CONAMA 2026

Modelización espacial de la vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales mediante SIG: un enfoque multicriterio para la priorización de áreas de conservación

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Norlan Miguel Ruiz Potosme. Profesor investigador, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Valladolid.

Otros Autores: Isabel González García. Investigadora, Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL), Subdirección de Investigación y Tecnología, Valladolid.

Pablo Martín Ramos. Catedrático. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid.

Daniel Martínez Ortega. Arquitecto urbanista, CASA 47, Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana de Madrid.

Luis Fernando Sánchez Sastre. Profesor investigador, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Valladolid.

Lida Mercado Martín. Doctoranda, Departamento de Tecnología de la Edificación y Servicios, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, Universidad de Valladolid.

Adolfo Mercado Santamaría. Profesor titular, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Valladolid.

Alfredo del Campo Torrejón. Profesor sustituto, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Valladolid.

José Luis Marcos Robles. Profesor titular, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Valladolid.

Luis Manuel Navas Gracia. Catedrático, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid.

Índice

Resumen

1. Introducción 1

2. Metodología 2

2.1. Área de estudio 2

2.2. Fuentes de datos 2

2.3. Variables de peligrosidad 2

2.3.1. Índice meteorológico de peligro de incendio (FWI) 3

2.4. Indicadores de valor ecológico 3

2.5. Modelo de evaluación multicriterio y ponderación AHP 4

2.6. Validación del modelo IVE (Índice de Vulnerabilidad Ecológica) 5

3. Resultados 6

4. Discusión 9

5. Conclusiones 10

6. Bibliografía 11

Resumen

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad, especialmente en territorios donde la elevada disponibilidad de combustible vegetal, las condiciones topográficas y climáticas, y la presión antrópica incrementan la vulnerabilidad de los ecosistemas. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporcionan herramientas avanzadas para integrar, analizar y representar espacialmente variables ambientales y territoriales relacionadas con el riesgo de incendios y el valor ecológico del territorio. El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología de modelización espacial orientada a evaluar la vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales y establecer una priorización territorial de las áreas que requieren mayores esfuerzos de prevención y conservación en la Comunidad de Castilla y León (España), utilizando datos correspondientes al período 2015-2023. Se plantea un enfoque multicriterio que integra variables de peligrosidad e indicadores de valor ecológico, ponderadas mediante el proceso analítico jerárquico (AHP). Para ello, se traza una perspectiva multicriterio que integra variables relacionadas con la peligrosidad y propagación potencial del fuego, incluyendo pendiente, orientación, altitud, cobertura y estructura de la vegetación, usos del suelo, accesibilidad, condiciones ambientales y proximidad a infraestructuras. Las principales fuentes de datos empleadas son el Mapa Forestal de España (MFE), *Corine Land Cover*, el Modelo Digital del Terreno del PNOA y la cartografía de la Red Natura 2000. Estas variables se combinan con indicadores de valor y sensibilidad ecológica, tales como espacios naturales protegidos, hábitats de interés comunitario, áreas de especial relevancia para la biodiversidad y conectividad ecológica. Mediante técnicas de análisis espacial y superposición multicriterio se obtendrá una cartografía de vulnerabilidad ecológica, lo que permitirá identificar las zonas en las que coinciden una elevada probabilidad o peligrosidad frente a incendios y un alto valor ambiental. Los resultados permitirán establecer áreas prioritarias para la aplicación de medidas preventivas, actuaciones de gestión de combustibles, planificación territorial y protección de ecosistemas especialmente sensibles. La metodología propuesta constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permite orientar de forma más eficiente los recursos destinados a la prevención de incendios y contribuir a la conservación de la biodiversidad y a una gestión territorial más sostenible y resiliente.

Palabras clave: Incendios forestales, SIG, Vulnerabilidad ecológica, Biodiversidad, Comunidad Autónoma de Castilla y León y Análisis multicriterio.

1. Introducción

Los incendios forestales representan una de las perturbaciones ecológicas de mayor impacto a escala global, con consecuencias directas sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados (Pausas y Keeley, 2009; San-Miguel-Ayanz *et al*., 2013). En la cuenca mediterránea, donde las condiciones climáticas, topográficas y la interfaz urbano-forestal propician escenarios de alta peligrosidad, la frecuencia e intensidad de los incendios se ha incrementado significativamente en las últimas décadas, tendencia que los escenarios de cambio climático prevén acentuar (Flannigan *et al*., 2009; Turco *et al*., 2018).

