendiente del terreno en un punto dado como el ángulo que forma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno en ese punto. Es, en definitiva, la inclinación o desnivel del suelo. Puede ser expresada como un ángulo, pero es más interesante representar la pendiente del terreno como un valor de tanto por ciento. Esto se obtiene multiplicando por 100 la tangente del ángulo que define el desnivel del suelo (Moreira, 1994). Por su parte, la orientación u exposición es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al Norte geográfico, medido en sentido de las agujas del reloj (Jiménez, 2005).

Este factor es de especial consideración ya que un relieve escarpado favorece la rápida propagación vertical del fuego, debido a que el aire al calentarse disminuye su densidad y asciende por la ladera y dependiendo de su temperatura y estado de puede prenderla (transmisión térmica por convección). Para su obtención partimos del producto MDT del IGN (ráster) con un paso de malla de 5 metros, del que se obtiene el modelo digital de pendientes expresadas en porcentaje. Para poder cruzar esta información con la de vegetación, se lleva a cabo una reclasificación y posterior vectorización del modelo creando un nuevo campo "Índice numérico" que se utiliza para establecer el riesgo de incendio asociado a cada rango de pendiente,



basándonos en la información contenida en el informe de la Junta de Andalucía en 2003 tomada referencia. Véase tabla 1.

En segundo lugar, quedaría examinar la caracterización de la vegetación y su estado. Toda la materia vegetal disponible de origen vegetal en una masa forestal puede arder, por lo que se la considera combustible. El grado de inflamabilidad varía en función de su contenido en agua, densidad y tipo de tejido. Para llevar a cabo un estudio de riesgo de incendio, partimos de la capa vectorial de REDIAM “Modelos de combustible” en formato shape, creada a partir de las clases de la capa del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) de 2011. Este modelo está basado en la propuesta de Rothermel de “Modelos de Combustible”. Se basa en 13 modelos de combustible diferenciados según su combustibilidad, distribución espacial, continuidad de la masa vegetal y carga de combustible según se muestra en la tabla 7.



GRUPO	MODELO DE COMBUSTIBLE	DESCRIPCIÓN
Pasto	1	Pasto fino y seco, cubre todo el suelo. Puede haber presencia de plantas leñosas ocupando < 1/3 superficie.
	2	Pasto fino y seco, cubre todo el suelo. Puede haber presencia de plantas leñosas ocupando entre 1/3 y 2/3 superficie.
	3	Pasto grueso, denso, seco y alto (> 1 m). Puede haber algunas plantas leñosas dispersas.
Matorral	4	Matorral o plantación joven muy densa; de más de 2 m de altura; con ramas muertas en su interior. Propagación del fuego por las copas de las plantas.
	5	Matorral denso y verde, de menos de 1 m de altura. Propagación del fuego por la hojarasca y el pasto.
	6	Parecido al modelo 5, pero con especies más inflamables o con restos de corta y plantas de mayor talla. Propagación del fuego con vientos moderados a fuertes.
	7	Matorral de especies muy inflamables; de 0,5 a 2 m. de altura, situado como sotobosque en masas de coníferas.
Hojarasca bajo arbolado	8	Bosque denso, sin matorral. Propagación del fuego por la hojarasca muy compacta
	9	Parecido al modelo 8, pero con hojarasca menos compacta, formada por acículas largas y rígidas o follaje de frondosas de hojas grandes.
Restos de Podas y operaciones Silvícolas	10	Bosque con gran cantidad de leña y árboles caídos, como consecuencia de vendavales, plagas intensas, etc.
	11	Bosque claro y fuertemente aclarado. Restos de poda o aclarado.
	12	Predominio de los restos sobre el arbolado. Restos de poda o aclareo cubriendo todo el suelo.
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos y pesados, cubriendo todo el suelo

Tabla 7: Modelos de combustible de Rothermel de 1972.

Fuente: TYC GIS (s.f).

Tal y como se menciona anteriormente, para hacer el análisis se cruza la información sobre pendientes y vegetación. Para el primer caso, ya reclasificamos el Modelo Digital de Pendientes en 5 categorías, por lo que en lo referente a la vegetación seguimos la misma metodología partiendo de “Modelos de combustible”, creando también un nuevo campo llamado “Índice numérico”. Véase Tabla 1.

De esta manera, tanto en el Modelo de Pendientes como en el Modelo de Combustibles contienen un campo común “Índice numérico”, que utilizamos para rasterizar el modelo vectorial de combustibles. Finalmente, una vez se suman ambos modelos se obtiene una matriz de Índice Territorial de Riesgo de Incendio en base a



la pendiente y combustibilidad de la masa vegetal, que identifica las zonas del ámbito de estudio en una escala del 0 (riesgo mínimo) al 10 (riesgo máximo).

Cabe puntualizar que este índice cuenta con la ventaja de que puede considerarse para un estudio a un medio y largo plazo, ya que las variables en las que se basa son más estables a lo largo del tiempo que otras que otras no tenidas en cuenta en el estudio, como por ejemplo los factores meteorológicos (véase anexo 5).

6.2 Fase posterior al incendio. Evaluación de daños y regeneración de la cubierta vegetal.

La fuente de información utilizada en esta parte de la metodología son imágenes de satélite. Concretamente se pretende utilizar imágenes de Sentinel 2 con resolución espacial de 10, 20 y 60 metros para un total de 13 bandas, en el infrarrojo cercano e infrarrojos de onda corta del espectro electromagnético. Se obtienen a través del programa Copernicus ya que se corresponden con productos multispectrales, idóneos para este estudio dado el abanico de datos que ofrece dentro y fuera del espectro visible del espectro electromagnético. En el caso del incendio de 2021, ya que el perímetro afecta a una zona de dos imágenes de Sentinel 2, ha sido necesario descargar ambas para después unirlos.

Además de las condiciones descritas en el apartado 5.2.3, “hay que considerar la reflectancia que recibe el satélite en la fase posterior al incendio que proviene de la formación y deposición de carbón y cenizas, ya que es el resultado de la combustión de la vegetación, pero es menos nítida para discriminar los efectos del fuego, puesto que otros factores pueden también causar cambios en la vegetación” (Masot et al., 2016). Por este motivo se han escogido imágenes adquiridas en un intervalo de tiempo posterior al incendio similar a contar desde el día que éste es declarado extinguido (21 días en el incendio de 2021 y 26 días en el caso del incendio de 2022).

Así, las imágenes utilizadas son las siguientes se recogen en la tabla 8.



Imagen	Aplicación	Captura
S2A_MSIL2A_20210806T105621_N0301_R094_T30STF_20210806T140713.SAFE	Previa 2021	06/08/2021. 10:56
S2A_MSIL2A_20210806T105621_N0301_R094_T30SUF_20210806T140713.SAFE	Previa 2021	06/08/2021. 10:56
S2A_MSIL2A_20211114T110321_N0301_R094_T30STF_20211114T140248.SAFE	Posterior 2021	14/11/2021. 11:03
S2A_MSIL2A_20211114T110321_N0301_R094_T30SUF_20211114T140248.SAFE	Posterior 2021	14/11/2021. 11:03
S2A_MSIL2A_20211114T110321_N0301_R094_T30SUF_20211114T140248.SAFE	Previa 2022	14/11/2021. 11:03
S2A_MSIL2A_20220722T105631_N0400_R094_T30SUF_20220722T171159.SAFE	Posterior 2022	22/07/2022. 10:56
S2A_MSIL2A_20211127T111411_N0301_R137_T30SUF_20211127T140625.SAFE	Regeneración 2021	27/11/2021 11:14
S2B_MSIL2A_20220131T111209_N0400_R137_T30STF_20220131T130504.SAFE	Regeneración 2021	31/01/2022 11:12
S2A_MSIL2A_20220416T110621_N0400_R137_T30STF_20220416T152833.SAFE	Regeneración 2021	16/04/2022 11:06
S2A_MSIL2A_20220722T105631_N0400_R094_T30SUF_20220722T171159.SAFE	Regeneración 2022	22/07/2022. 10:56
S2A_MSIL2A_20220930T105851_N0400_R094_T30SUF_20220930T171701.SAFE	Regeneración 2022	30/09/2022 10:58
S2A_MSIL2A_20221119T110341_N0400_R094_T30SUF_20221119T165556.SAFE	Regeneración 2022	19/11/2022 11:03

Tabla 8: Imágenes satelitales utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas las imágenes de satélites y siguiendo los objetivos del trabajo, se realiza la evaluación de daños y el seguimiento de la regeneración de la cubierta vegetal.



En el caso de la evaluación de daños y basándonos en el seminario web del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales y Graduados en Ingeniería Forestal y del Medio Natural descrito en el apartado 4. Antecedentes, el estudio se apoya en los índices estandarizados; NDVI, dNDVI, NBR y dNBR.

En primer lugar, el NDVI en este estudio se utiliza para el cálculo del dNDVI, que nos permite visualizar las zonas más afectadas ya que se tiene en cuenta el NDVI pre incendio y el NDVI post incendio (figura 11 y anexo 7). Se representa con una escala de -2 (zona más afectada) a 2 (zona menos afectada). El NDVI también se utiliza en el estudio para el seguimiento de la regeneración de la cubierta vegetal posterior al incendio, en este caso con una escala desde < 0 (zonas con una regeneración mayor) hasta 0.4 (zonas con una regeneración menor) como puede verse en la figura 13 y el anexo 8. En el caso de este estudio, para el cálculo del NDVI son necesarias las bandas 4 (Red) y 8 (NIR) de Sentinel 2 en la ecuación 1.

Por otra parte, en el estudio nos valdremos del el NBR para calcular el dNBR, utilizando en este caso las bandas 8 (infrarrojo cercano) y 12 (infrarrojo de onda corta) de Sentinel 2 en la ecuación 2. El dNBR se utiliza en el trabajo también para visualizar la afección de los incendios en la zona de estudio, en este caso con una escala de < -0.25 (zona menos quemada) a 1.3 (zona más quemada) como muestran la figura 11 y el anexo 7. A través de un cruce entre los datos obtenidos del índice dNBR en los incendios de 2021 y 2022 y la información disponible en la capa de información del Mapa Forestal de España del IGN, se estudia la severidad con la que ha afectado el incendio (basándonos en los rangos de la tabla 5 propuestos por el USGS en cada especie vegetal) como puede observarse en las figuras 14 y 15.



7. Resultados

Para la presentación de los resultados se sigue el orden propuesto en la metodología y basado en los objetivos del trabajo. Teniendo esto en cuenta, los resultados se dividen en 3 apartados.

7.1. Índice de riesgo de incendio

A través del cruce de información obtenida de los modelos de riesgo por combustibilidad y pendiente, como muestran los anexos 3 y 4, se estima un modelo de riesgo de incendio en el límite del perímetro de los incendios sucedidos en 2021 y 2022 en Sierra Bermeja (véase anexo 5).

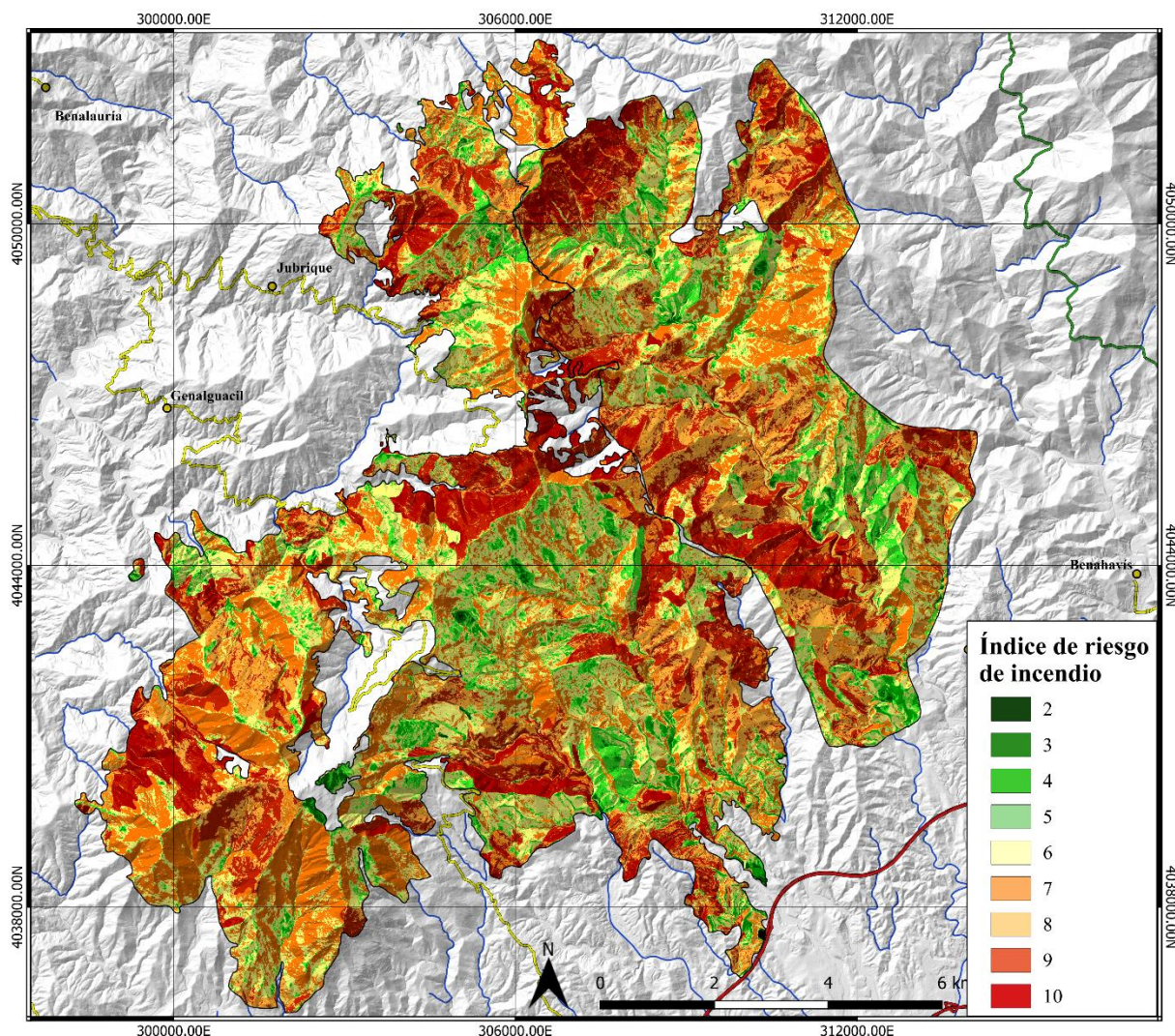


Figura 7: Modelo de estimación de riesgo de incendio forestal.

