



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1850

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Análisis de la vulnerabilidad a incendios y sequía en Castilla y León para la identificación espacial de áreas prioritarias de gestión

DE-DIOS-GARCÍA, J. (1), RUBIO-GUTIÉRREZ, R. (1), GALLEGO, R. (1)

(1) Fundación Centro de Servicios y promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (Cesefor), Avda. Real 1, 24006, León, España.

Resumen

En este trabajo, se evaluó la vulnerabilidad de Castilla y León y de un sitio piloto (MUP72, Cañón del Río Lobos, Soria) ante incendios y sequías, utilizando datos empíricos y simulados. Se cartografiaron índices de vulnerabilidad para la identificación espacial de áreas prioritarias de gestión, empleando datos del IFN4, LiDAR e imágenes multiespectrales. Los índices calculados fueron el Índice Territorial de Riesgo de Incendios (ITRI), el Índice de Propagación de Incendios (FPI) y el Índice de Condición de la Vegetación (VCI). Las simulaciones realizadas con FlamMap proporcionaron datos a nivel de rodal, sobre longitud de llama, tasa de propagación del fuego, actividad de fuego en copas, capacidad de extinción, ejes de propagación y alcance del fuego.

El VCI destaca 2022 como el año más seco de los últimos 5 años, con aumento del estrés hídrico y sequías inusuales en marzo y diciembre. El ITRI resultó útil para identificar áreas prioritarias de gestión, mientras que el VCI detectó sequías y su inicio. Estos mapas y simulaciones ofrecen herramientas clave para la planificación y prevención de incendios forestales, mejorando la capacidad de control y respuesta ante eventos extremos.

Palabras clave

Riesgos abióticos, incendios forestales, cartografía, modelización, inventarios

1. Introducción

Los incendios y la sequía son dos de las principales amenazas a las que se enfrentan las masas forestales en Castilla y León (GÓRRIZ-MIFSUD et al., 2022). En este contexto el proyecto H2020 ONEforest (<https://oneforest.eu/>) planteó elaborar una base de datos de indicadores y la elaboración de unos mapas de vulnerabilidad a estas amenazas a escala regional y su aplicación a un caso de estudio en el Cañón del Río Lobos, Soria (GALLEGO y DE-DIOS-GARCÍA, 2023). Este trabajo recoge los resultados principales que se obtuvieron en el proyecto basado en datos empíricos y modelizados combinando tecnologías innovadoras de teledetección para hacer una evaluación rigurosa.

El riesgo de incendios se define como la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona específica durante un intervalo de tiempo determinado (i.e. JOHNSTON et al., 2020). Este riesgo está influido por diversos factores que determinan el comportamiento del fuego entre los que destacan:

- Las características de la vegetación, incluyendo las condiciones y el estado de los combustibles vegetales.
- Las características orográficas del terreno.
- El clima y las condiciones meteorológicas.
- Las actividades humanas.

Algunos de estos factores presentan una influencia más duradera en el tiempo que otros, y en consecuencia podemos estimar distintos Índices de Riesgo de Incendios. Además, atendiendo a la frecuencia de cálculo podemos clasificarlos en estáticos y



dinámicos:

- Los índices de riesgo estáticos son aquellos que se calculan siendo válidos sus resultados durante un periodo de tiempo prolongado; uno o varios años, por ejemplo (SNYDER et al., 2006). Entre estos destacan el índice de riesgo estructural, los índices de estrés hídrico y de frecuencia de incendios, cuando se calculan para un periodo de tiempo largo. Estos índices permiten la planificación a medio y largo plazo de las actuaciones de prevención y lucha contra los incendios.
- Los índices dinámicos son aquellos que son calculados con una periodicidad determinada, diaria, semanal o mensual (CHÉRET et al., 2011). Se incluyen dentro de este tipo el índice de riesgo meteorológico, así como el de riesgo por estrés hídrico y el de riesgo por frecuencia de incendios cuando se calculan para los periodos de tiempo indicados. Estos índices se utilizan como herramientas de decisión a corto plazo.

El conocimiento del riesgo de incendios previsto para las diferentes comarcas de una región contribuye a llevar a cabo una adecuada política de prevención y a una optimización en la asignación de los medios de vigilancia y extinción disponibles. También permite informar y alertar a los ciudadanos para que extremen el cuidado en sus actividades en el medio rural, así como tomar medidas excepcionales para la prevención de incendios como cierre temporal de caminos o prohibición temporal del uso del fuego en labores agrícolas y forestales.

En este trabajo se han considerado dos índices de riesgo de incendios, el Índice Territorial de Riesgo de Incendios y el Índice de Propagación de Incendios. Por otra parte se ha considerado el Índice de Condición de Vegetación (VCI) para evaluar las condiciones de sequía a nivel regional y a nivel de rodal.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue crear unos mapas de vulnerabilidad a escala regional y local que permitieran hacer una evaluación global de la vulnerabilidad de las masas forestales a incendios y a sequía. Esto se ha conseguido calculando una serie de índices que en resumen son índices de riesgo de incendios y un índice de condición de la vegetación.

Objetivo principal del Índice de Riesgo de Incendios

Su objetivo principal es proporcionar información precisa y actualizada sobre el nivel de riesgo de incendio en una región determinada, lo que permite a las autoridades y a la población general tomar medidas preventivas y de gestión de incendios.

Objetivos parciales del Índice de Riesgo de Incendios

1. Planificación y respuesta ante incendios: Contribuir a la implementación de políticas de prevención eficaces y a la optimización de la asignación de recursos disponibles para la vigilancia y extinción de incendios.
2. Comunicación y alerta temprana: Informar y alertar a los ciudadanos para que extremen la precaución en sus actividades en zonas rurales, además de fomentar la adopción de medidas excepcionales de prevención de incendios, como cierres temporales de carreteras o prohibiciones temporales del uso del fuego en actividades agrícolas y forestales.

Objetivo principal del Índice de Condición de la Vegetación (VCI)



El Índice de Condición de la Vegetación (VCI) tiene como objetivo evaluar la salud y el estado general de la vegetación en una área geográfica específica, proporcionando una métrica cuantitativa que refleja su condición. Este objetivo permite monitorear la vegetación y su evolución a lo largo del tiempo, lo cual es crucial para la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales, la predicción de sequías y la planificación frente a desastres.

Objetivos parciales del Índice de Condición de la Vegetación (VCI)

1. **Monitoreo de sequías:** El VCI se utiliza para evaluar y monitorear la sequía, ya que cambios significativos en la condición de la vegetación pueden indicar la presencia de sequías y su impacto en el ecosistema. Valores bajos del VCI pueden alertar sobre la necesidad de tomar medidas para gestionar los recursos hídricos y prevenir la escasez de agua.
2. **Gestión de recursos naturales:** Proporciona información valiosa para la gestión sostenible de recursos naturales como el suelo y el agua. Los cambios en la condición de la vegetación pueden tener un impacto directo en la biodiversidad, la calidad del suelo y la disponibilidad de agua.
3. **Alerta temprana de desastres naturales:** El monitoreo continuo del VCI puede emplearse para la detección temprana de eventos adversos naturales, como sequías, incendios forestales o plagas, que puedan afectar la salud de la vegetación y, en última instancia, la seguridad de la población.

3. Metodología

La región de estudio de este trabajo es Castilla y León. En la Figura 1 se muestra la ubicación de Castilla y León en España y su división en provincias. Es en la provincia más al este (Soria) en la que se localiza el sitio de estudio, el Monte de Utilidad Pública 72 (MUP72). Las características generales de este monte se muestran en la Tabla 1 y su localización, ubicación de las parcelas experimentales, y la distribución de las especies arbóreas principales pueden verse en la Figura 2. Las principales especies arbóreas presentes son *Pinus nigra* y *Juniperus thurifera*, con coberturas medias del dosel superiores al 85%.