La Comunidad de Castilla y León, con una superficie forestal superior a los cuatro millones de hectáreas, alberga ecosistemas de elevado valor ecológico y una importante representación de hábitats incluidos en la Red Natura 2000. La vulnerabilidad de estos espacios frente al riesgo de incendios forestales está condicionada por factores como la disponibilidad de combustible vegetal, la topografía, las condiciones climáticas estivales y el abandono de tierras agrícolas que favorece la continuidad de la cubierta vegetal (Vélez, 2009; MITECO, 2024). Comprender y cartografiar esta vulnerabilidad constituye un requisito previo esencial para una gestión territorial eficaz y preventiva (Chuvieco *et al*., 2010).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser herramientas fundamentales para la integración y análisis espacial de variables ambientales heterogéneas, permitiendo la elaboración de modelos de riesgo e índices de vulnerabilidad a escala territorial (Chuvieco y Congalton, 1989; Vadrevu *et al*., 2010). La evaluación multicriterio espacial, y en particular el proceso analítico jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980), ha sido ampliamente aplicada para la ponderación y combinación de variables ambientales en el análisis de riesgos naturales, ofreciendo resultados robustos y reproducibles (Gigović *et al*., 2019; Youssef *et al*., 2015).

A pesar de los avances en la modelización del peligro de incendio, la integración explícita del valor ecológico del territorio en los modelos de vulnerabilidad sigue siendo un campo en desarrollo (Rodrigues *et al*., 2020). La consideración conjunta de la peligrosidad y la sensibilidad ecológica permite identificar las áreas donde el impacto potencial de un incendio sobre la biodiversidad y los hábitats protegidos sería más severo, proporcionando criterios objetivos para la priorización de actuaciones preventivas y de conservación (Moreira *et al*., 2011; Nieto-Solana *et al*., 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología de modelización espacial para la evaluación de la vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales en Castilla y León, mediante la integración de variables de peligrosidad e indicadores de valor ecológico en un entorno SIG, con el fin de establecer una cartografía de priorización territorial que apoye la toma de decisiones en materia de prevención y conservación.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende la Comunidad de Castilla y León (España), con una extensión de 94.226 km2, lo que la convierte en una de las regiones más extensas de la Unión Europea. La región presenta una elevada diversidad ecológica, con formaciones de bosque mediterráneo y atlántico, extensas masas de pinar y robledal, y una importante representación de la Red Natura 2000, que ocupa aproximadamente el 27 % de su superficie. El período de análisis abarca los años 2015-2023, seleccionado por la disponibilidad y homogeneidad de los conjuntos de datos empleados.

2.2. Fuentes de datos

Cuadro 1. *Síntesis de las fuentes de datos utilizadas, la resolución espacial original y el tipo de información extraída para la construcción de los indicadores.*

Variable / Capa	Fuente de Datos	Formato / Resolución Original	Información Extraída / Indicador Generado
Modelo Digital del Terreno	PNOA - Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Ráster (MDT25, 25m)	Pendiente (%), Orientación (º), Insolación Relativa (IR)
Mapa Forestal de España	MFE50 - MITECO / JCyL	Vectorial (1:50.000)	Modelo de combustible, continuidad del combustible vegetal
Usos del Suelo	CLC 2018 / SIOSE y cartografía catastral (IGN	Vectorial (1:100.000 / Parc.)	Interfaz urbano-forestal (IUF), grado de antropización
Datos Meteorológicos	AEMET (Estaciones automáticas, 2015-2023)	Puntual / Tabular	Temperatura, HR, Viento, Precipitación -> FWI p90
Espacios Protegidos	Red Natura 2000 / RENPA (JCyL)	Vectorial (1:25.000)	ZEC, ZEPA, Espacios Naturales Protegidos (ENP)
Hábitats de Interés	Atlas HIC - MITECO / Directiva 92/43/CEE	Vectorial (1:50.000)	Hábitats de interés comunitario: prioritarios (4020*, 91E0*) y no prioritarios (9230, etc.)
Distribución de Especies	Inventarios de Biodiversidad (MITECO / JCyL)	Vectorial (Mallas 1x1 km)	Riqueza de especies amenazadas (CEEA / LESRPE)
Histórico de Incendios	Estadística General de Incendios Forestales (EGIF)	Puntual / Polígono	Incendios > 25 ha (2015-2023) para validación ROC