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que el valor que más se repite en el modelo ráster de riesgo por combustibilidad (anexo 3) es el 2 (bajo), ocupando un 48,19% de la superficie afectada por los incendios. Por otro lado, en el modelo de riesgo asociado a la pendiente (anexo 4) son los valores 4 y 5 los que más se repiten (suponen el 43,04% y 41% de la superficie quemada) por lo que el porcentaje de riesgo en base a la pendiente es muy alto. A la vista de los resultados, puede preciarse que la densidad de la vegetación que presenta la zona afectada por los incendios es generalmente baja, como muestra el anexo 1. A pesar de ello, la elevada accidentalidad del terreno, representada en el anexo 2, provoca que se obtenga un modelo de riesgo de incendio



en el que la mayor parte de la superficie (un 61,35% de la superficie quemada) se corresponda con un índice de riesgo de incendio por encima de 7 (alto), especialmente acentuado en las zonas con un índice de riesgo por combustibilidad de 5 (el máximo), algo que puede apreciarse en el anexo 3.

Dado que la metodología de referencia para la elaboración de este modelo ha sido la del Plan INFOCA, se comparan los resultados con el modelo de “Riesgo de incendio estructural” realizado por REDIAM, por ser la fuente de datos del Plan INFOCA (Anexo 6), algo que parece especialmente interesante ya que no se han tomado en consideración las mismas variables.

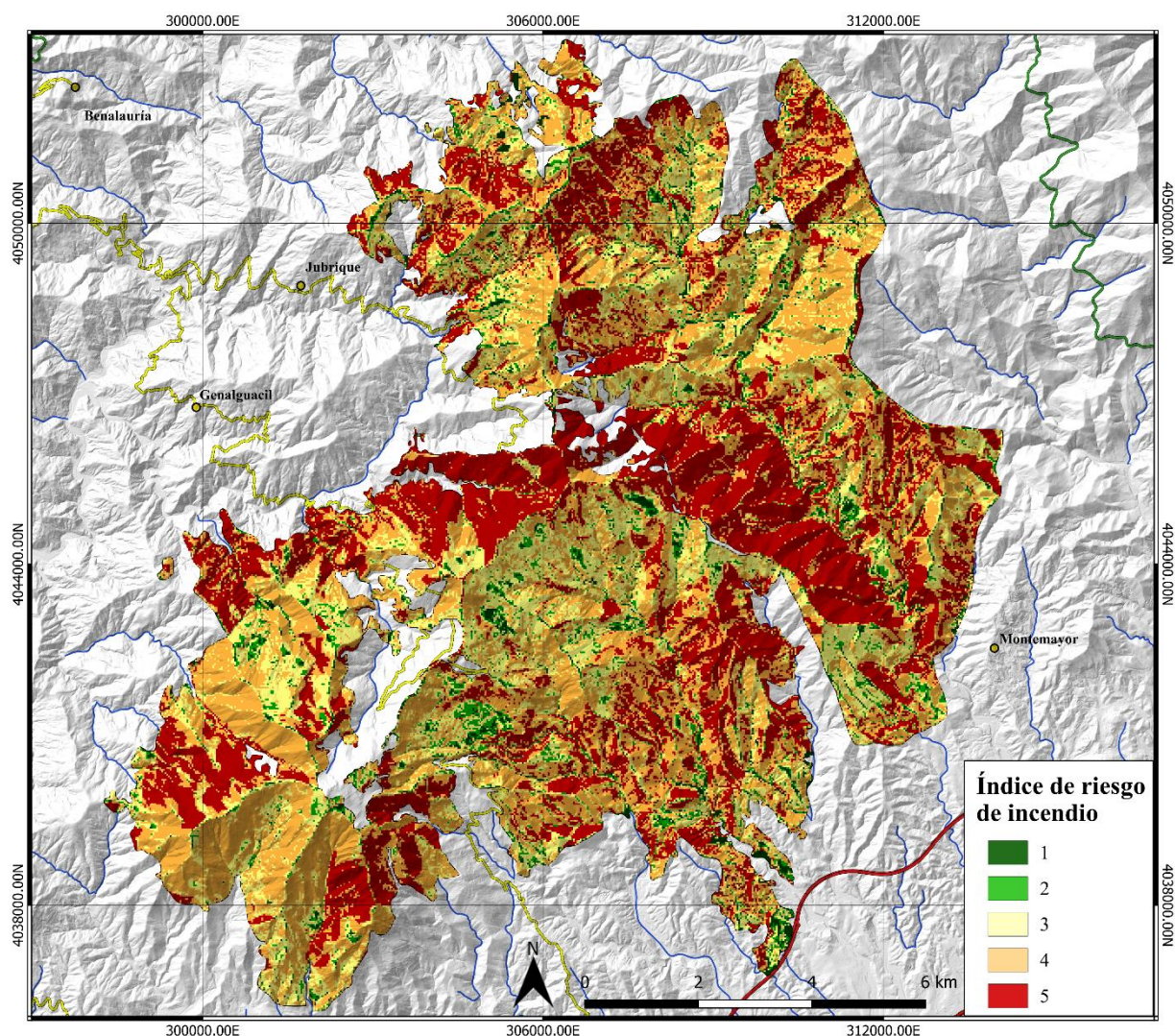


Figura 8: Modelo de estimación de riesgo de incendio forestal (REDIAM).

Fuente: Elaboración propia.



Tal y como se puede observar, ambos modelos son (en general) coincidentes con la estimación del índice riesgo de incendio calculado. A pesar de ello, hay que tener en cuenta que el modelo elaborado por REDIAM tiene en cuenta algunas variables que, como ya se menciona anteriormente, no se han tenido en cuenta en este trabajo (tales como la orientación o datos meteorológicos y climáticos), por lo que se observan algunas diferencias en los tonos naranja y rojo correspondientes a las categorías 4 y 5 del modelo adoptado por el INFOCA. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que el modelo de REDIAM tiene una escala del 1 al 5, mientras que el resultante en este trabajo del 1 al 10, lo que acentúa algunas de estas discrepancias.

A la vista de este contraste de resultados, se representa el histograma de frecuencias de los índices en cada modelo (figura 9), para realizar una comparación en base a valores numéricos.

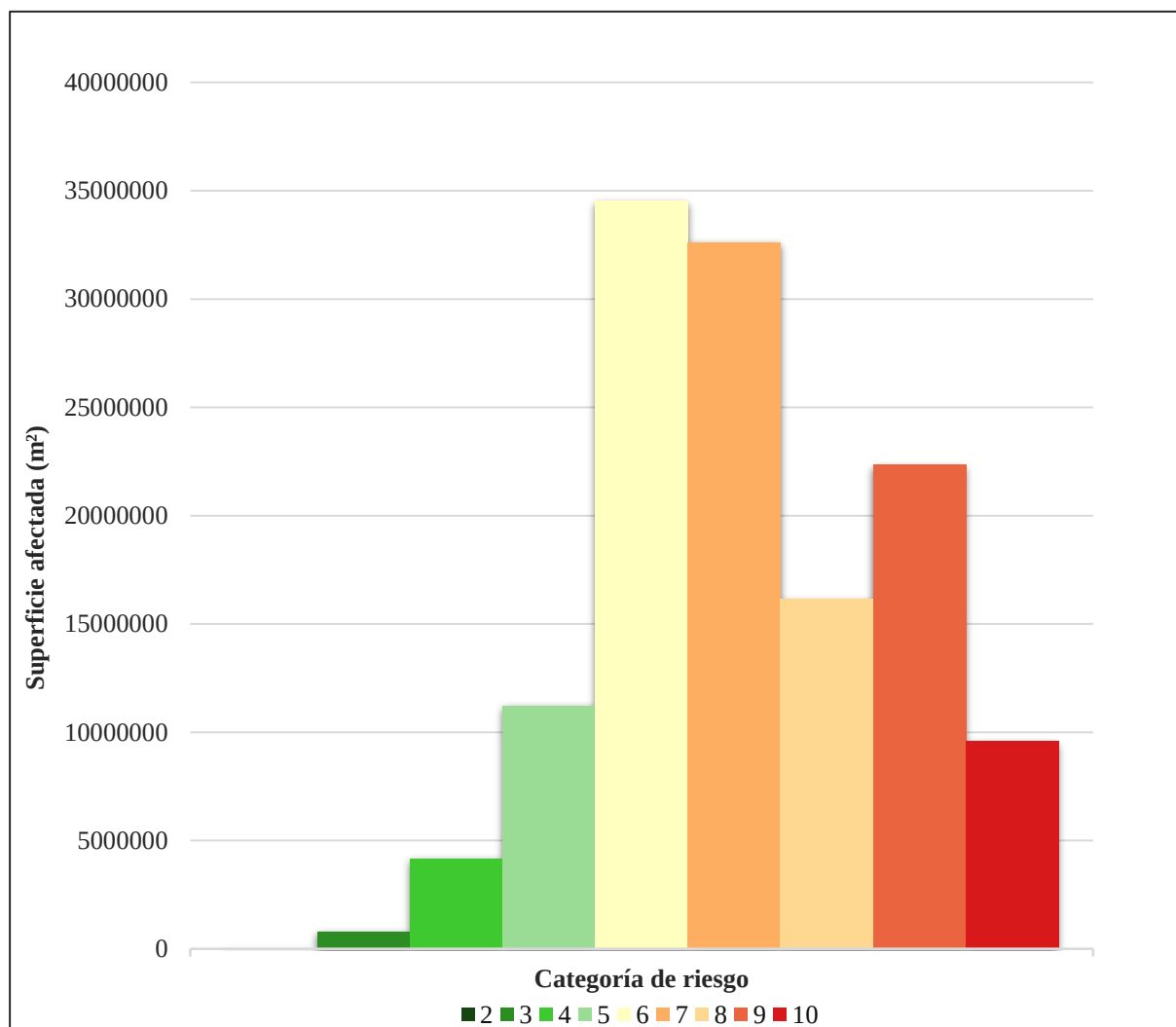


Figura 9: Distribución de las categorías de riesgo de incendio por superficie en el modelo elaborado en el trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