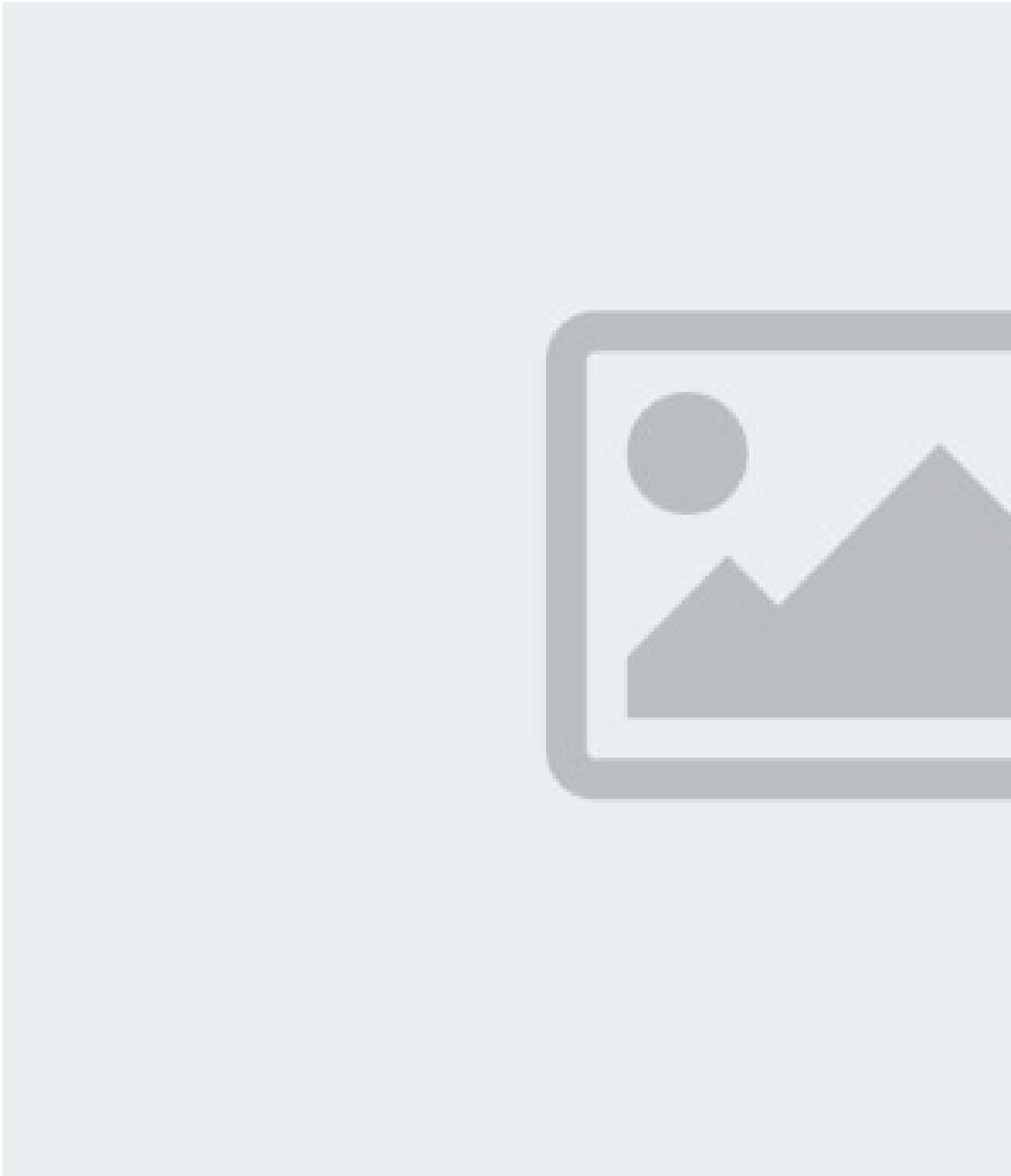


Figura 1. Localización del área de estudio.

Tabla 1. Caracterización general de las masas forestales del MUP72				
Parámetros	Todas	<i>Pinus nigra</i>	<i>Juniperus thurifera</i>	Otras especies
Área cubierta por especies (ha)	457.12	367.79	83.95	5.38
Cobertura media del dosel (%)	90.83	100.00	85.00	87.50

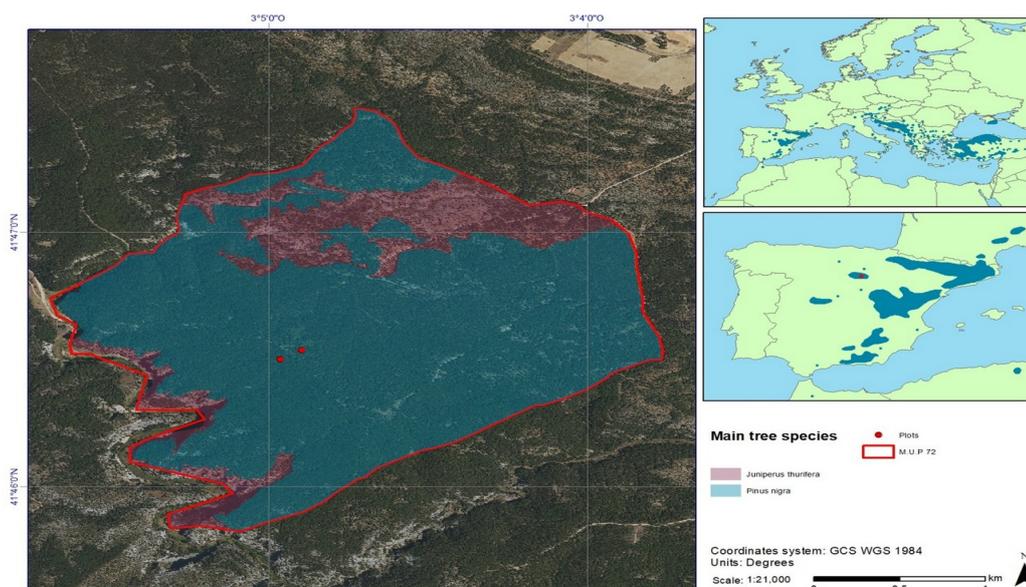


Figura 2. Ubicación del caso de estudio (MUP 72) y distribución de las principales especies arbóreas.

3.1. Índice Territorial de Riesgo de Incendios

El Índice Territorial de Riesgo de Incendios es una herramienta utilizada para evaluar y predecir el riesgo de incendios forestales en un área geográfica específica. Con este índice se determina el comportamiento del fuego en función de dos factores fundamentales, la orografía y el tipo de vegetación:

Índice Orográfico: Se mide mediante un análisis de la 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. Basándonos en las experiencias recogidas por la bibliografía, podemos tomar el valor del índice según la pendiente, en % (Tabla 2).

Tabla 2. Valores del índice orográfico.

Pendiente	Nivel de riesgo	Valor índice	Superficie forestal (%)
<5	Muy bajo	1	39.99%
5 ≤ 25	Bajo	2	41.49%
25 ≤ 35	Medio	3	6.66%
35 ≤ 55	Alto	4	7.93%
≥ 55	Muy alto	5	3.93%

Para su obtención partimos del Mapa digital de elevaciones (MDE) del ámbito de estudio, de él obtendremos el modelo de pendientes expresado en tanto por ciento. Reclasificamos los valores de pendiente en tanto por ciento, de acuerdo con el índice de la Tabla 2.



Índice de Combustibilidad de la materia vegetal: Toda materia de origen vegetal puede arder y por tanto es considerada “combustible vegetal”. La inflamabilidad del combustible vegetal variará en función de su contenido en agua, tipo de tejido vegetal, estructura y distribución de la materia vegetal (GONZÁLEZ-OLABARRIA et al., 2012). De cara a los estudios de riesgo de incendio realizamos una clasificación de la materia vegetal basada en los “Modelos de Combustible” propuesto por Anderson (Figura 3, ANDERSON, 1982). Estos 13 modelos están agrupados en cuatro grandes categorías en función del medio principal de propagación y dentro de cada grupo identificamos distintos modelos en base a combustibilidad, distribución espacial, continuidad de la masa vegetal y carga de combustible.

GRUPO	MODELO DE COMBUSTIBLE	DESCRIPCIÓN
Pasto	1	Pasto fino y seco, cubre todo el suelo. Puede haber presencia de plantas leñosas ocupando $\leq 1/3$ 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

Figura 3. Modelos de combustible propuestos por Anderson.

El análisis conjunto del riesgo por pendiente y por combustibilidad permite obtener el índice territorial de riesgo, que delimita aquellas áreas en las que el comportamiento esperado del fuego sea más desfavorable y la dificultad en la extinción mayor, para adoptar así las medidas de protección adecuadas a las características del territorio.

3.2. Índice de propagación de incendios

Se han utilizado los datos LiDAR de la segunda cobertura para el MUP72 de Soria (datos del año 2019) ya que son los más cercanos al Mapa Forestal de España (MFE) para esa zona, cuyos datos son del 2017 y que usaremos de referencia. La densidad de puntos LiDAR es de 0.5 puntos/m². En la tabla siguiente (Tabla 3) se muestra la caracterización de las principales masas forestales del MUP72 según los tipos y modelos de combustible presentes.

Tabla 3. Caracterización de las masas forestales del MUP72 según el modelo de combustible.

Tipo de combustible	Modelo de combustible	Área forestal total (ha)	<i>Pinus nigra</i>	<i>Juniperus thurifera</i>	Otras especies
Sin combustible	0	0.86			0.86



Tipo de combustible	Modelo de combustible	Área forestal total (ha)	<i>Pinus nigra</i>	<i>Juniperus thurifera</i>	Otras especies
Pasto	1	4.12			4.12
	2	64.24		63.84	0.40
	3	0.00			
Arbustos	4	0.00			
	5	20.11		20.11	
	6	0.00			
	7	31.40	31.40		
Hojarasca bajo árboles	8	38.04	38.04		
	9	298.35	298.35		
Residuos de podas y operaciones selvícolas	10	0.00			
	11	0.00			
	12	0.00			
	13	0.00			

Para la determinación de la propagación de incendio se ha utilizado el software FlamMap 6 (FINNEY, 2006), desarrollado por el USDA Forest Service y para el cálculo de las variables de entrada se usó el programa Fusion 3.80 y el programa R versión 4.0.4 64 bit. Las variables de entrada para realizar la simulación son: altitud, pendiente, orientación, fracción de cabida cubierta, altura de la masa arbórea, altura de la base de la cubierta de copas, densidad aparente de la cubierta de copas, modelo de combustible, variables meteorológicas, humedad de los combustibles de superficie, viento, humedad de las hojas.