2.3. Variables de peligrosidad

El modelo de peligrosidad integra variables relacionadas con la propagación potencial del fuego y las condiciones de ignición, agrupadas en tres categorías: (a) variables topográficas, pendiente, orientación y altitud, derivadas del MDT25 siguiendo los criterios de *Chuvieco et al.* (2010). La orientación se normalizó mediante un índice de insolación relativa ($IR = [1 + \cos(\theta - 225°)] / 2$, donde θ es el azimut en grados), que asigna los valores máximos de peligrosidad a las laderas de orientación suroeste (225°) por su mayor desecación e insolación, y valores mínimos a las umbrías norte, siguiendo la función de pertenencia difusa aplicada en estudios previos de riesgo de incendio

en la Península Ibérica (Chuvieco *et al.*, 2010; Rodrigues *et al.*, 2020); (b) variables de combustible, cobertura vegetal, carga y continuidad de combustible, y fracción de cabida cubierta, obtenidas del MFE y procesadas según la metodología de Rothermel (1972) para la estimación del comportamiento del fuego; y (c) variables socioterritoriales, usos del suelo, proximidad a infraestructuras viarias, accesibilidad y densidad de interfaz urbano-forestal, derivadas de SIOSE/CLC y cartografía catastral (IGN, 2023). Adicionalmente, se incorporaron índices climáticos de peligro de incendio, calculados a partir de datos AEMET según el índice FWI (Van Wagner, 1987), promediados para el período estival 2015-2023.

2.3.1. Índice meteorológico de peligro de incendio (FWI)

El componente climático de la peligrosidad se cuantificó mediante el *Fire Weather Index* (FWI), sistema de índices desarrollado por el Canadian *Forest Service* (Van Wagner, 1987) y adoptado como referencia operativa en Europa por el Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS; San-Miguel-Ayanz et al., 2013). El FWI integra cuatro variables meteorológicas observadas al mediodía solar temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación acumulada en una cadena de seis subíndices encadenados que estiman progresivamente: el contenido de humedad de distintas capas del combustible forestal (FFMC: combustible fino superficial; DMC: materia orgánica a profundidad media; DC: sequía profunda acumulada), la velocidad de propagación inicial del fuego (ISI), la disponibilidad total de combustible (BUI) y, finalmente, la intensidad esperada del frente de llamas (FWI). El resultado es un valor adimensional que aumenta con la temperatura, el viento y la sequía acumulada, y disminuye con la precipitación y la humedad relativa; los umbrales de clasificación del peligro varían según la fuente operativa; a modo orientativo, EFFIS (San-Miguel-Ayanz *et al*., 2013) establece peligro muy alto para FWI entre 38 y 50, y peligro extremo para FWI > 50, con una categoría adicional de peligro muy extremo para FWI > 70.

Para este estudio se calcularon valores diarios del FWI a partir de datos de la red de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) distribuidas en el área de estudio, correspondientes al período estival (junio-septiembre) de los años 2015-2023. Para cada píxel de la cartografía se interpolaron los valores de las variables de entrada mediante *kriging* ordinario (Goovaerts, 1997) y se calculó el FWI correspondiente. Como indicador resumen de la peligrosidad climática estructural, es decir, no de episodios puntuales sino de condiciones que se repiten anualmente se utilizó el percentil 90 del FWI estival para cada celda a lo largo del período analizado. Este análisis estadístico captura la peligrosidad característica de los días de mayor riesgo de cada verano, excluyendo los valores extremos anómalos, pero recogiendo la tendencia sostenida de condiciones desfavorables (Turco *et al.*, 2018).