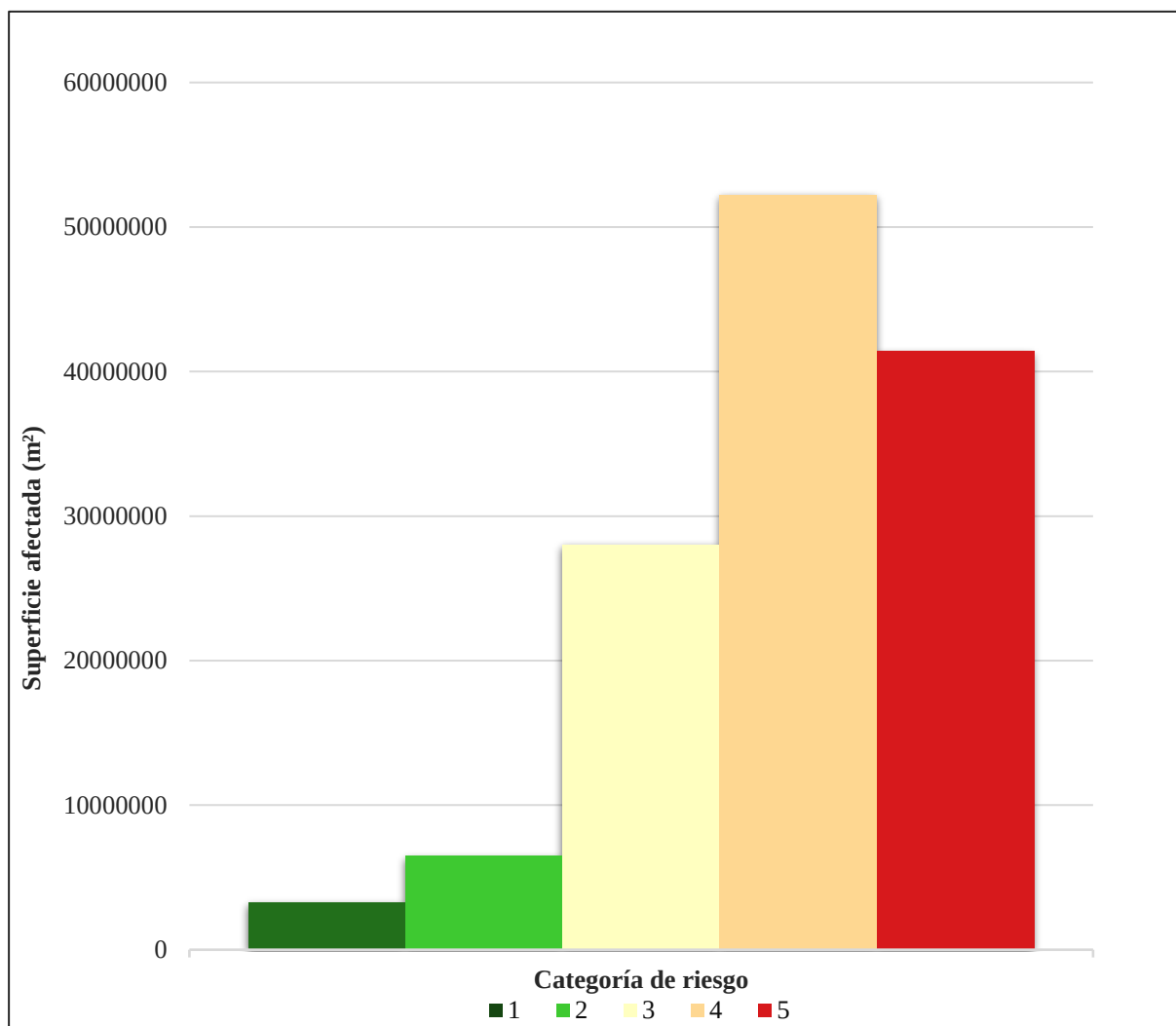


Figura 10: Distribución de las categorías de riesgo de incendio por superficie en el modelo elaborado por REDIAM.

Fuente: Elaboración propia.

Atendiendo a los resultados de la figura 9, las categorías de riesgo que ocupan más superficie en el modelo de estimación de riesgo de incendio del trabajo (figura 7) son la 6 y la 7 (que se corresponden con las categorías 3 y 4 en el modelo de REDIAM en la figura 8). Por otra parte, a la vista de los resultados de la figura 10 son las categorías 4 y 5 las que más superficie ocupan en el modelo de REDIAM (que se corresponden con las categorías 8 y 10 del modelo de riesgo del trabajo). Por tanto, puede deducirse que, aunque son modelos de estimación de riesgo de incendio similares, en el caso

de REDIAM las categorías que más superficie ocupan en el modelo son las más cercanas al máximo (en este caso 5) los valores son levemente superiores de forma sistemática.

7.2. Evaluación de daños mediante índices dNDVI y dNBR

De acuerdo con los objetivos del proyecto, el segundo aspecto que se tiene en cuenta en el estudio es la evaluación de daños causados por los incendios. Para ello, de la metodología de referencia se ha optado por el cálculo de los parámetros dNDVI y dNBR (anexo 7).

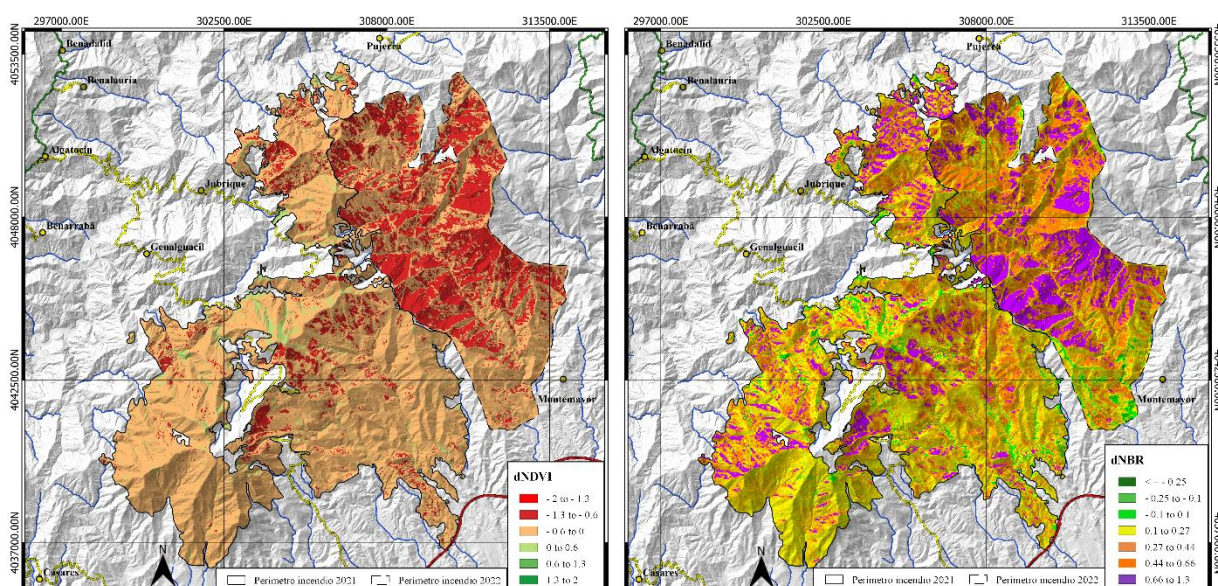


Figura 11: Comparación entre índices dNDVI y dNBR de cada incendio.

Fuente: Elaboración propia.

Atendiendo los resultados (véase anexo 7), la primera apreciación que puede observarse es que la zonificación de los valores bajos del índice dNDVI y los valores altos del dNBR (que significan graves daños) es generalmente coincidente. Por otro lado, estos índices reflejan una mayor severidad en el incendio de 2022 que el de 2021, de acuerdo con los resultados de los índices dNDVI y dNBR. Esto puede observarse de forma más clara con valores numéricos en las dos siguientes tablas, en las que se puede ver el contraste de superficie quemada respecto de la superficie total de cada incendio en cada rango de dNBR y dNDVI.

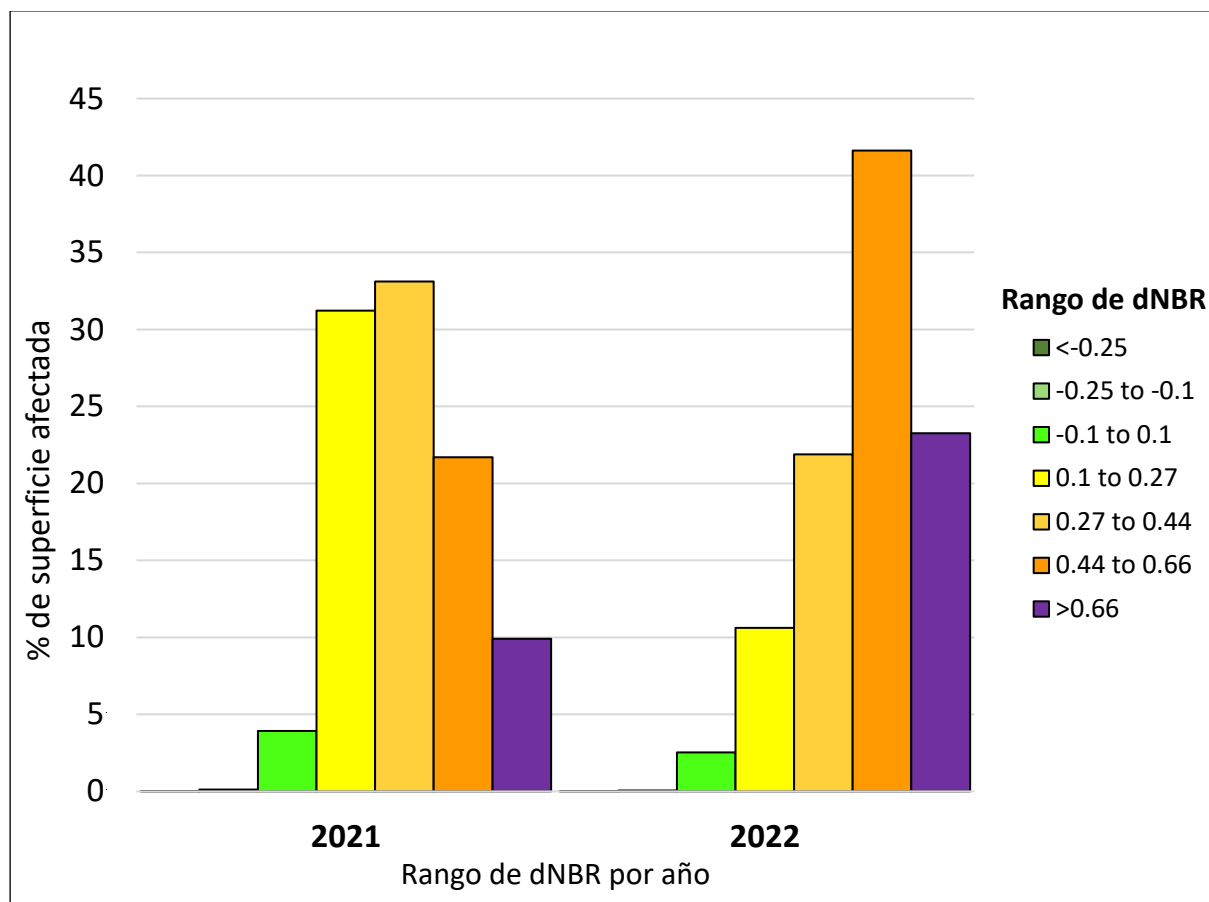


Figura 12: Comparación entre la superficie quemada por rango de dNBR en los incendios 2021 y 2022.

Fuente: Elaboración propia.

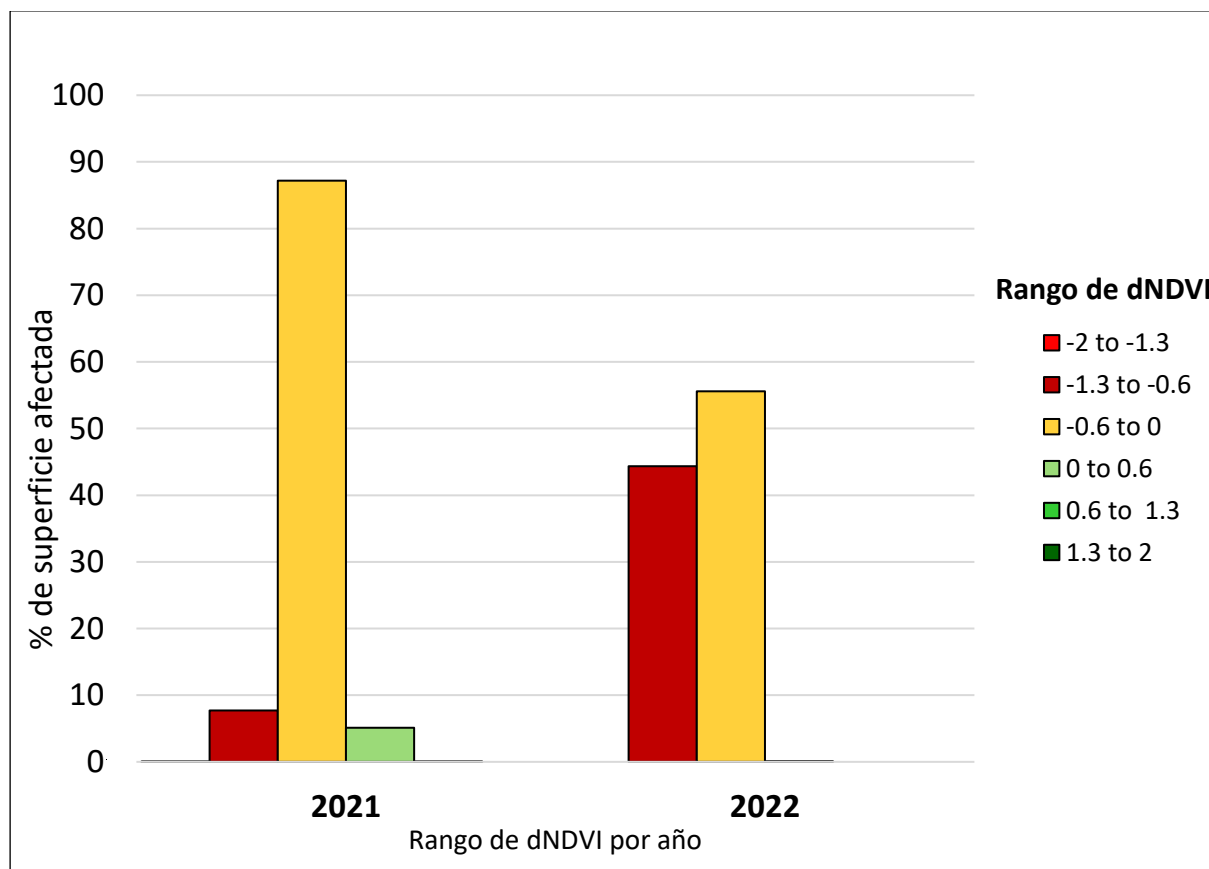


Figura 13: Comparación entre la superficie quemada por rango de dNDVI en los incendios 2021 y 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 12 y 13 confirman lo que ya puede apreciarse en la Figura 11. Tanto la superficie afectada por cada rango de dNBR como por de dNDVI indican que los daños producidos por el fuego fueron más severos en 2022 que en 2021. La diferencia es bien acentuada en los dos rangos más altos de dNBR (que señalan la severidad más alta), donde el 64.88% de los valores se sitúan por encima de 0.44 en 2022, mientras que para el mismo rango en 2021 sólo el 31.61% sobrepasan este umbral.