El simulador de incendios Flammap es estático, es decir, el software realiza un análisis del comportamiento del fuego para cada píxel independientemente del lugar de inicio del fuego. Los resultados obtenidos en Flammap se trasladaron a ArcGis para poder trabajar los datos con mayor facilidad y posteriormente plasmarlos en mapas. Flammap lleva incorporado los modelos más comunes, es decir Behave y Farsite, que se basan en la ecuación de propagación del fuego original de Rothermel y describen la propagación y el comportamiento del fuego teniendo en cuenta todas las variables explicadas anteriormente, es decir, la influencia de los combustibles, el terreno sobre el que se produce el incendio y las condiciones climáticas (ROTHERMEL, 1972; ROTHERMEL, 1983; SCOTT & BURGAN, 2005).

3.3. Índice de condición de la vegetación (VCI).

El Índice VCI (Índice de Condición de Vegetación) compara el NDVI actual con el NDVI observado en el mismo periodo de años anteriores (KOGAN, 1995). En nuestro caso los datos NDVI actuales del mes con el rango de valores NDVI del mes del período 2014-2022 y bajo las mismas zonas territoriales. Los indicadores de vegetación se basan en datos de vegetación registrados cada diez días por el Sentinel 2 de Copernicus con una resolución de 10 m. Expresado como valor de porcentaje, permite identificar si la zona territorial está mostrando condiciones óptimas de crecimiento vegetal o, por el contrario, existen condiciones de sequía.

$$VCI = (NDVI - NDVI_MIN) / (NDVI_MAX - NDVI_MIN) \times 100$$

Donde NDVI es el mínimo y máximo del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI) observada durante el mismo periodo.

El NDVI es calculado de la siguiente forma:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Se puede obtener la condición del territorio para evaluar los niveles de sequía desde la sección VCI de la plataforma de Copernicus, a resoluciones de 10 metros y con fechas temporales, en nuestro caso nos remontaremos mes a mes al 2018 hasta

la actualidad para el caso del rodal piloto, en el caso de Castilla y León nos remontaremos al 2016 pero de forma anual. Este índice se mueve en valores de 0% a 100%. Valores bajo 40% se asocian a una condición desfavorable en la vegetación, siendo 0% la peor condición histórica y 100% la mejor.

Al utilizar bandas térmicas de AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), el VCI se utiliza para detectar situaciones de sequía y determinar su inicio, especialmente en las zonas en que los episodios de sequía se localizan y no se distinguen claramente). Se centra en los efectos de la sequía en la vegetación y puede suministrar información sobre el inicio, la duración y la gravedad de la sequía mediante la percepción de los cambios en la vegetación y su comparación con valores históricos.

4. Resultados

4.1. Índice territorial de riesgo de incendios (Castilla y León).

Los modelos de combustible propuestos por Anderson (ANDERSON, 1982) pueden ser clasificados en función del riesgo de incendio. Basándonos en las experiencias recogidas en el Plan 42 (CONSEJERÍA DE FOMENTO Y MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN y CESEFOR, 2018), establecemos la siguiente clasificación del valor del índice según el modelo de combustible vegetal (Tabla 4).

Tabla 4. Valores para el modelo de combustible en Castilla y León.

Modelos de combustible	Nivel de riesgo	Valor índice	Superficie forestal (%)
Sin combustible	Muy bajo	1	26.77%
8 y 5	Bajo	2	16.32%
1, 3, 9 y 11	Medio	3	35.97%
2, 6, 7 y 10	Alto	4	19.39%
4 y 12	Muy alto	5	1.55%

Castilla y León tiene una extensión total de 9.422.714,53 ha, de las cuales el 54,5% corresponden al uso forestal, que suponen 5.135.369,31 ha de superficie, atendiendo al concepto de bosque (forest) definido por la FAO (FAO, 2020): al menos con una fracción de cabida cubierta (FCC) del 10%. El monte arbolado supone casi el 64% del total forestal mientras que el monte desarbolado agrupa poco más del 36% del uso forestal.

La distribución de la superficie por usos del suelo en el IFN4 es resultado directo de la base cartográfica utilizada, el MFE25 actualizado a 2014-2017 y nos permite obtener los modelos de combustible de Castilla y León.

El siguiente mapa (Figura 4) muestra el cálculo del índice orográfico para Castilla y León, resultado de reclasificar las pendientes de Castilla y León en función de la Tabla 2. Los colores verde oscuro y verde claro predominan en la región y corresponden a porcentajes de pendiente inferiores al 5% y en el rango del 5-25%, respectivamente. Estas áreas más verdes en el mapa se consideran de muy bajo y bajo riesgo de incendio (según la pendiente) y coinciden principalmente con la Meseta Norte castellana. Los colores rojo y naranja en el mapa se observan en



áreas montañosas más empinadas, que se encuentran principalmente en el noroeste de la provincia de León (Montes de León y Picos de Europa), el norte de Palencia, el este de Burgos (Sierra de la Demanda y Picos de Urbión), el sur de Ávila (Sierra de Gredos y Sierra de Béjar) y Salamanca (Sierra de Béjar y Sierra de Francia).

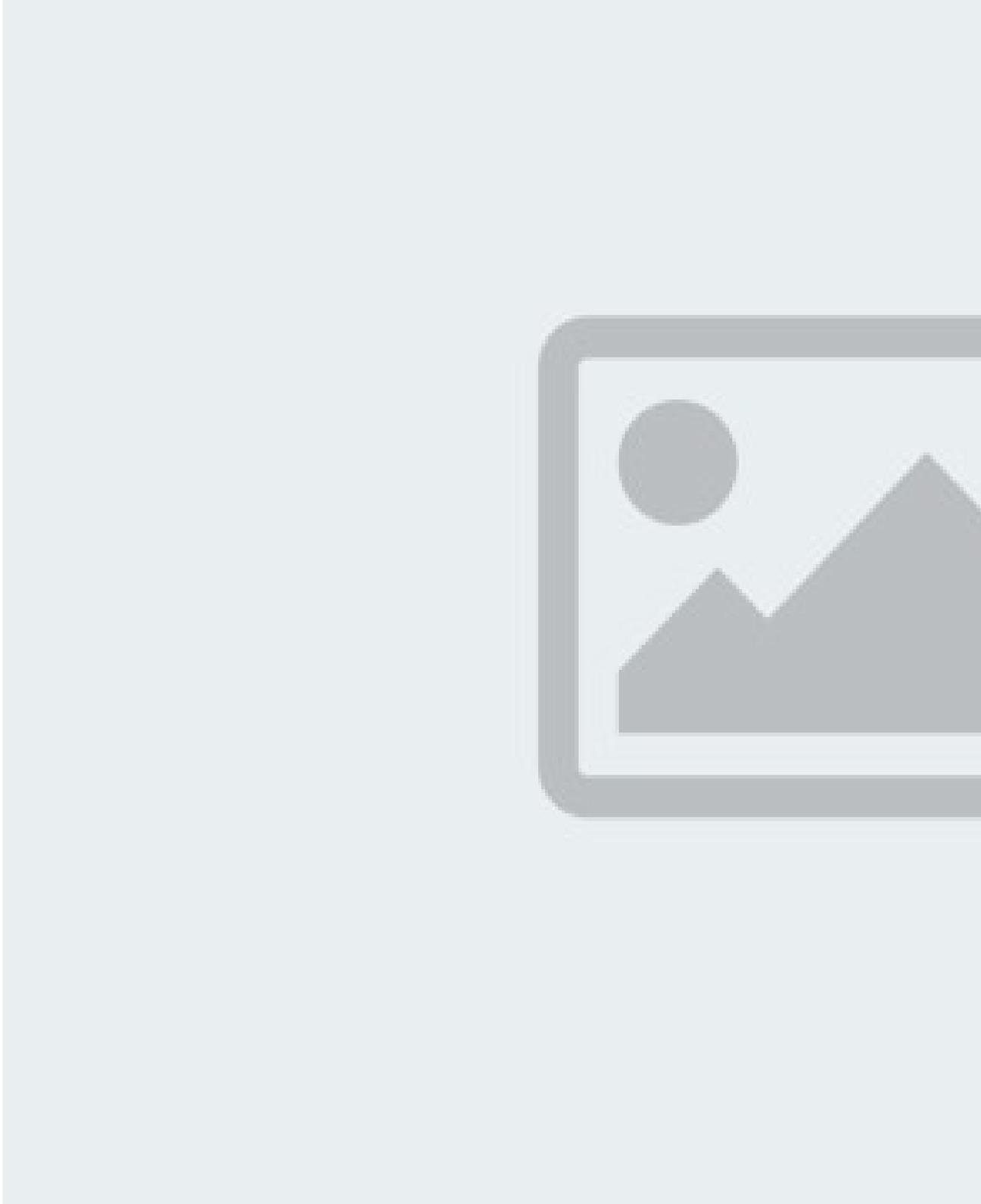


Figura 4. Índice Orográfico (Castilla y León).