Con los resultados obtenidos del dNDVI ocurre lo mismo, ya que el 44.34% de la superficie se corresponde con el rango desde - 1.3 hasta - 0.6 del índice en 2022, lo que señala una gran afección del fuego. Sin embargo, en este tramo para el 2021 sólo supone el 7.68% de la superficie.



Por otra parte, a juzgar por la distribución de los valores de estos índices, en la orientación de las laderas (representada a través de un modelo de sombras tomando de base el MDT del IGN) no se encuentra una correspondencia con las zonas más afectadas, ya que el fuego se propaga en todas direcciones independientemente de esta variable (en términos generales) una vez se ha prendido. Por tanto, no parece ser una variable significativa a tener en cuenta para estimar el riesgo de incendio en una zona.

Sin embargo, teniendo en cuenta el modelo de estimación de riesgo de incendio forestal en el anexo 5, sí que puede observarse alguna correspondencia entre este modelo y la zonificación de los daños producidos representados en el anexo 7, especialmente en el caso del incendio de 2022 con carácter general.

A pesar de esta concordancia, hay que tener en cuenta que la severidad de un incendio forestal depende de una serie de variables no tenidas en cuenta para la estimación del riesgo de incendio, tales como la situación meteorológica cuando éste se produce, la existencia y estado de la red viaria (accesibilidad) e hidrográfica, disposición de medios de extinción, hora en que se produce...etc. Por todo ello, la correspondencia entre las zonas de alto riesgo de incendio y las zonas afectadas con un grado más alto severidad no es del todo coincidente.

Por otro lado, para evaluar los daños del fuego en la zona de estudio de forma más analítica se presentan dos figuras comparativas en las que se refleja la severidad del fuego sobre las comunidades vegetales en cada rango de dNBR propuesto el USGS en los incendios de 2021 y 2022 (figuras 14 y 15).

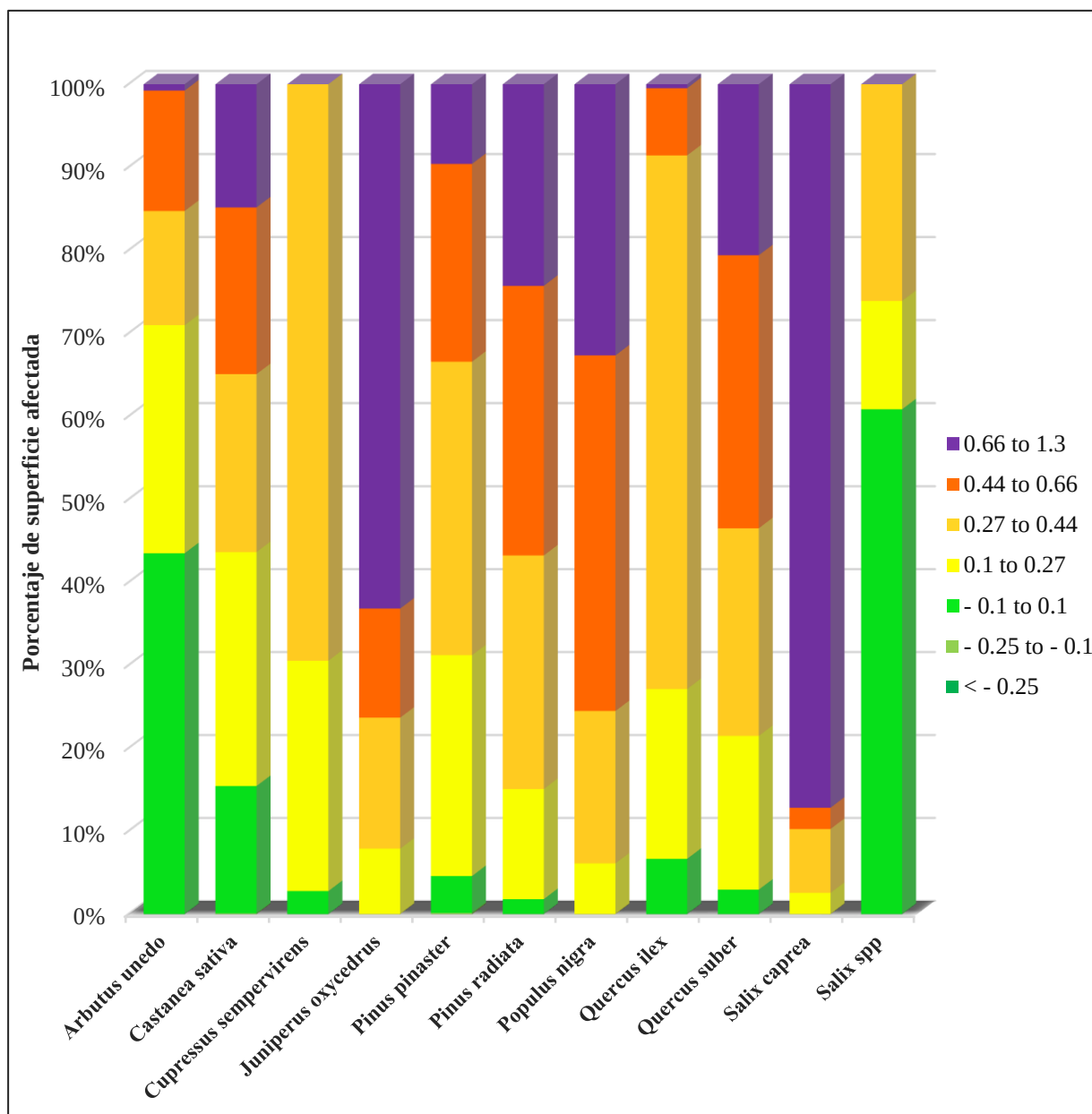


Figura 14: Comparación de la severidad en las especies vegetales por categoría de dNBR en 2021.

Fuente: Datos de elaboración y Copérnicus.

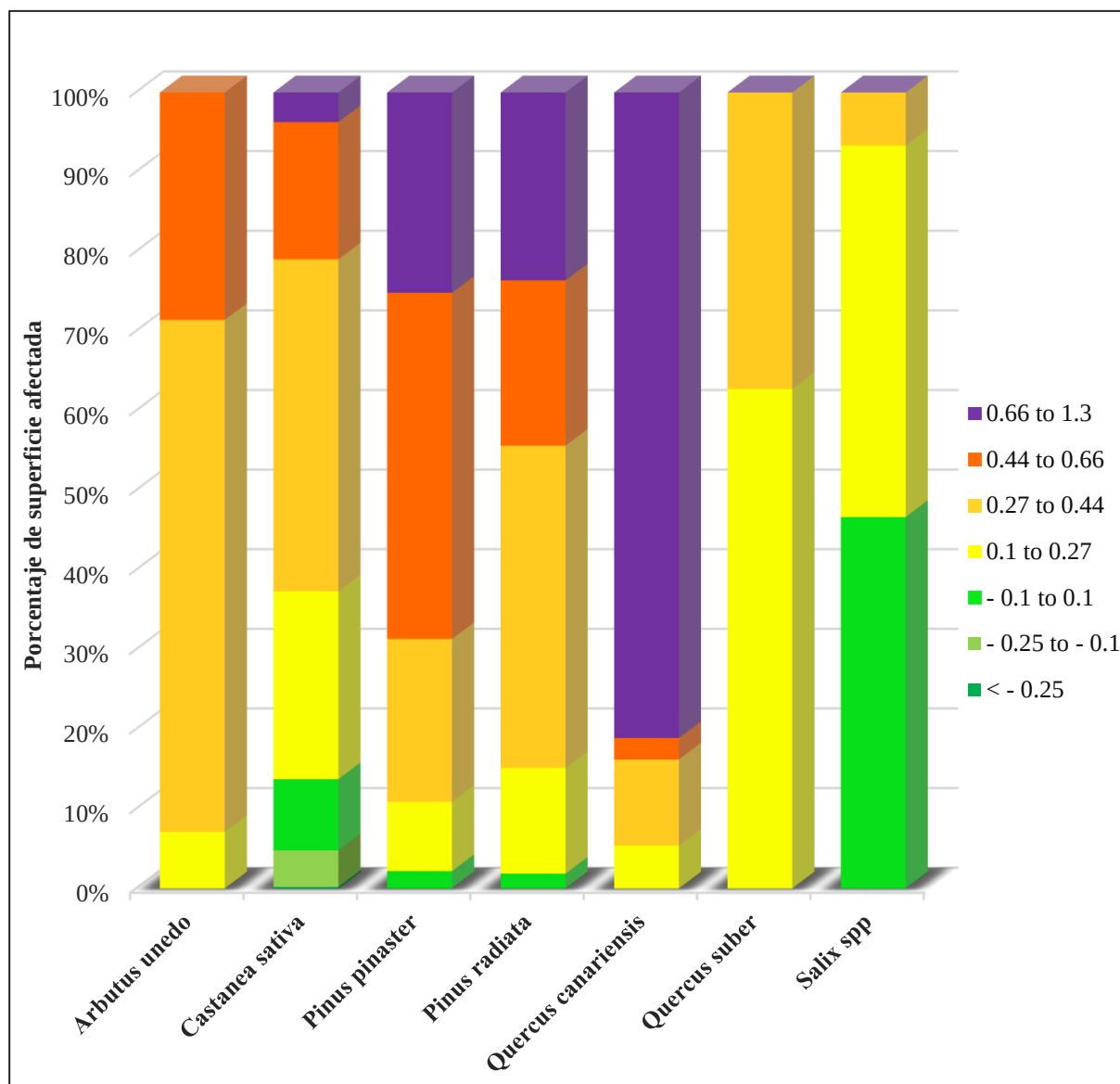


Figura 15: Comparación de la severidad en las especies vegetales por categoría de dNBR en 2022.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Copérnicus.

Las figuras 14 y 15 muestran dos resultados del estudio muy importantes. Por un lado, se puede observar que hay especies comunes afectadas en ambos incendios, pero también hay otras diferentes como el *Quercus canariensis* (roble andaluz). Por otra parte, también se pueden observar las especies que se han mostrado más resistentes al fuego. Por ejemplo, el *Pinus pinaster* coincide en ambas fechas con una superficie afectada en cada categoría de dNBR similar, por lo que cabe deducirse que se ha



mostrado menos resistente que especies como por ejemplo el *Arbutus unedo* (madroño) o *Salix spp*, afectados en la mayor parte de su superficie con valores de dNBR inferiores a 0.27, al poseer una estructura más robusta y resistente al fuego. En general, las especies

Tal y como se menciona a lo largo de todo el trabajo, son el NDVI y NBR junto con sus diferenciales temporales los índices más utilizados por la comunidad científica para analizar las consecuencias de los incendios forestales. Es por ello que la Comisión Europea mediante el programa Copérnicus realiza un reporte técnico de algunos incendios forestales en los que se emplea el NDVI. En lo que afecta a este trabajo, se analiza el incendio de Pujerra de 2022 pero no el de Jubrique en 2021.

En el reporte se elaboran dos productos principales. Uno correspondiente con la delineación del área quemada y el nivel de daño en base a la variación del NDVI, y otro en el que se hace una evaluación de impacto sobre activos y población. Cabe señalar que, a diferencia de este estudio, Copérnicus se ha basado en los productos del sensor Planet Scope, que al carecer del canal SWIR impide la generación del NBR. Para un análisis en profundidad sobre los resultados de la agencia se elabora una tabla en la que se recoge una comparativa entre los resultados del estudio y de la agencia en referencia a la superficie quemada en el incendio de 2022 en cada rango de dNDVI.

Rango de dNDVI	< 0.27	0.27 to 0.44	0.44 to 0.66	> 0.66	Total
Área quemada calculada en el TFM (ha)	258	702	2.498	1.267	4.726
Área quemada calculada por Copérnicus (ha)	960	1.214	1.885	1.007	5.068

Tabla 9: Comparativa entre la superficie quemada por rango de dNDVI calculada en el TFM y por Copérnicus.

Fuente: Datos de elaboración propia y Copérnicus.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que para la elaboración de la tabla se ha invertido la fórmula de cálculo de dNDVI (ec. 5) en la Figura 11 para ajustarse la metodología de Copérnicus y poder contrastar los resultados;



$$dNDVI = NDVI \text{ pre incendio} - NDVI \text{ post incendio}$$

(5)

Dicho esto, la primera apreciación que puede hacerse es que la superficie total del incendio calculada en el trabajo y por la agencia tienen una considerable diferencia de casi 350 hectáreas. A pesar de ello, hay que tener en cuenta que las cifras del informe provisional de daños de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible calculan un total de 4.860 hectáreas, a falta de una publicación oficial.