A continuación (Figura 5) se muestra el índice de combustibilidad. Según este índice el 20.94 % del área total de Castilla y León se considera en riesgo alto o muy alto de incendio (colores naranja y rojo, respectivamente), según el Índice de Combustibilidad. Esta área corresponde principalmente al noroeste de León, noroeste de Zamora, este de Burgos, polígonos dispersos en Soria y Segovia, el centro de Ávila y el sur de Salamanca. Asimismo, el 43.09 % del área total de Castilla y León se considera en riesgo bajo o muy bajo de incendio (color verde claro y verde oscuro, respectivamente), de acuerdo con este índice. Esto ocurre principalmente en la provincia de Valladolid, sur de León, centro y sureste de Palencia, centro y suroeste de Burgos, este de Zamora y norte de Ávila.

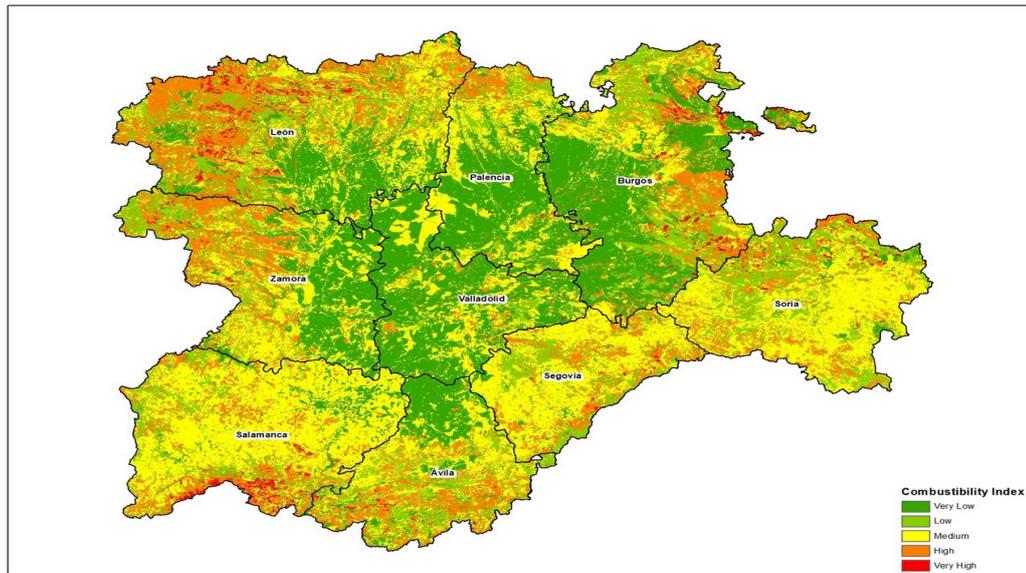


Figura 5. Índice de Combustibilidad (Castilla y León).

Integrando la información de los mapas anteriores obtenemos el Índice Territorial de Riesgo de Incendios, TFRI por sus siglas en inglés (Figura 6). En conjunto el valor de este índice es moderado en Castilla y León (colores amarillos), con un 33.55 % de la superficie dentro de este rango. Además, el 12.14 % de la región se encuentra en una situación de riesgo alto o muy alto (colores naranja y rojo, respectivamente), mientras que el 54.31 % puede considerarse "fuera de riesgo" (colores verdes), según este índice.

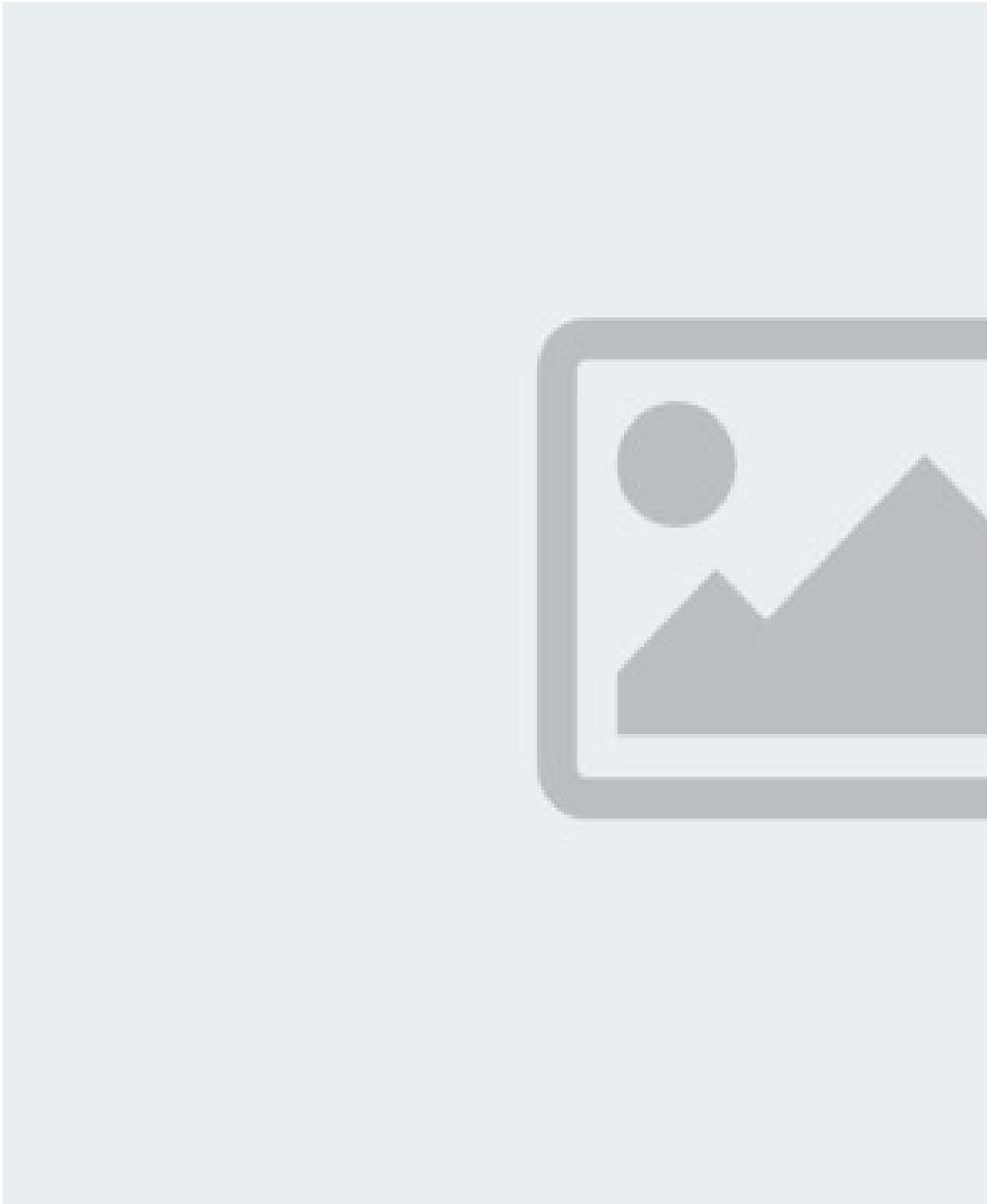


Figura 6. Índice Territorial de Riesgo de Incendios (Castilla y León).

4.2. Índice de propagación de incendios

Asimismo, hemos realizado unas simulaciones a nivel del MUP72 en el Cañón del río Lobos en Soria. Se simuló un incendio con focos en las dos parcelas de estudio que permitió obtener los datos de longitud de llama que se muestran en la

siguiente Tabla 5 y en el Figura 7. Los detalles de estas simulaciones están en el trabajo de GALLEGO y DE-DIOS-GARCÍA (2023).