Además de la superficie total quemada, la superficie afectada en cada rango también es diferente en ambos estudios. Esta variación de los resultados puede deberse entre otros factores a la fecha de adquisición de las imágenes, ya que para el caso de Copérnicus fueron adquiridas en mayo y junio de 2022 mientras que en este estudio son de noviembre de 2021 y julio de 2022 y en la zona hay algunas especies de arbolado de hoja caduca.

Una vez analizados los daños causados por el incendio sobre la vegetación y dado que para generar el dNDVI se ha tenido previamente que calcular el NDVI anterior y posterior a cada incendio, nos valdremos de estos datos para realizar un seguimiento de la regeneración de la cubierta vegetal. Para ello se calcula el NDVI de cada zona después de 1, 3 y 5 meses respectivamente (a contar desde el día que cada incendio fue declarado extinto).

7.3. Estudio de la regeneración de la cubierta vegetal

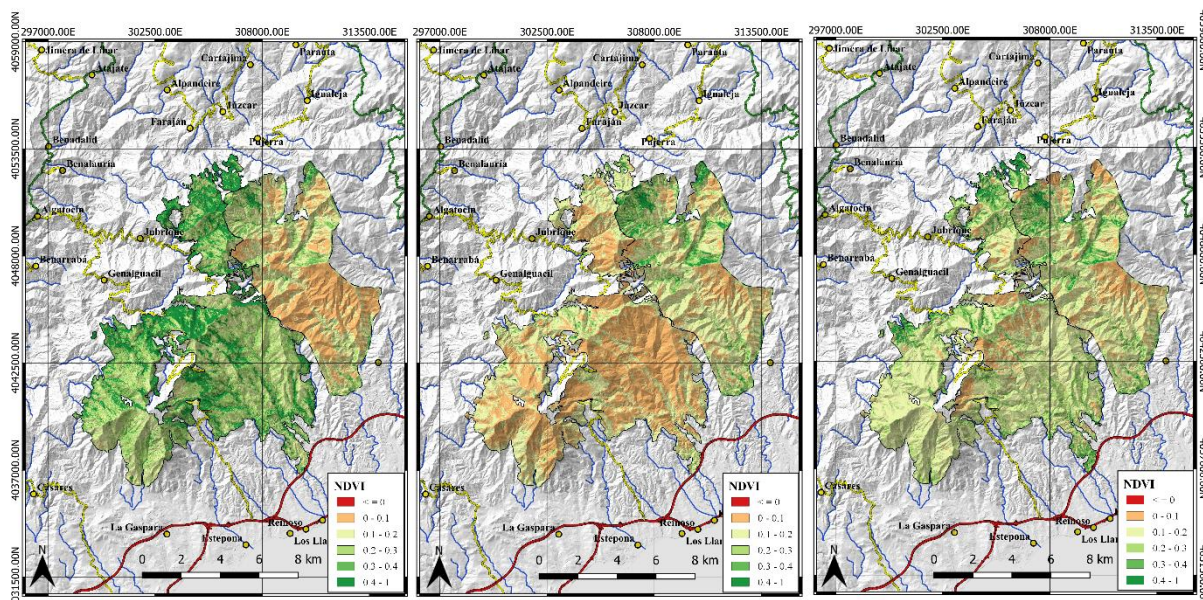


Figura 16: Evolución de la regeneración de la cubierta vegetal.

Fuente: Elaboración propia.

En lo que se refiere al incendio de 2022, se observa en la figura 16 como los valores del NDVI disminuyen de forma progresiva (véase anexo 8), con una diferencia especialmente marcada entre la primera imagen y la última (correspondientes al primer mes posterior al evento y al quinto). Con la zona incendiada en 2021 no ocurre lo mismo, ya que los valores aumentan en el tercer mes después de la quema respecto del primer mes, para volver a disminuir en el quinto. Cabe añadir que las zonas en las que la evolución del NDVI indican una menor recuperación de la cubierta vegetal coincide con las zonas en las que los valores de dNDVI y dNBR señalan una severidad más alta del incendio en el anexo 7, algo que puede apreciarse particularmente en el incendio de 2022. Por su parte, las partes menos afectadas se han regenerado más rápido como muestran algunas zonas ubicadas en el fondo de los valles.



8. Conclusiones

Tanto la amplia cobertura espacial y temporal como su accesibilidad, convierten a las imágenes satelitales en una fuente de datos ideal para cumplir los objetivos propuestos en este trabajo, aunque hay que tener en cuenta algunos matices que se exponen a continuación.

Por un lado, teniendo en cuenta los resultados de la metodología propuesta (atendiendo a los anexos 3, 4, 5 y 6) se ha demostrado que las variables más determinantes a tener en cuenta para la elaboración de un modelo de riesgo de incendio forestal, son la pendiente y la combustibilidad vegetal.

Hay que tener en cuenta que una vez el incendio se produce, hay otros factores (como el viento o las condiciones climáticas *in situ*) que favorecen su propagación y por ello no existe una correspondencia directa entre la zonificación del riesgo de incendio (anexo 5) y de los daños producidos una vez este se desarrolla (anexo 7). Sin embargo, si que se observa en algunas zonas de los modelos (anexo 5 y 6) que una vez se produjeron los incendios se extendieron rápidamente a las zonas con un elevado riesgo de incendio.

Por su parte, tanto los indicadores NDVI y NBR como sus diferenciales son datos necesarios para la planificación de actuaciones una vez ha ocurrido el evento. Han demostrado tener una gran capacidad para el análisis de los daños causados sobre la vegetación, especialmente si cruzamos esta información con el Mapa Forestal de España como vemos en el anexo 7 y las figuras 12, 13, 14 y 15. Además, son herramientas especialmente útiles para la delimitación de perímetros, como puede apreciarse en la tabla 9, dada la similitud de los resultados del estudio con las publicaciones oficiales.

A pesar de ello, hay que tener en cuenta que tanto el NDVI como NBR tienen ciertas limitaciones. Al ser calculados en base a la radiancia que emite la superficie de la cubierta vegetal recogida por el sensor, se dificulta la captura de información bajo la masa forestal. En este caso, cuando se da un incendio de superficie es muy difícil calcular los daños con esta metodología, ya que solo arde el estrato arbóreo más bajo



y las copas de los árboles se mantienen intactas. Esto se traduciría en unos valores altos de NDVI y NBR a pesar del incendio. A esto cabe añadir que el índice es especialmente sensible a las estaciones, ya que los bosques de árboles de hoja caduca pueden dar unos valores muy bajos en otoño a pesar de tener un estado de salud.

Respecto a la utilización del índice NDVI para evaluar la regeneración de la cubierta vegetal tras un incendio forestal, se ha visto que en 2022 los resultados son coherentes ya que los valores disminuyen paulatinamente a medida que pasan los meses, pero no ocurre lo mismo en el caso de 2021. Esto puede deberse a diversos factores como las condiciones atmosféricas o el estado del sensor, pero lo más razonable sería que el índice en este caso también fuera menor en la imagen tres meses después que en la de un mes, y no al contrario.



9. Bibliografía

- Aguilar, J. A. P., Sanz, J., de Bustamante, I., & González, A. B. La Geomática en el análisis de los recursos hídricos. (S.F). Acceso el 5 de octubre de 2022 en: https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Blanco-6/publication/329143958_La_Geomatica_en_el_analisis_de_los_recursos_hidricos_Geomatics_in_water_resources_analysis/links/5bf7c5f3a6fdcc53881439e0/La-Geomatica-en-el-analisis-de-los-recursos-hidricos-Geomatics-in-water-resources-analysis.pdf
- Aguilar Ruiz, J., Calvo De Anta, R., Fernandez Ondono, E., & Macías Vázquez, F. (1997). Geoquímica de la alteración y edafogénesis de rocas serpentizadas de la Sierra Bermeja (Málaga). Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, 5, 135-151. Acceso el 14 de noviembre de 2022 en: <https://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/Volumen%205.%20Diciembre%201998.%20pag%20135-151.pdf>
- Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (2021). Sierra Bermeja Fire Report. Fire analysis network. Acceso el 25 de septiembre de 2022 en <https://fireanalysisnetwork.eu/wp-content/uploads/2022/07/Sierra-Bermeja-2021-Fire-Report-1.pdf>
- Copernicus. (s.f). *Sobre Copérnicus*. Acceso el 20 de octubre de 2022 en: <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/copernicus-en-pocas-palabras>
- EOS Data Analytics. (s.f). *NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada*. Acceso el 11 de octubre de 2022 en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>
- European Space Agency. (s.f). Acceso el 25 de octubre de 2022 en: <https://earth.esa.int/web/Sentinel/user-guides/Sentinel-2-msi/product-types>
- Jiménez Perálvarez, Jorge David. (2005). Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. [Tesis de doctorado, Universidad de Granada]. Acceso el 5 de diciembre de 2022 en: https://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/DEA_J.Jimenez.pdf



- Junta de Andalucía. (2003). Plan INFOCA. Un plan de acción al servicio del monte mediterráneo andaluz. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Acceso el 10 de octubre de 2022 en: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/5395847/infoca-monte-mediterraneo.pdf/b9c14ef4-29d1-5623-46b5-bfffbc91f1fb?t=1609247670903>
- Martín, J. M., & Zotano, J. G. (2021). Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales: una reconstrucción geohistórica (1950-2018). In Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal (pp. 391-437). La Serranía. Acceso el 10 de octubre en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8268883>
- Masot, A. N., Arenas, G. N., & Marcos, G. M. (2016). Análisis de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y teledetección. Estudio de caso en Sierra de Gata (2015). In Tecnologías de la información geográfica en el análisis espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario (pp. 247-268). Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial. Acceso el 10 de noviembre de 2022 en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776243>
- Mejías, E y Setzer, A. (2005). CONGRESO 6a SEMANA GEOMATICA. BARCELONA. Acceso el 8 de octubre de 2022 en: https://queimadas.dgi.inpe.br/~rqueimadas/documentos/200502_mejias&setzer_geomatica_barcelona_.pdf
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica. (2019). *Decenio 2006-2015, Los Incendios Forestales en España*. Acceso el 25 de octubre de 2022 en: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/incendios-decenio-2006-2015_tcm30-521617.pdf
- Moreira, J.M. (1994). Proyecto Hyde: seguimiento de los recursos hídricos al servicio de las políticas regionales de la agricultura y del medio ambiente. Acceso el 27 de octubre de 2022 en:



https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/documentos_tecnicos/hydr/hydr_e_ind.html

- Pereira Obaya, D. (2020). Análisis de detección de cambios utilizando imágenes satélite multitemporales Sentinel 2 y su integración en la generación de mapas de combustibles a escala municipal. Acceso el 27 de octubre de 2021 en: https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/12471/TFG_Dimas%20Pereira%20Obaya.pdf;jsessionid=2C88F625C0779B2DDFCCA5DF00E96E79?sequence=1
- Pinto, F. (2012). Geomática Tecnologías De Punta: 1a Edición. Palibrio. Acceso el 7 de octubre de 2022 en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tiEG2MFpqXwC&oi=fnd&pg=PT16&dq=definicion+geomatica&ots=jlgD2MkKQA&sig=noMtwPHJfVuLf4tsuL1xRtQMI8w#v=onepage&q=definicion%20geomatica&f=false>
- Real Academia Española. (s.f.). Incendio forestal. En Diccionario de la lengua española. Acceso el 5 de octubre de 2022 en: <https://dpej.rae.es/lema/incendio-forestal>
- Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil de emergencia por incendios forestales. *Boletín Oficial del Estado*, 293, de “7 de diciembre de 2013”. Acceso el 21 de septiembre de 2022 en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/11/15/893>
- Speranza F., y Zerda H. (2002). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. Santiago de Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. Acceso el 10 de noviembre de 2022 en: https://www.academia.edu/13450382/POTENCIALIDAD_DE_LOS_%C3%8DNDICES_DE_VEGETACION_PARA_LA_DISCRIMINACION_DE_COBERTURAS_FORESTALES
- TYC GIS. (s.f). *Estimación del Índice de Riesgo Territorial de Incendio con ArcGIS*. Acceso el 16 de octubre de 2022 en: <https://www.cursosgis.com/estimacion-del-indice-de-riesgo-territorial-de-incendio-con-arcgis/#>



- United Nations. (s.f) *Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal. Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)*. Acceso el 5 de octubre de 2022 en: <https://un-spider.org/es/node/10959>
- Vázquez, A.T. (27/06/2022). Primeras vistas aéreas del daño provocado por el incendio de Pujerra. *SER*. Acceso el 1 de octubre de 2022 en: <https://cadenaser.com/andalucia/2022/06/27/primeras-vistas-aereas-del-dano-provocado-por-el-incendio-de-pujerra-ser-malaga/>
- Viedma O., y Chuvieco E. (2005). Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de la Hoya de Buñol (Valencia). Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá de Henares. Acceso el 10 de noviembre de 2022 en: https://www.academia.edu/13630070/CARTOGRAF%C3%8DA_Y_EVALUACI%C3%93N_DE_DA%C3%91OS_CAUSADOS_POR_INCENDIOS_FORESTALES_MEDIANTE_T%C3%89CNICAS_DE_TELEDETECCI%C3%93N