Tabla 5. Longitud de llama a nivel de masa forestal.				
Longitud de la llama (m)	Área forestal total (ha)	<i>Pinus nigra</i>	<i>Juniperus thurifera</i>	Otras especies
<0.5	137.90	136.90	0.07	0.93
0.5-1	258.12	223.73	30.52	3.87
1-2	41.70	6.06	35.14	0.50
2-3	13.86	0.87	12.99	0.00
3-5	1.05	0.01	1.03	0.01
5-10	1.47	0.01	1.46	0.00
>10	2.78	0.09	2.68	0.01

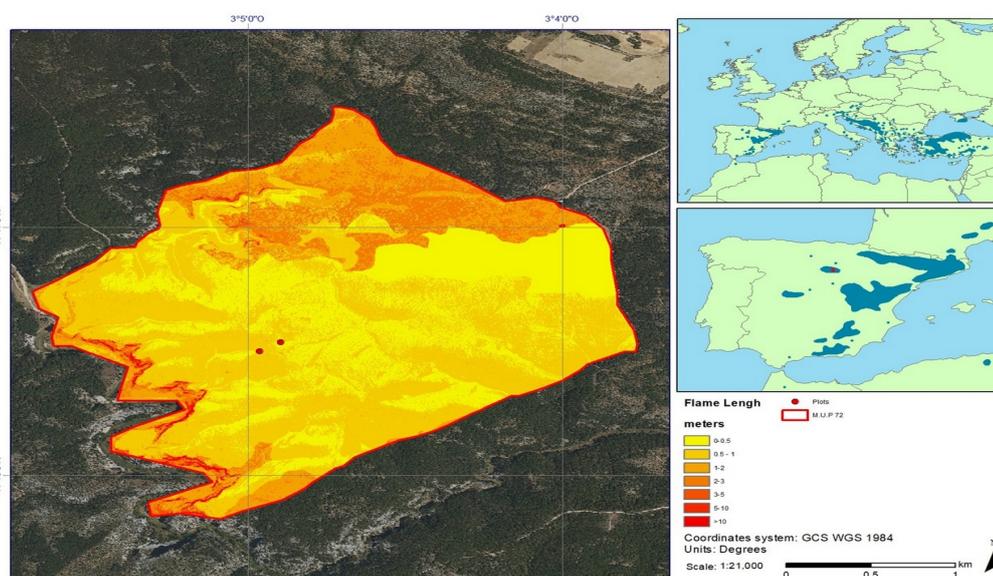


Figura 7. Longitud de la llama (MUP 72).

La longitud de la llama es una variable de comportamiento del fuego. En la Figura 7 se observa la longitud de la llama alcanzada en metros para cada píxel desde la superficie hasta el extremo de la llama. Las zonas más oscuras corresponden a las zonas donde la llama supera los 10 metros, este fenómeno se produce en zonas altas del rodal. Se ha clasificado en 7 categorías (Tabla 5), según el alcance, de menor a mayor. Las zonas en tonos más claros se observan en las zonas con menor pendiente del rodal, en zonas donde predomina el modelo 9 de combustible, es decir, el fuego se propaga por la hojarasca compacta y no alcanza alturas grandes. Donde la longitud de llama alcanzaría mayores valores sería en la zona del Cañón de río Lobos y una pequeña zona del norte del rodal, donde predomina el modelo 2 de combustible, es decir, pasto fino, seco y bajo. Plantaciones leñosas cubren 1/3 a 2/3 de la superficie donde predominan las formaciones de *Juniperus thurifera*.

Continuando el ejercicio anterior de plantear un punto de inicio de incendio cercano a las parcelas de muestreo para estudiar su evolución, las parcelas serían el origen del conjunto de ejes de propagación. Las zonas más críticas corresponden a las zonas donde los ejes principales se ramifican (Figura 8).

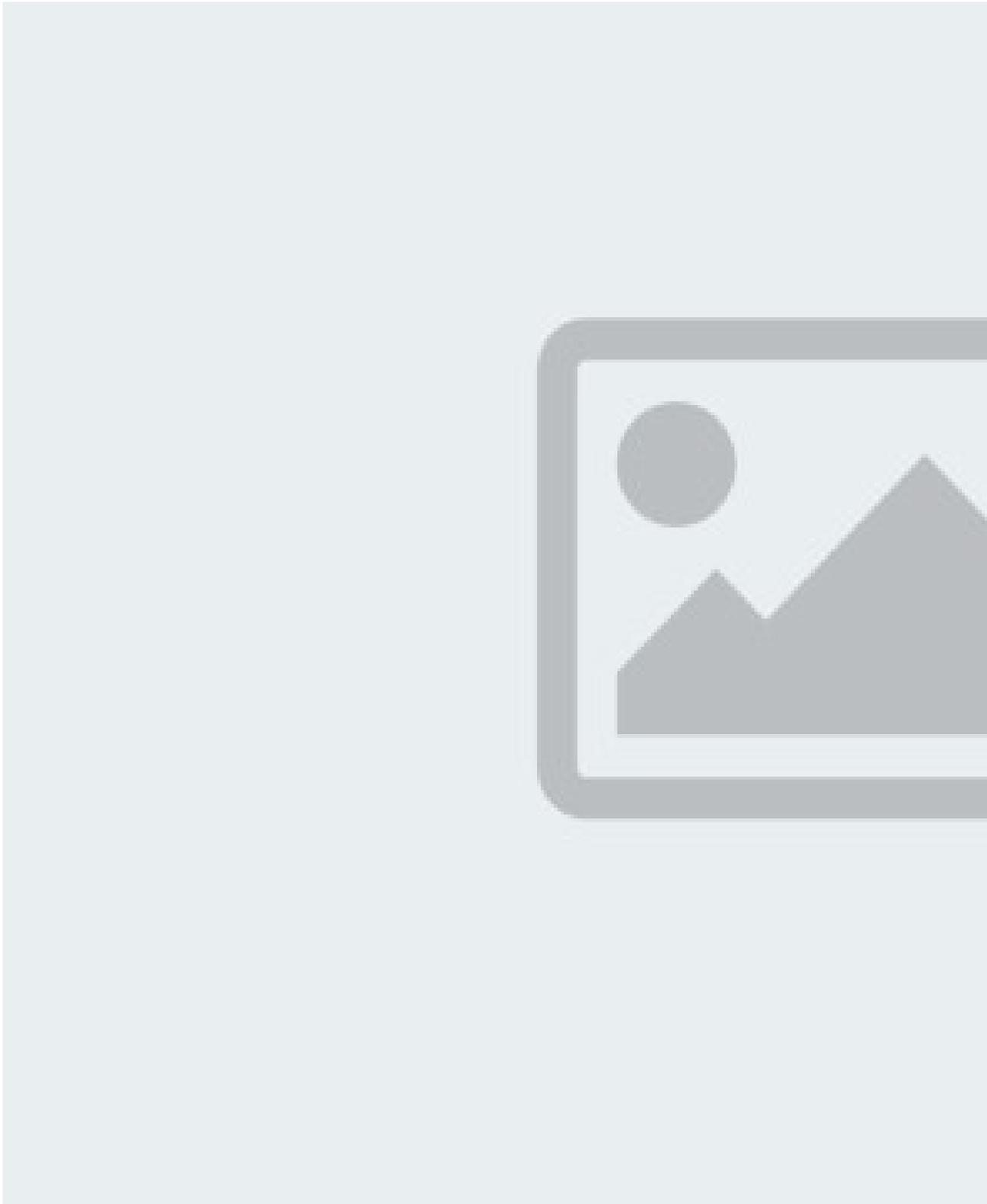


Figura 8. Ejes principales de propagación del incendio (MUP72).

Por otra parte, hemos estimado la actividad del fuego de copas, que es un indicador de peligrosidad. Esto se debe a que en un incendio forestal, cuando se alcanzan las copas de los árboles, su intensidad suele incrementarse, aumentando la velocidad de propagación, la longitud de la llama y los riesgos de seguridad para los equipos de extinción (i.e. XANTHOPOULOS, 2020). En la siguiente figura (Figura

9) podemos observar cómo se comportaría el fuego en las copas de los árboles, considerando un total de 4 categorías. La zona con mayor actividad del fuego de copas es la zona norte del rodal y en la zona del Cañón (fuego activo de copas que avanza con gran frente de llamas que lo quema todo), afectando más a las zonas con superficie de *Juniperus thurifera*. En general el rodal tiene una actividad de copas media (fuego superficial que afecta sólo a combustibles de superficie no afecta las copas). Estas son zonas donde predomina la presencia de *Pinus nigra* en estado latizal con una FCC de entorno al 80%.

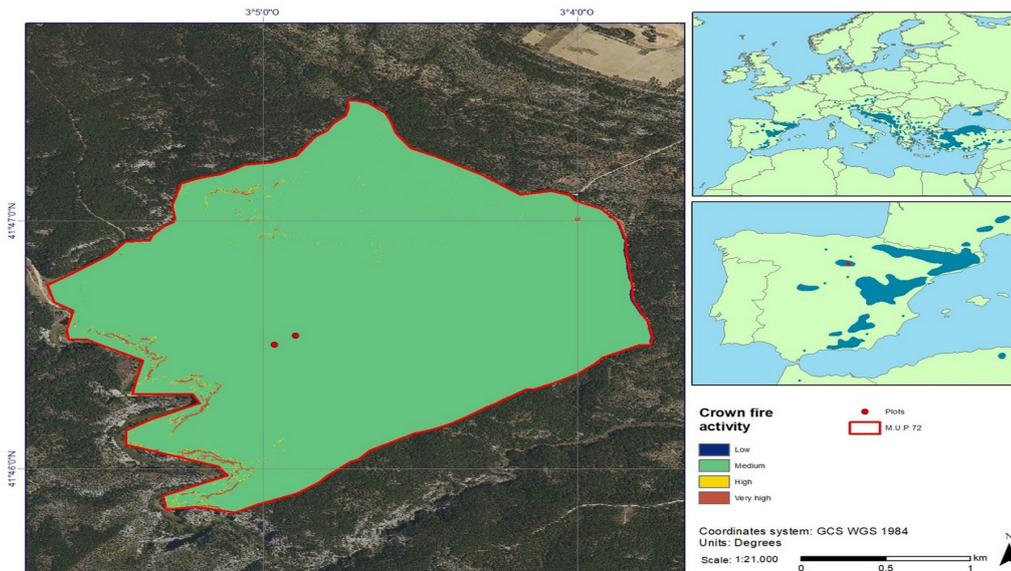


Figura 9. Actividad del fuego de copas (MUP72).