10. Anexos

Mapa de contexto del ámbito de estudio

Contexto Península



● Núcleo de población — Límites provinciales — Zona afectada incendio 2021
— Límites autonómicos — Límite Málaga — Zona afectada incendio 2022

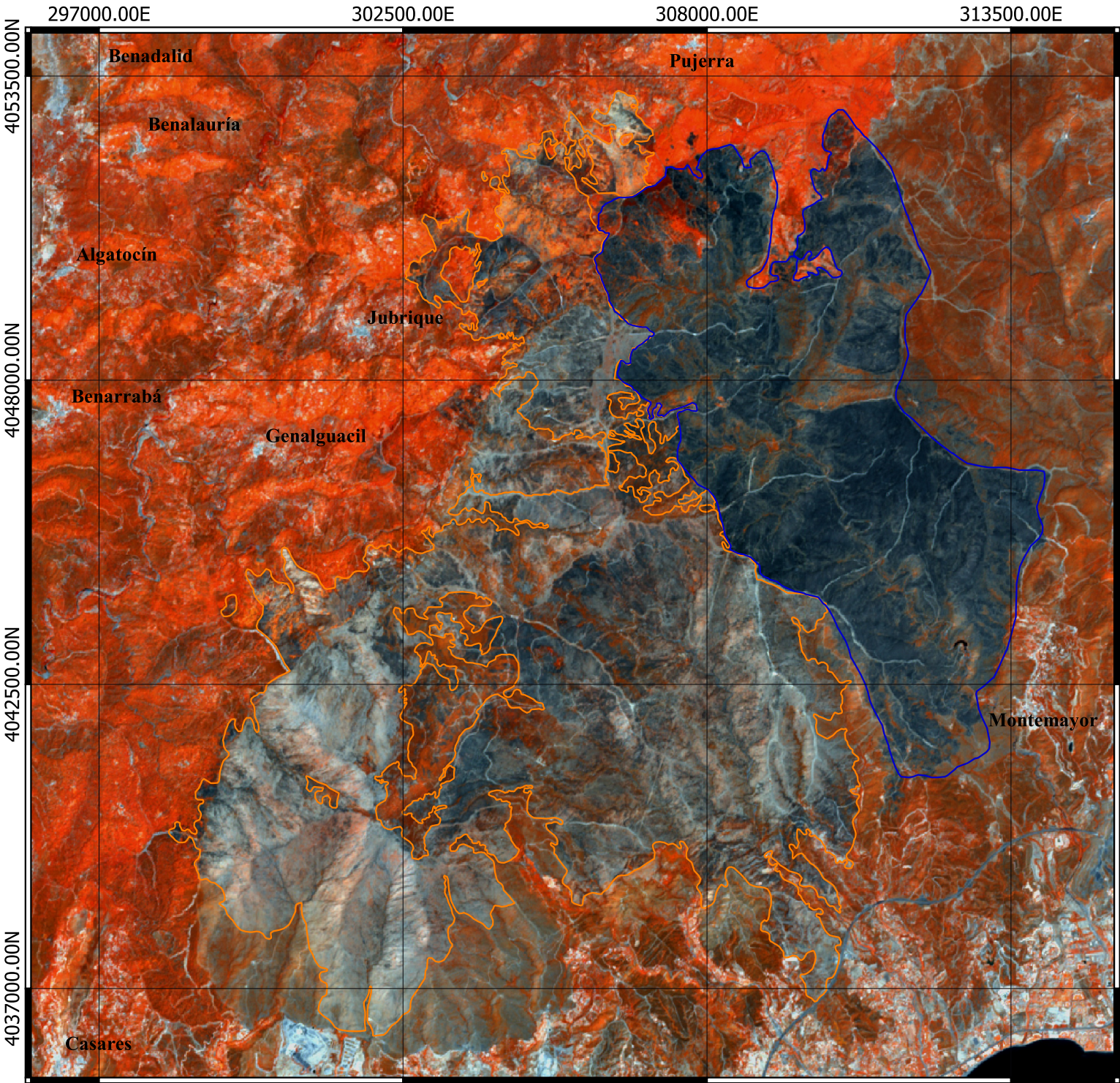
Contexto Málaga



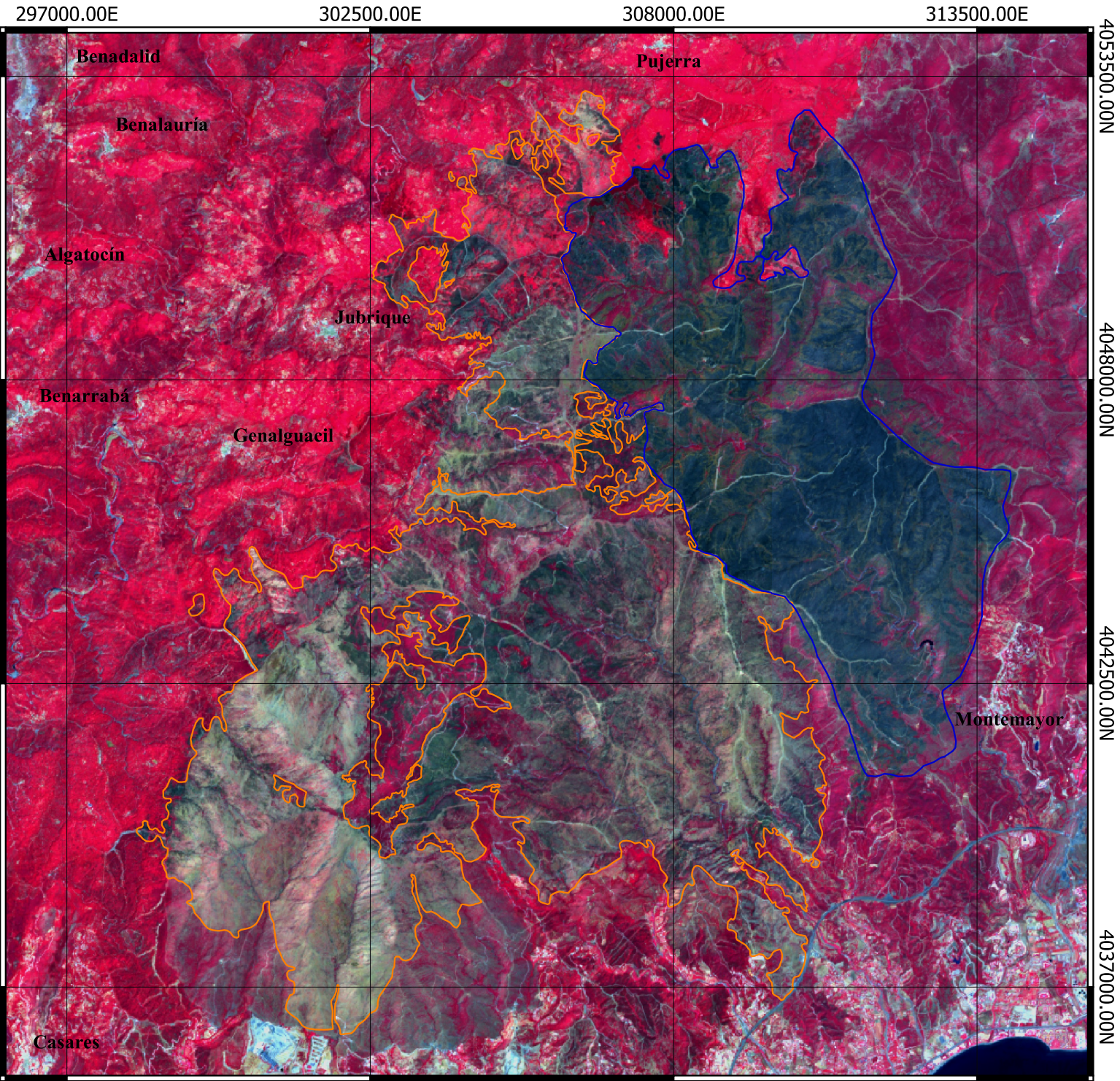
Autor: José Ramón Galdón Moreno	Datum: ETRS 89
Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría	Proyección: UTM Zona 30N
Universidad de Jaén	Fuente: IGN, DERA y datos de elaboración propia
	Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de visualización de composiciones espectrales

Composición de bandas 7, 6 y 5



Composición de bandas 7, 5 y 4



- | | | | |
|---|----------|---|-------------------------|
|  | Banda 07 |  | Perímetro incendio 2021 |
|  | Banda 06 |  | Perímetro incendio 2022 |
|  | Banda 05 | | |



0 2 4 6 8 km

Escala: 1:100.000

Autor: José Ramón Galdón Moreno

Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Universidad de Jaén

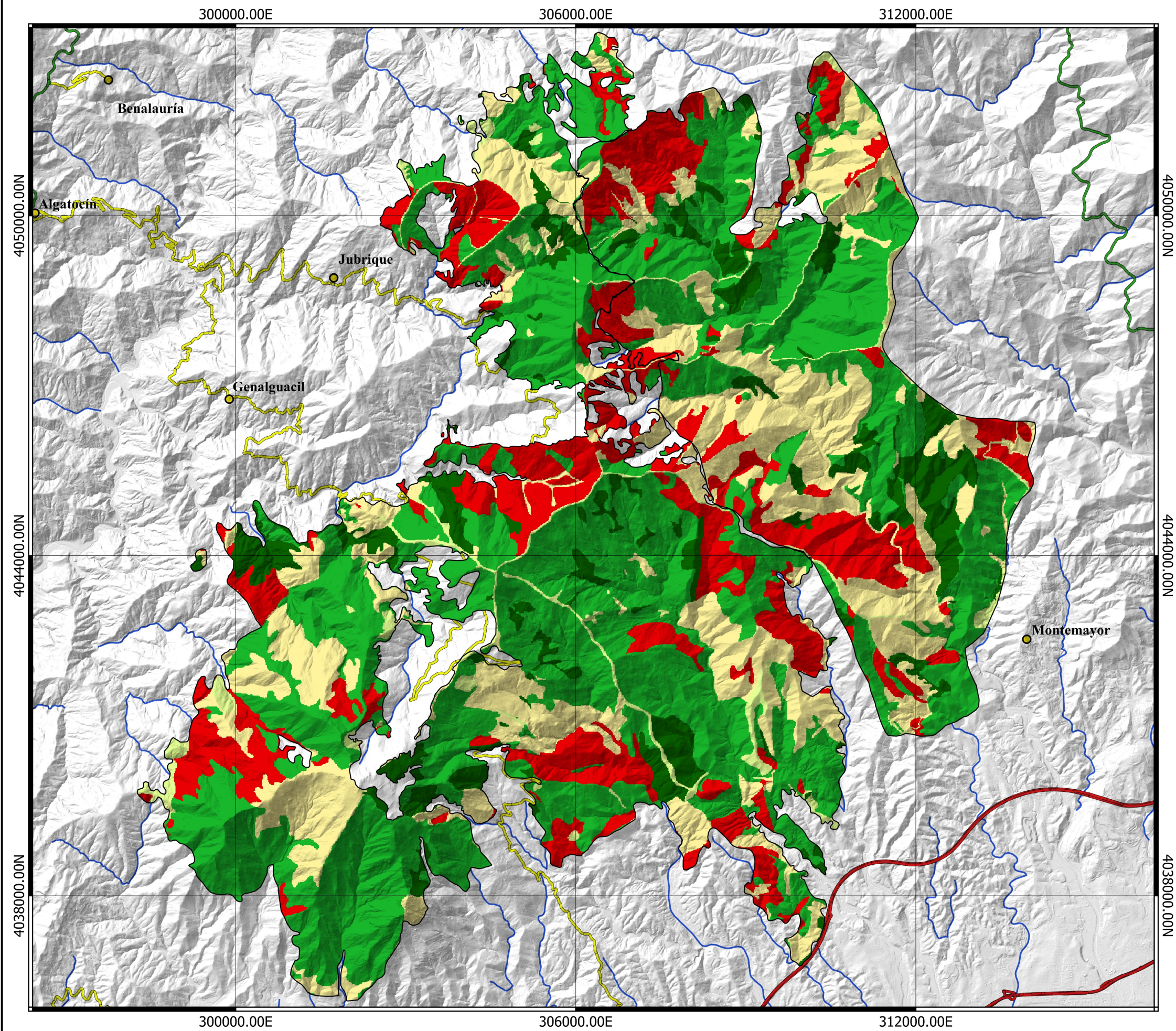
Datum: ETRS 89

Proyección: UTM Zona 30N

Fuente: Elaboración propia

Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de riesgo asociado a la combustibilidad



LEYENDA

- Autopistas y autovías
- Carreteras autonómicas
- Carreteras provinciales
- Red hidrográfica
- Límites municipales
- Núcleo de población