La velocidad de propagación hace referencia al rango de incremento o expansión de un incendio, en este caso medido en forma lineal en metros por minuto. La velocidad de propagación es una clave fundamental, ya que puede ser muy predecible, siempre que se conozca el tipo de combustible por el cual se están desplazando. Cabe destacar que la situación es poco predecible cuando se presentan incendios de copa (JULIO y GIROZ, 1975).

Como se puede observar en la Figura 10, la zona central del rodal tiene una velocidad de propagación de menos de dos metros por minuto, lo que quiere decir que estaría dentro de las posibilidades de extinción. Las zonas más críticas y donde se produciría una velocidad mayor serían las zonas más elevadas del Cañón, que comparando con el mapa de combustibles sería la zona donde se encuentra presente el modelo 9 de combustible, es decir hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas, formada por acículas largas y rígidas como es el caso del rodal y los modelos de matorral 7 con matorral de especies muy inflamables en sotobosque de masas de coníferas.

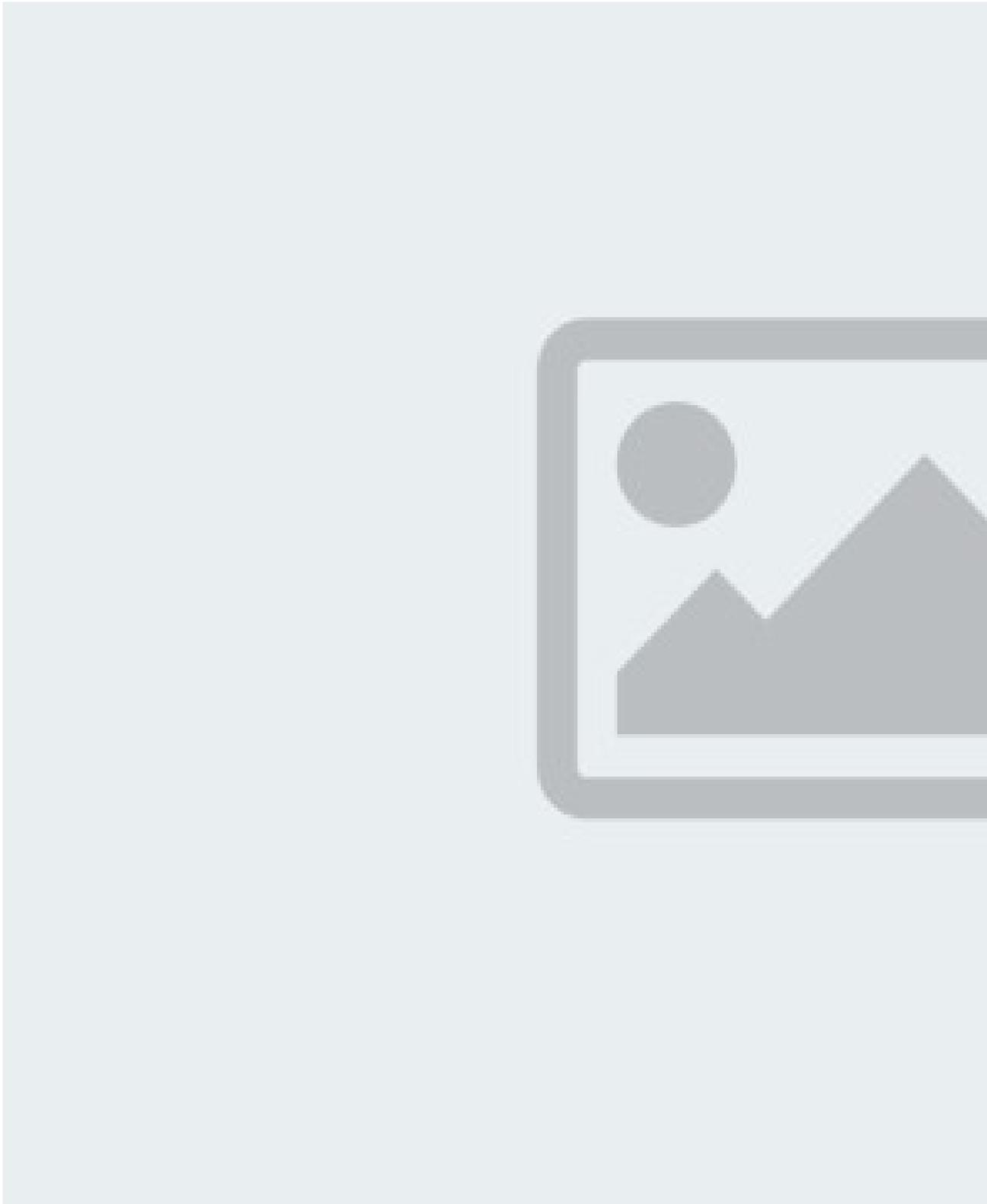


Figura 10. Velocidad de propagación de un incendio (MUP72).

Asimismo, es necesario conocer las zonas fuera de la capacidad de extinción (Figura 11). Estas zonas se calculan con la matriz de datos de velocidad de propagación, longitud de llama y la actividad de copas (GALLEGO y DE-DIOS-GARCÍA, 2023) y nos da las zonas que son difíciles de extinguir o defendibles. 53.62 ha quedarían en estas zonas fuera de la capacidad de extinción, el 11.73% de la

superficie del rodal.

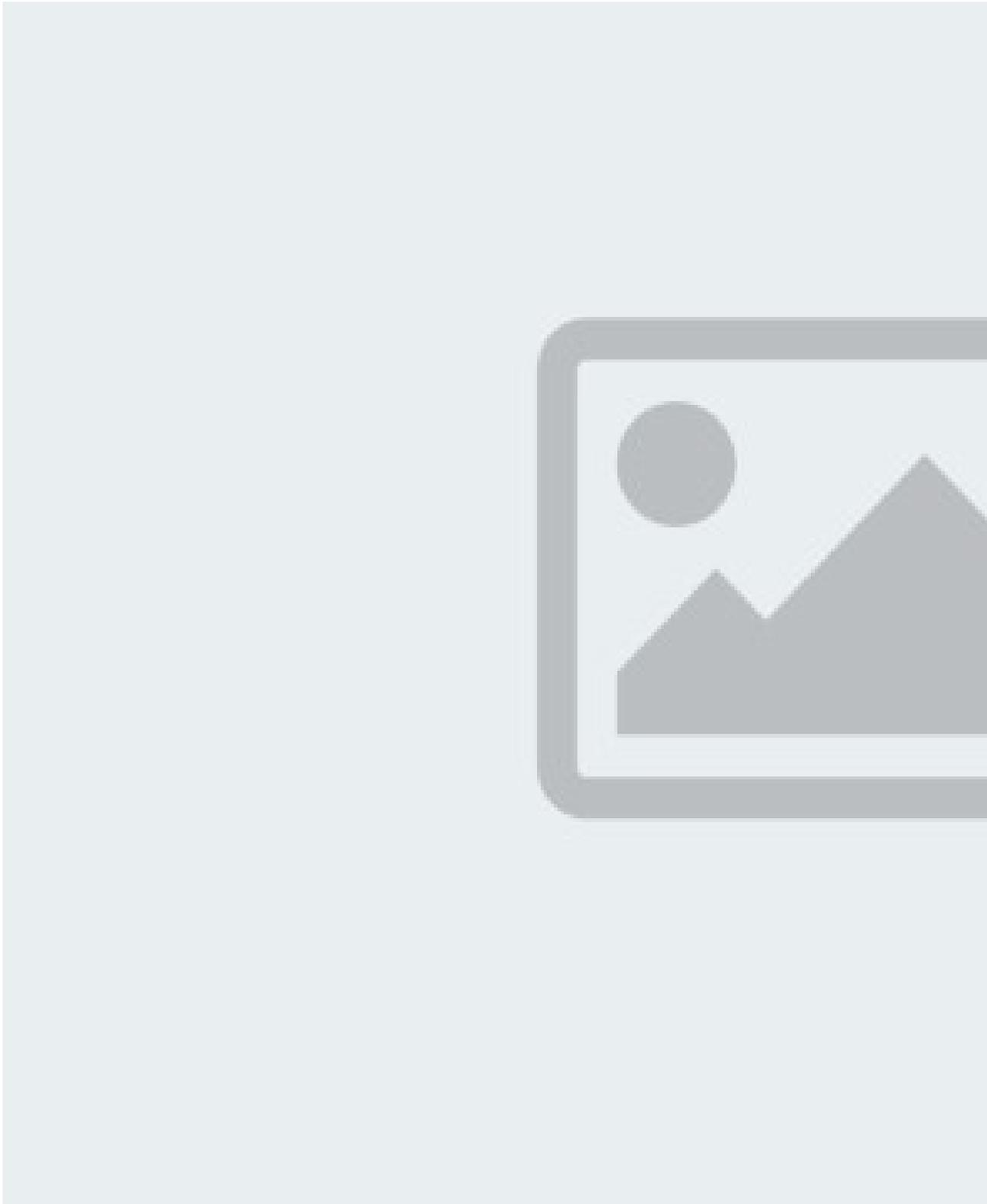


Figura 11. Capacidad de extinción de incendios (MUP72).