Índice de riesgo asociado a la combustibilidad forestal

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5



0 2 4 6 km

Escala: 1:70.000

Autor: José Ramón Galdón Moreno

Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Universidad de Jaén

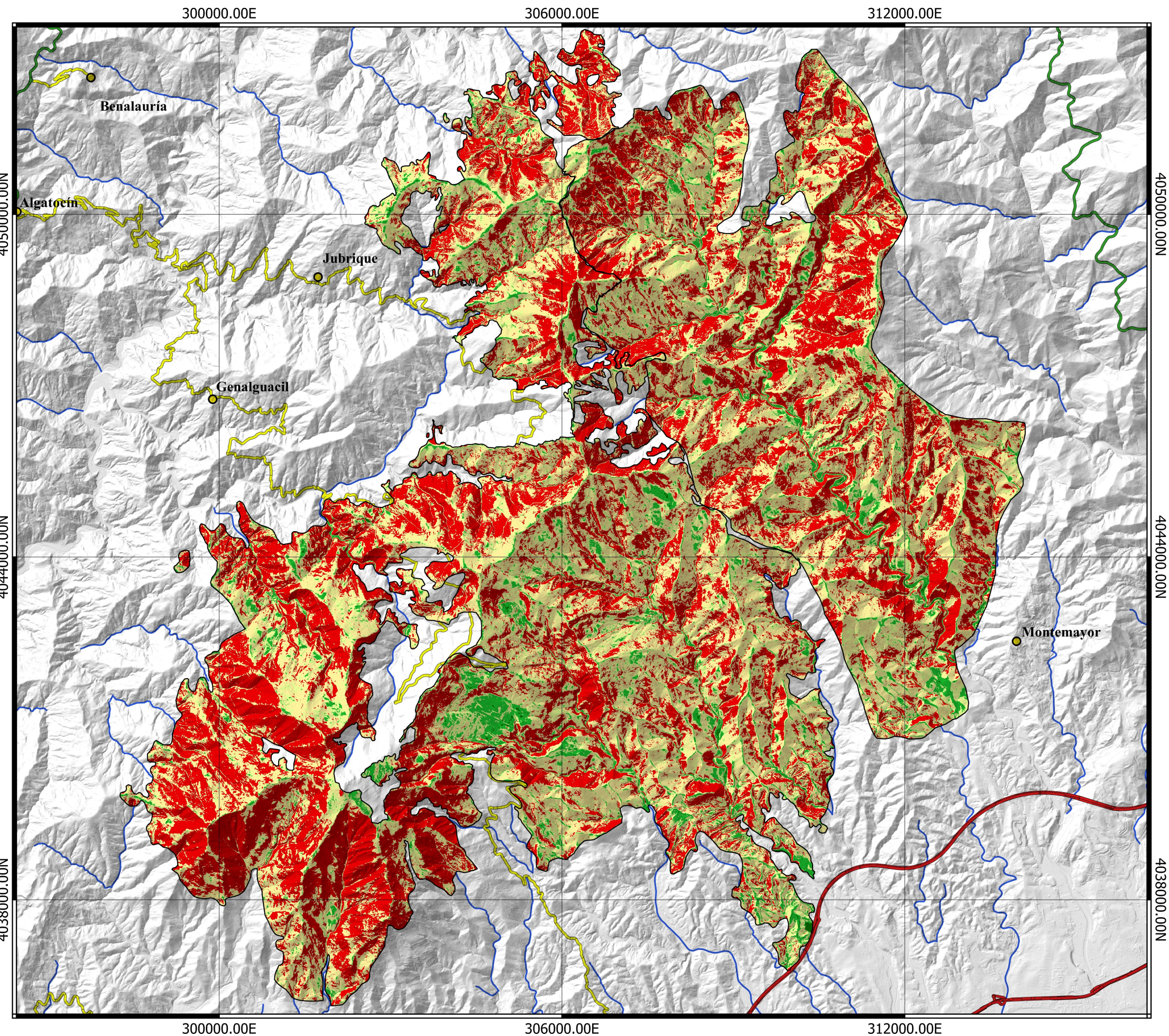
Datum: ETRS 89

Proyección: UTM Zona 30N

Fuente: Elaboración propia

Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de riesgo asociado a la pendiente



LEYENDA

- Autopistas y autovías
- Carreteras autonómicas
- Carreteras provinciales
- Red hidrográfica
- Límites municipales
- Núcleo de población

Índice de riesgo asociado al porcentaje de pendiente

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

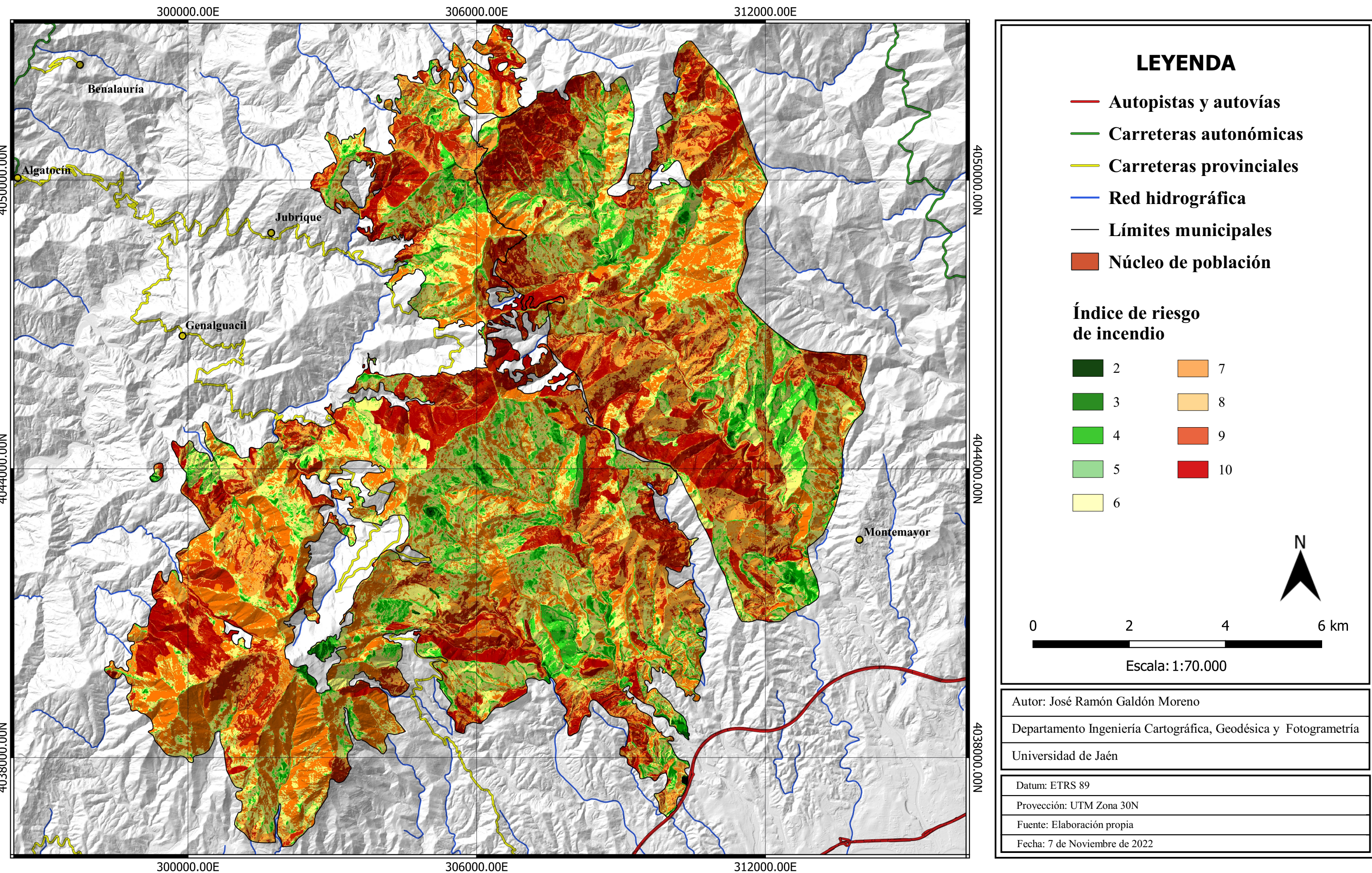


0 2 4 6 km

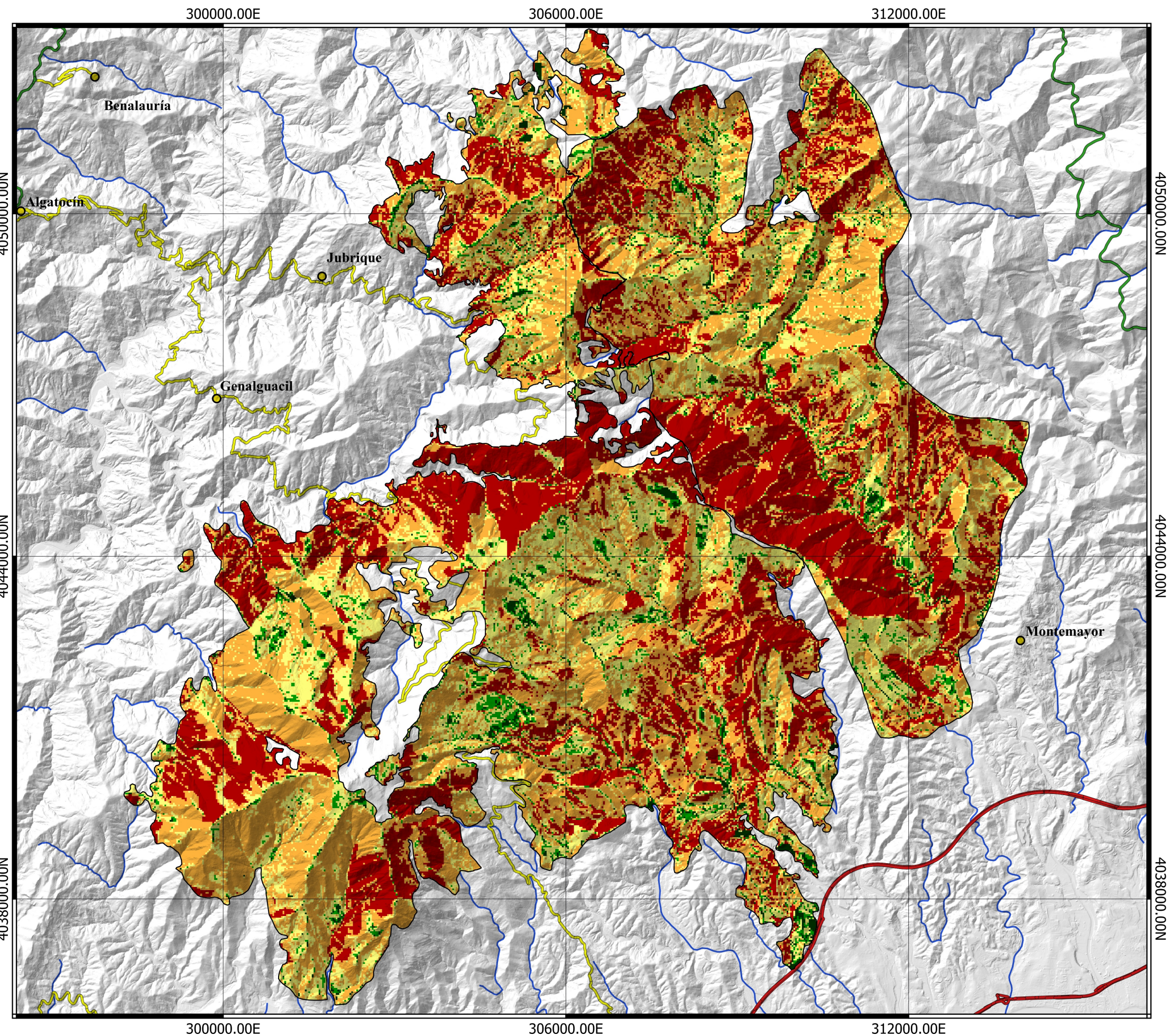
Escala: 1:70.000

Autor: José Ramón Galdón Moreno
Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría
Universidad de Jaén
Datum: ETRS 89
Proyección: UTM Zona 30N
Fuente: Elaboración propia
Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de estimación riesgo de incendio



Mapa de estimación riesgo de incendio por REDIAM



LEYENDA

- Autopistas y autovías
- Carreteras autonómicas
- Carreteras provinciales
- Red hidrográfica
- Límites municipales
- Núcleo de población