Del mismo modo se plantea evaluar el alcance del incendio (en horas) tras producirse un incendio en las parcelas de muestreo (Figura 12). En caso de producirse un incendio en esa zona del rodal entre las 2 y 3 primeras horas se

quemaría más de la mitad del rodal (309 ha, 67.60%).

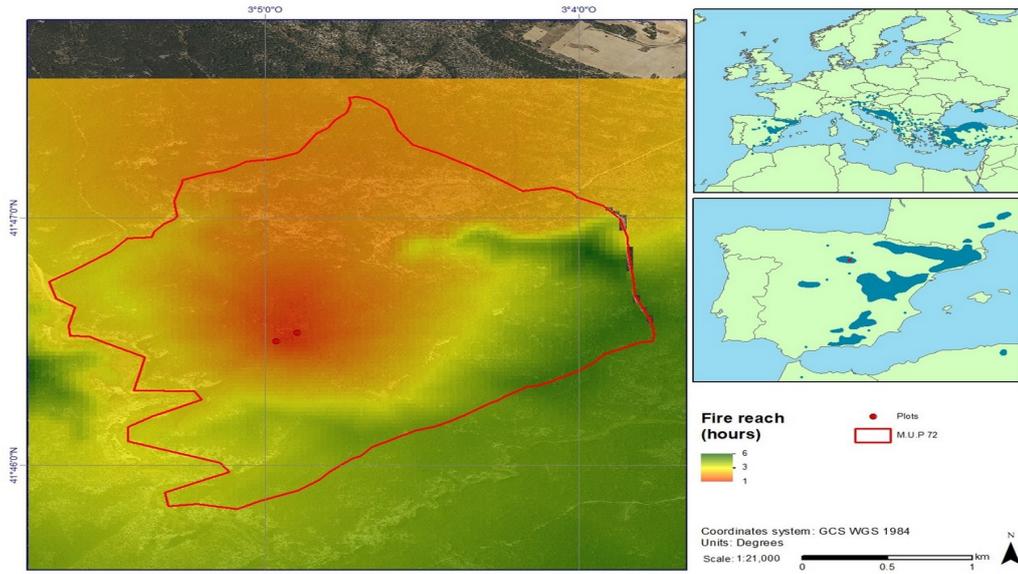


Figura 12. Alcance del fuego (MUP 72).

4.3. Índice de condición de la vegetación para Castilla y León.

El Índice de Condición de la Vegetación (VCI) puede ayudar en la toma de decisiones informadas para la gestión de recursos naturales. Proporciona información cuantitativa sobre el estado de la vegetación, mostrando valores más bajos (colores amarillos a naranjas) cuando la vegetación está más estresada en comparación con condiciones previas consideradas. Se calculó el VCI promedio para los años 2016-2022 en Castilla y León (Figura 13 y Tabla 6).

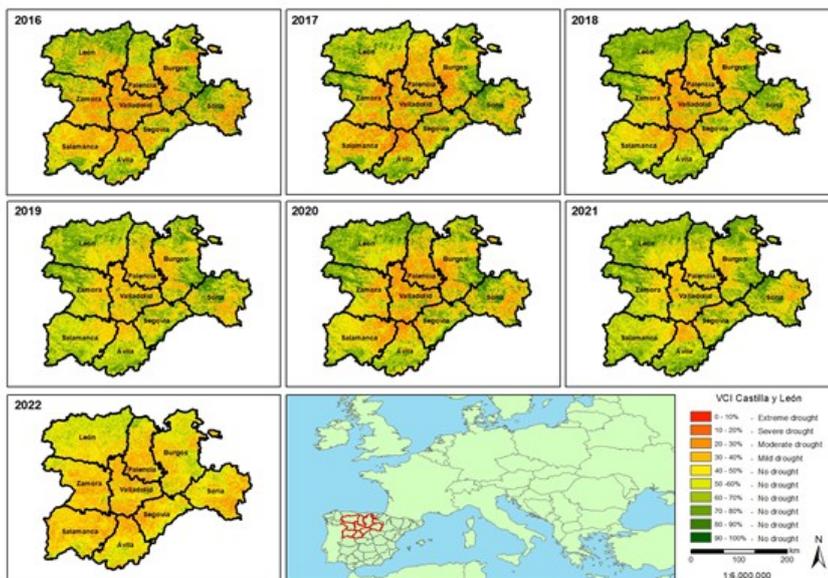


Figura 13. Índice de Condición de la Vegetación (VCI) promedio para Castilla y León (2016-2022).

Tabla 6. Índice de Condición de la Vegetación (VCI) promedio anual.



Año	VCI promedio
2016	49.57
2017	50.14
2018	53.27
2019	54.88
2020	52.22
2021	57.16
2022	39.18

Una interpretación común del VCI es la siguiente:

VCI > 80	Condición de vegetación muy buena.
60 < VCI ≤ 80	Condición de vegetación buena.
40 < VCI ≤ 60	Condición de vegetación moderada.
VCI ≤ 40	Condición de vegetación pobre o estresada.

El valor promedio más bajo de VCI para Castilla y León fue de 39.18% en 2022, lo que se considera como una sequía leve, pero, en general, indica una condición de vegetación pobre o estresada. Valores intermedios de VCI (amarillo) para toda la región se obtuvieron en 2016 (49.57%), mientras que valores promedio de VCI en el rango de 50-60% se registraron entre los años 2017 y 2021. Por lo tanto, considerando la región en su conjunto, durante los años 2016-2021 la vegetación presentó una condición moderada. En toda Castilla y León, los colores más amarillentos se observan para toda la serie de datos (2016-2022) en la zona de la Meseta Norte española.

4.4. Índice de condición de la vegetación MUP72.

El año 2022 puede clasificarse como el más seco en términos de VCI dentro de la serie de años analizados (2018-2022), con un valor promedio de VCI de 32.14 (Tabla 7). Cabe destacar que los meses de diciembre y marzo alcanzaron niveles de sequía severa en 2022.

Tabla 7. Índice de condición de vegetación mensual MUP72.

MT 6: FUEGO Y OTROS RIESGOS ABIÓTICOS



Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2018	42.36	41.62	20.49	46.71	53.26	63.51	64.64	77.58	71.39	51	23.86	38.36	49.57
2019	58.53	72.52	59.64	48.13	63.52	74.94	67.67	71.14	44.72	53.26	34.19	51.03	58.27
2020	27.95	50.97	39.18	20.27	56.01	49.22	82.45	74.87	60.92	32.49	56.31	25.67	48.03
2021	31.77	32.04	52.61	23.56	29.59	40.11	78.81	82.89	41.4	57.77	50.57	38.07	46.6
2022	51.23	27.7	13.26	26.15	39.36	36.7	45.96	43.71	32.41	27.68	25.07	16.48	32.14

Nuestros resultados sugieren que los niveles de estrés por sequía en otoño (particularmente en septiembre y octubre) han aumentado en los últimos cinco años en comparación con años anteriores. Obtuvimos colores más verdes (valores de VCI más altos) en los meses de verano (junio a septiembre), lo que podría estar relacionado con el tipo de bosque en el sitio del estudio de caso, dominado por especies de árboles mediterráneos perennes (*Pinus nigra* y *Juniperus thurifera*), adaptadas al estrés por sequía, que podrían no haber sufrido cambios significativos en su dosel durante el verano (Figura 14).

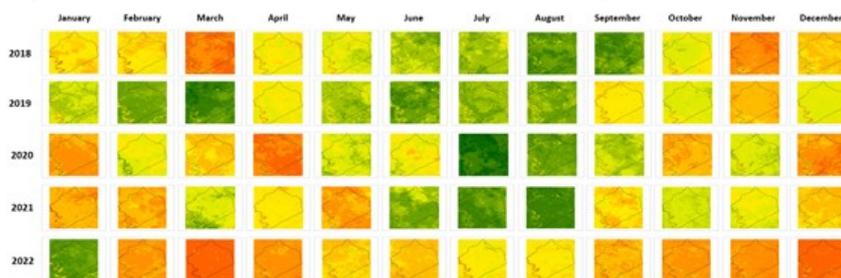


Figura 14. Índice de condición de vegetación promedio mensual MUP72.

5. Discusión

5.1. Índice territorial de riesgo de incendios

Podemos concluir que el Índice Territorial de Riesgo de Incendios (TFRI) es moderado en Castilla y León, con el 33.55% de la superficie dentro de este rango. Además, el 12.14% de la región se encuentra en una situación de alto o muy alto riesgo, mientras que el 54.31% puede considerarse "fuera de peligro", según este índice en consonancia con estudios previos (CONSEJERÍA DE FOMENTO Y MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN y FUNDACIÓN CESEFOR, 2018). Consideramos que una comparación de estos resultados con los registros históricos de incendios y los escenarios de cambio climático en la región validará esta metodología y ampliará sus posibilidades para tomar decisiones informadas en cuanto a la prevención de incendios.

5.2. Simulación de propagación de incendios

En caso de iniciarse un incendio en las parcelas experimentales, se espera que se propague a través de hojarasca compacta, sin alcanzar grandes alturas. La mayor longitud de llama ocurriría en la zona del Cañón del Río Lobos (límite oeste del rodal) y en una pequeña zona al norte, donde predomina el modelo de combustible 2, compuesto por hierba fina, seca y baja. Las plantaciones leñosas cubren entre 1/3 y 2/3 de esta área, donde prevalecen formaciones de *Juniperus thurifera*.

La zona central del rodal presenta una velocidad de propagación inferior a dos metros por minuto, lo que significa que estaría dentro de las posibilidades de extinción (COSTA et al., 2011). Las áreas más críticas, donde se alcanzaría una mayor velocidad, son las zonas altas del Cañón, donde predominan los modelos de combustible 9 y 7. El modelo de combustible 9 consiste en hojarasca en bosques densos de coníferas o frondosas, formada por agujas largas y rígidas, como ocurre en este rodal. Por otro lado, el modelo de combustible 7 consiste en especies de matorral altamente inflamables en el sotobosque de rodales de coníferas.



La zona con mayor actividad en el dosel corresponde a la parte norte del rodal y el área del Cañón. En estas áreas, puede progresar un fuego activo de copas con un frente de llama altamente destructivo. Estas zonas están ocupadas de manera natural por *Juniperus thurifera*.

Sin embargo, la mayor parte del rodal presenta una actividad moderada en el dosel (sujeta a incendios superficiales que solo afectan a combustibles superficiales y no al dosel). Estas son áreas donde predomina *Pinus nigra* en fase de fustal, con una cobertura de dosel alrededor del 80%. La longitud de la llama y la actividad en el dosel nos indican las áreas difíciles de extinguir o defendibles. Un total de 53.62 ha quedarían en áreas fuera de la capacidad de extinción, representando el 11.73% de la superficie del rodal. En caso de incendio, durante las primeras 2-3 horas, más de la mitad del rodal ardería (309 ha, 67.60%).

5.3. Índice de condición de la vegetación

De la serie de años considerados (2016-2022), la región de Castilla y León tuvo el valor más bajo del Índice de Condición de la Vegetación (VCI) en 2022 en consonancia con otros estudios (C3S, 2023; TRIPATHY & MISHRA, 2023), con un 39.18%, lo que se considera una condición de vegetación pobre. Sin embargo, estos valores varían significativamente según el sitio considerado dentro de la región. Los resultados de este índice indican que las condiciones de sequía se intensifican cada año en la región central de la Meseta Norte. Asimismo, el estrés por sequía en otoño (particularmente en septiembre y octubre) ha aumentado en los últimos 5 años en comparación con años anteriores.

El VCI puede detectar situaciones de sequía y determinar su inicio (LIU & KOGAN, 1996; WARDLOW et al. 2012), especialmente en áreas donde los episodios de sequía no son evidentes. Se centra en los impactos de la sequía en la vegetación y puede proporcionar información sobre el inicio, la duración y la severidad de la sequía mediante la detección de cambios en la vegetación y su comparación con valores históricos. Es por tanto una herramienta valiosa, pero tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, no proporciona información detallada sobre la causa subyacente del estrés en la vegetación. Además, los datos de teledetección pueden verse afectados por la cobertura de nubes y la calidad de las imágenes, entre otros factores.

6. Conclusiones

La creación de mapas de riesgo y simulación de situaciones de incendio es un elemento clave para la prevención y la previsión de comportamientos del fuego, ya que permite el diseño, la planificación y el conocimiento a cerca de donde ubicar infraestructuras que sirvan para frenar el fuego como cortafuegos, caminos o zonas de seguridad. También es interesante simular un incendio de cara a la elaboración de planes de prevención de incendios forestales o planes de control y de emergencia. Son herramientas gratuitas que pueden ayudar a reducir el coste total de la gestión de bosques e incendios. El simulador de incendios Flammap es una herramienta muy útil en lo que se refiere a la evolución de un incendio forestal, con mucho más potencial si se trabajasen los datos en tiempo real. Usando los parámetros observados in situ de temperatura, viento y humedad del combustible, los resultados podrían ser mucho más precisos. Aun así, no se debería esperar al día del incendio para identificar los problemas y oportunidades para sofocarlo o prevenirlo. El resultado obtenido muestra que la inclusión de



parámetros meteorológicos como el viento y la temperatura, junto a la cartografía de modelos de combustible es necesaria para obtener simulaciones razonables en incendios forestales.

Por otra parte, el VCI ha demostrado ser una herramienta prometedora y puede aportar valor frente a otros índices de estrés de la vegetación, pero tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, no proporciona información detallada sobre la causa subyacente del estrés en la vegetación. Además, los datos de teledetección pueden verse afectados por la cobertura de nubes y la calidad de las imágenes, entre otros factores.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto H2020 ONEforest. Agradecemos a Luis Eduardo Molina y Ángela Blázquez de Cesefor por su ayuda en el establecimiento de las parcelas en el Cañón del Río Lobos, así como a la Dirección General de Patrimonio Natural y Política Forestal de la Junta de Castilla y León por el apoyo brindado para la realización de este estudio.

8. Bibliografía

ANDERSON, H.E.; 1982. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-122. p. 20.

CHÉRET, V.; DENUX, J.-P.; 2011. Analysis of MODIS NDVI time series to calculate indicators of Mediterranean forest fire susceptibility. *GISci. Remote Sens.*, 48(2), 171–194.

CONSEJERÍA DE FOMENTO Y MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN y FUNDACIÓN CESEFOR; 2018. Plan 42-Bierzo Oeste.

COSTA, P.; CASTELLNOU, M.; MIRALLES, M.; KRAUS, D.; 2011. Prevention of Large Wildfires using the Fire Types Concept. *FireParadox*, EFI, GRAF - Bombers de la Generalitat de Catalunya.

C3S (Copernicus Climate Change Service); 2023. European State of the Climate 2022. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Copernicus Climate Change Service.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations); 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome, Italy: FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

FINNEY, M. A.; 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. Pages 213-220. In: ANDREWS, P. L.; BUTLER, B. W. (comps.). *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

GALLEGO, R. y DE-DIOS-GARCÍA, J.; 2023. Entregable D3.7 "Dataset of indicators and vulnerability maps (stand and regional level) for an overall assessment of forest vulnerability to fires and droughts". Proyecto ONEforest. Proyecto financiado por Horizon 2020 bajo el acuerdo de subvención N° 101000406.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MOLA-



YUDEGO, B.; 2012. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *For. Ecol. Manag.*, 282, 149-156.

GÓRRIZ-MIFSUD, E.; AMEZTEGUI, A.; GONZÁLEZ, J.R.; TRASOBARES, A.; 2022. Climate-Smart Forestry Case Study: Spain. In: HETEMÁKI, L.; KANGAS, J.; PELTOLA, H. (eds) *Forest Bioeconomy and Climate Change. Managing Forest Ecosystems*, vol 42. 211-228. Springer, Cham.

JOHNSTON, L. M.; WANG, X.; ERNI, S.; TAYLOR, S. W.; McFAYDEN, C. B.; OLIVER, J. A.; STOCKDALE, C.; CHRISTIANSON, A.; BOULANGER, Y.; GAUTHIER, S.; ARSENAULT, D.; WOTTON, B. M.; PARISIEN, M.-A.; FLANNIGAN, M. D.; 2020. Wildland fire risk research in Canada. *Environ. Rev.*, 1-23.

JULIO, G. y GIROZ, G.; 1975. Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 18-27.

KOGAN, F.N.; 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.*, 15(11):91-100.

LIU, W.T.; KOGAN, F.N.; 1996. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *Int. J. Remote Sens.*, 17(14):2761-2782.

ROTHERMEL, R.C.; 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

ROTHERMEL, R.C.; 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 70.

SCOTT, J.H.; BURGAN, R.E.; 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 66.

SNYDER, R. L.; SPANO, D.; DUCE, P.; BALDOCCHI, D.; XU, L.; PAW U, K. T.; 2006. A fuel dryness index for grassland fire-danger assessment. *Agric. For. Meteorol.*, 139(1-2), 0-11.

TRIPATHY, K. P.; MISHRA, A. K.; 2023. How unusual is the 2022 European compound drought and heatwave event? *Geophys. Res. Lett.*, 50(15), e2023GL105453.

XANTHOPOULOS, G. & ATHANASIOU, M.; 2020. Crown Fire. In: Manzello, S.L. (eds) *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer, Cham.

WARDLOW, B.D.; ANDERSON, M.C.; VERDIN, J.P. (EDS.); 2012. *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*. Boca Raton, FL, CRC Press.