Índice de riesgo de incendio

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5



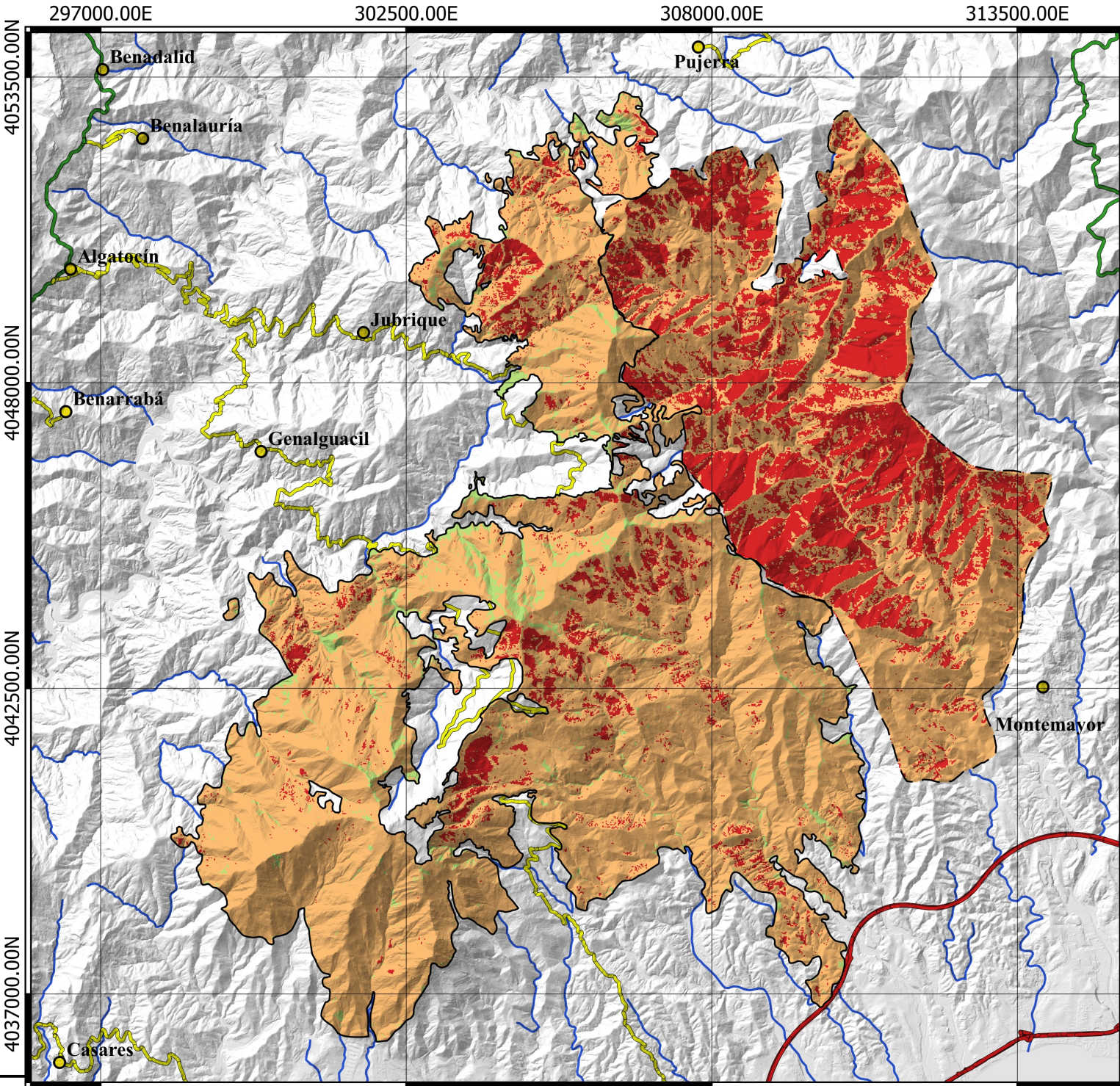
0 2 4 6 km

Escala: 1:70.000

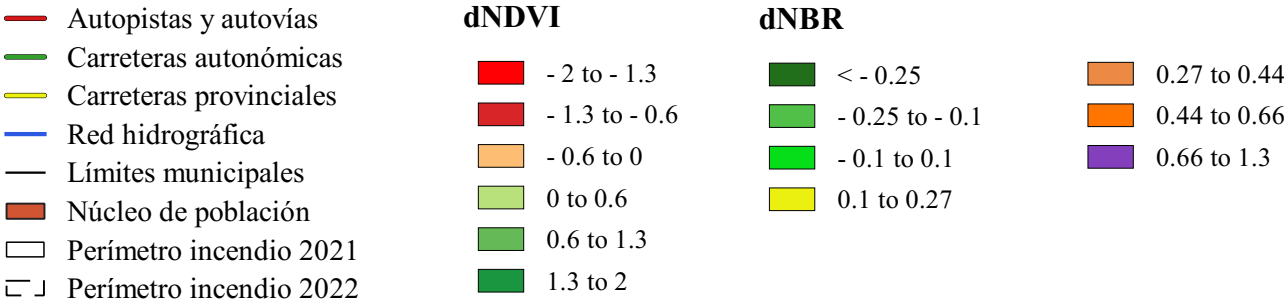
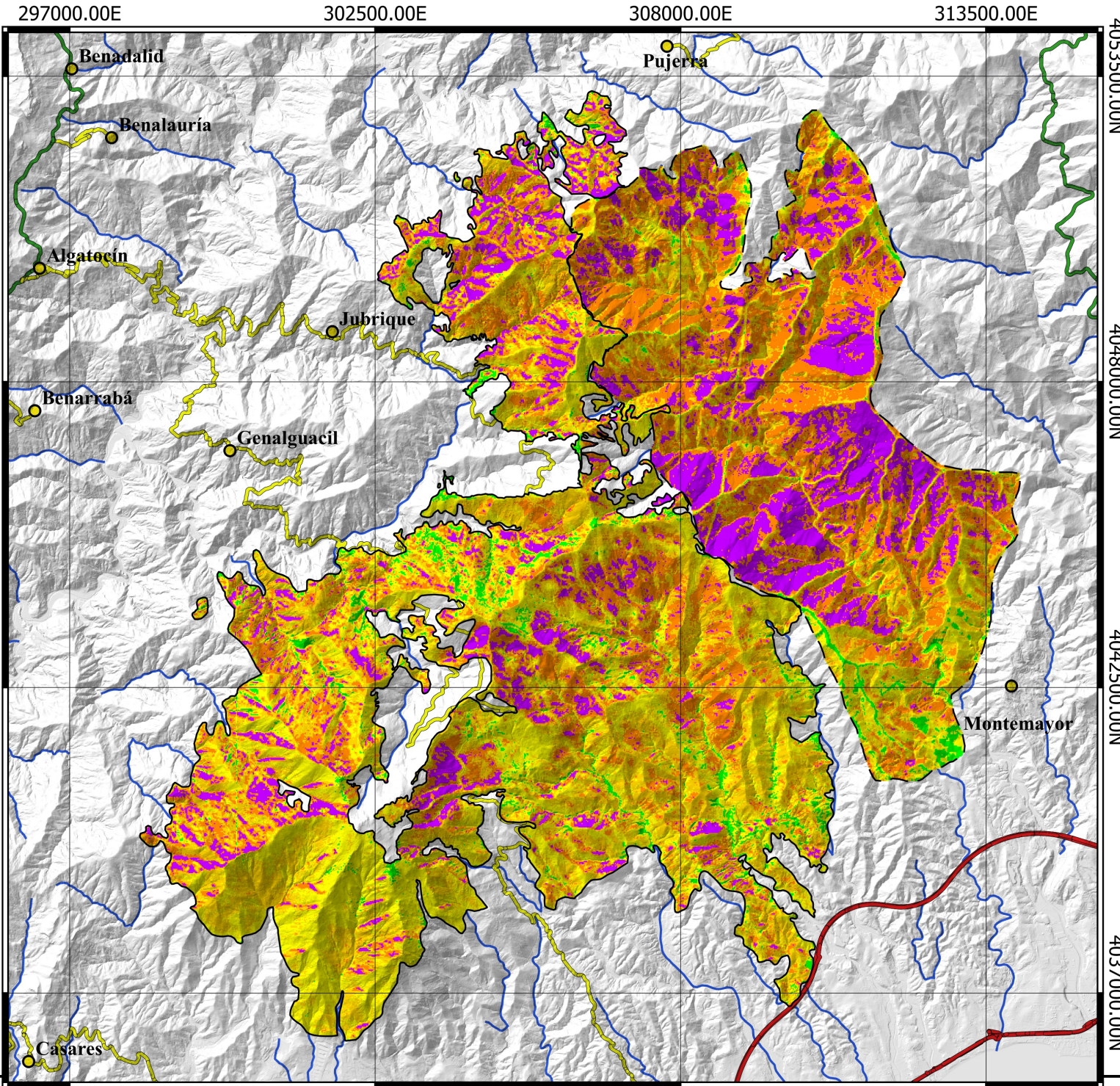
Autor: José Ramón Galdón Moreno
Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría
Universidad de Jaén
Datum: ETRS 89
Proyección: UTM Zona 30N
Fuente: Elaboración propia
Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de comparación entre índices post incendio

dNDVI 2021 y 2022



dNBR 2021 y 2022



0 2 4 6 8 km

Escala: 1:100.000

Autor: José Ramón Galdón Moreno

Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Universidad de Jaén

Datum: ETRS 89

Proyección: UTM Zona 30N

Fuente: Elaboración propia

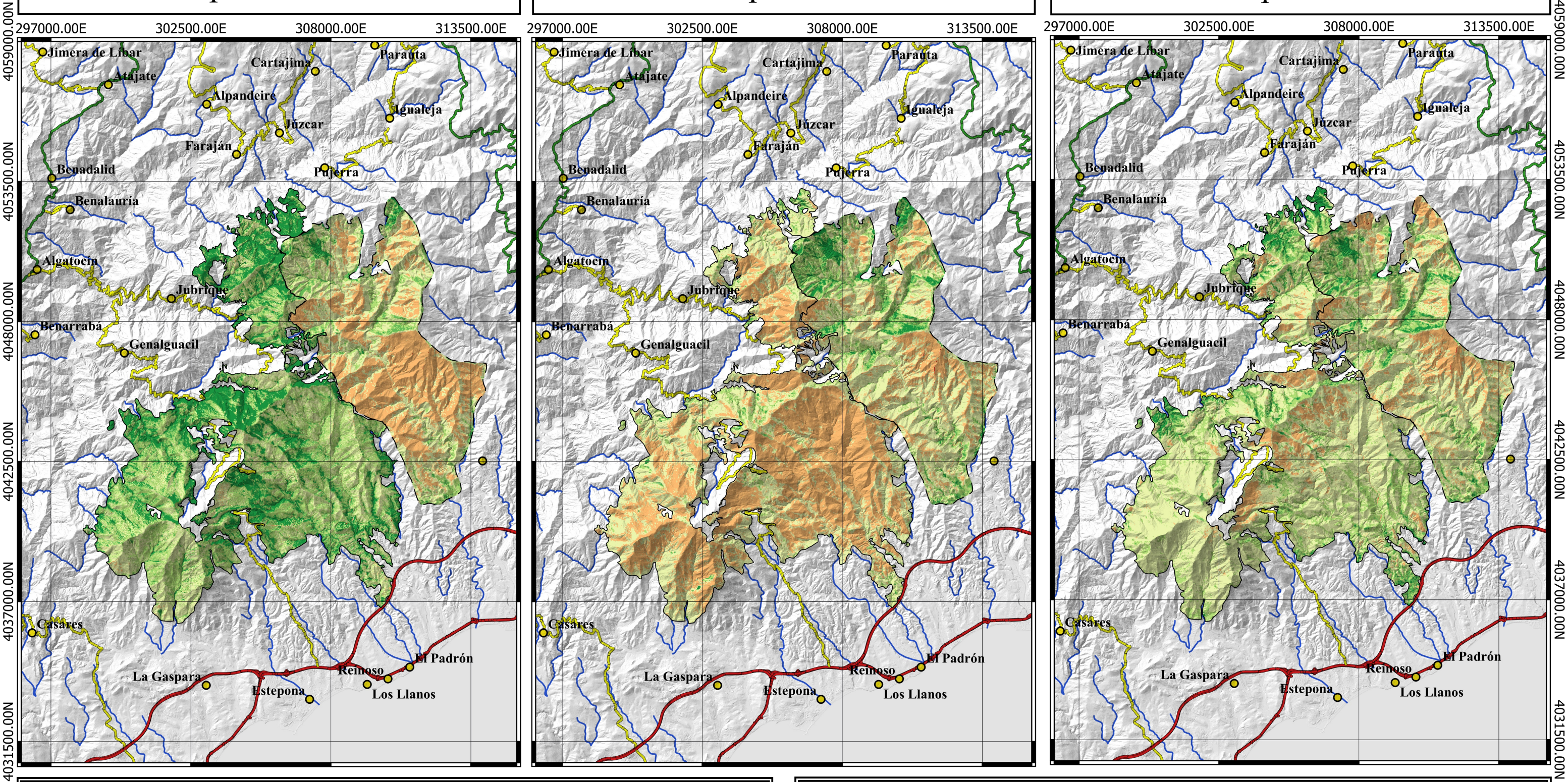
Fecha: 7 de Noviembre de 2022

Mapa de evolución de la regeneración post incendio

1 mes post incendio

3 meses post incendio

5 meses post incendio



LEYENDA

- Autopistas y autovías
- Carreteras autonómicas
- Carreteras provinciales
- Red hidrográfica
- Límites municipales
- Núcleo de población
- Perímetro incendio 2021
- Perímetro incendio 2022

NDVI

- ≤ 0
- 0 - 0.1
- 0.1 - 0.2
- 0.2 - 0.3
- 0.3 - 0.4
- > 0.4



0 2 4 6 8 km

Escala: 1:150.000

Autor: José Ramón Galdón Moreno

Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Universidad de Jaén

Datum: ETRS 89

Proyección: UTM Zona 30N

Fuente: Elaboración propia

Fecha: 15 de Noviembre de 2022