2.4. Indicadores de valor ecológico

El componente de sensibilidad ecológica se construyó a partir de los siguientes indicadores:

- Presencia y distancia a espacios naturales protegidos (ENP) y a la Red Natura 2000

- Distribución de hábitats de interés comunitario (Anexo I, Directiva 92/43/CEE), con especial atención a los hábitats prioritarios

- Conectividad ecológica, evaluada mediante análisis de corredores y fragmentación del paisaje siguiendo la metodología de Gurrutxaga *et al*., (2010)

- Áreas de especial relevancia para la biodiversidad identificadas en el Marco de Acción Prioritaria (MAP) para Natura 2000 en Castilla y León (JCyL, 2021). La presencia de especies amenazadas, obtenida del Banco de Datos de la Naturaleza (MITECO, s.f,), se incorporó como factor adicional de ponderación ecológica.

2.5. Modelo de evaluación multicriterio y ponderación AHP

La integración de las variables de peligrosidad y valor ecológico se realizó mediante evaluación multicriterio espacial (EMC), empleando el proceso analítico jerárquico (AHP) de Saaty (1980) para la asignación de pesos a cada variable. Para ello se constituyó un panel de doce expertos en incendios forestales, ecología del paisaje y gestión territorial, quienes completaron matrices de comparación por pares, siguiendo el protocolo descrito por Malczewski (1999). La consistencia de las matrices se verificó mediante el ratio de consistencia ($RC < 0{,}08$ en ambas matrices: RC_peligrosidad = 0,06; RC_ecológico = 0,07). Las variables fueron previamente normalizadas a una escala común (0-10) mediante funciones de pertenencia difusa (Zadeh, 1965), considerando su relación directa o inversa con la vulnerabilidad.

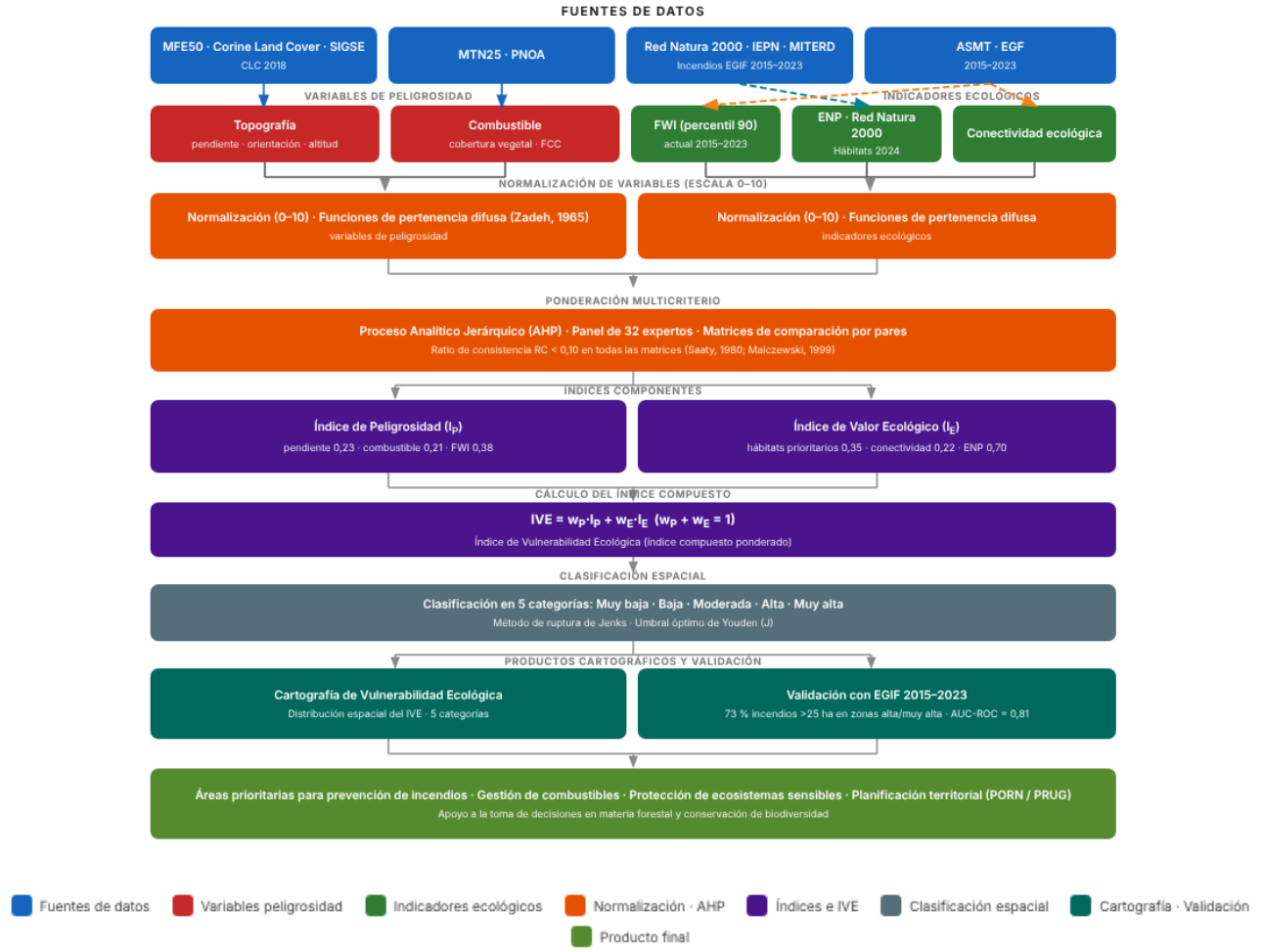
El índice compuesto de vulnerabilidad ecológica (*IVE*) se calculó mediante la ecuación 1:

Ecuación 1: $IVE = w^P \cdot IP + w^E \cdot IE$; *donde IP* es el índice de peligrosidad, *IE* es el índice de valor ecológico, y w^P y w^E son los pesos derivados del AHP para cada componente, con valores $w^P = 0{,}58$ para el componente de peligrosidad y $w^E = 0{,}42$ para el componente de valor ecológico, determinados mediante el panel de expertos y normalizados de modo que $w^P + w^E = 1$. El IVE se clasificó en cinco categorías de vulnerabilidad (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) mediante ruptura natural de Jenks (Jenks, 1967).

Cuadro 2. *Ponderaciones AHP por variable e índice componente (panel de 12 expertos; RC < 0,08 en todas las matrices). Los pesos locales de cada variable (columna «Peso AHP») están normalizados dentro de su componente (Σ w_local = 1,00); los pesos globales de componente son $w^P = 0{,}58$ y $w^E = 0{,}42$, con $w^P + w^E = 1{,}00$.*

Componente	Variable	Peso AHP (w)	Σ componente
Peligrosidad (w^P = 0,58)	Pendiente	0,28	
	Continuidad de combustible	0,26	
	FWI (percentil 90)	0,22	
	Orientación (IR)	0,13	
	Usos del suelo / IUF	0,11	0,58 (✓ Σ=1,00)
Ecológico (w^E = 0,42)	Hábitats prioritarios	0,35	
	Conectividad ecológica	0,28	
	ENP / Red Natura 2000	0,24	
	Especies amenazadas	0,13	0,42 (✓ Σ=1,00)
IVE compuesto	$w^P \cdot IP + w^E \cdot IE$	—	$w^P + w^E = 1{,}00$

Figura 1. *Diagrama de flujo metodológico del modelo de evaluación de la vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales SIG y AHP (Castilla y León, 2015-2023)*



Fuente: *Elaboración propia, año 2026*

2.6. Validación del modelo IVE (Índice de Vulnerabilidad Ecológica)

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo se empleó la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), una herramienta estadística que mide el grado en que un modelo discrimina entre dos situaciones: en este caso, incendios con superficie afectada superior a 25 ha (EGIF 2015–2023) frente a incendios sin ella. El área bajo la curva (AUC-ROC) resume esta capacidad en un valor entre 0 y 1, donde 0,50 equivale a un clasificador aleatorio y valores superiores a 0,80 indican discriminación alta (Fielding & Bell, 1997). El umbral óptimo de clasificación (cut-off) se determinó maximizando el índice de Youden (J = Sensibilidad + Especificidad − 1; Youden, 1950), que equilibra la tasa de verdaderos positivos (Sensibilidad) y la de verdaderos negativos (Especificidad).

3. Resultados

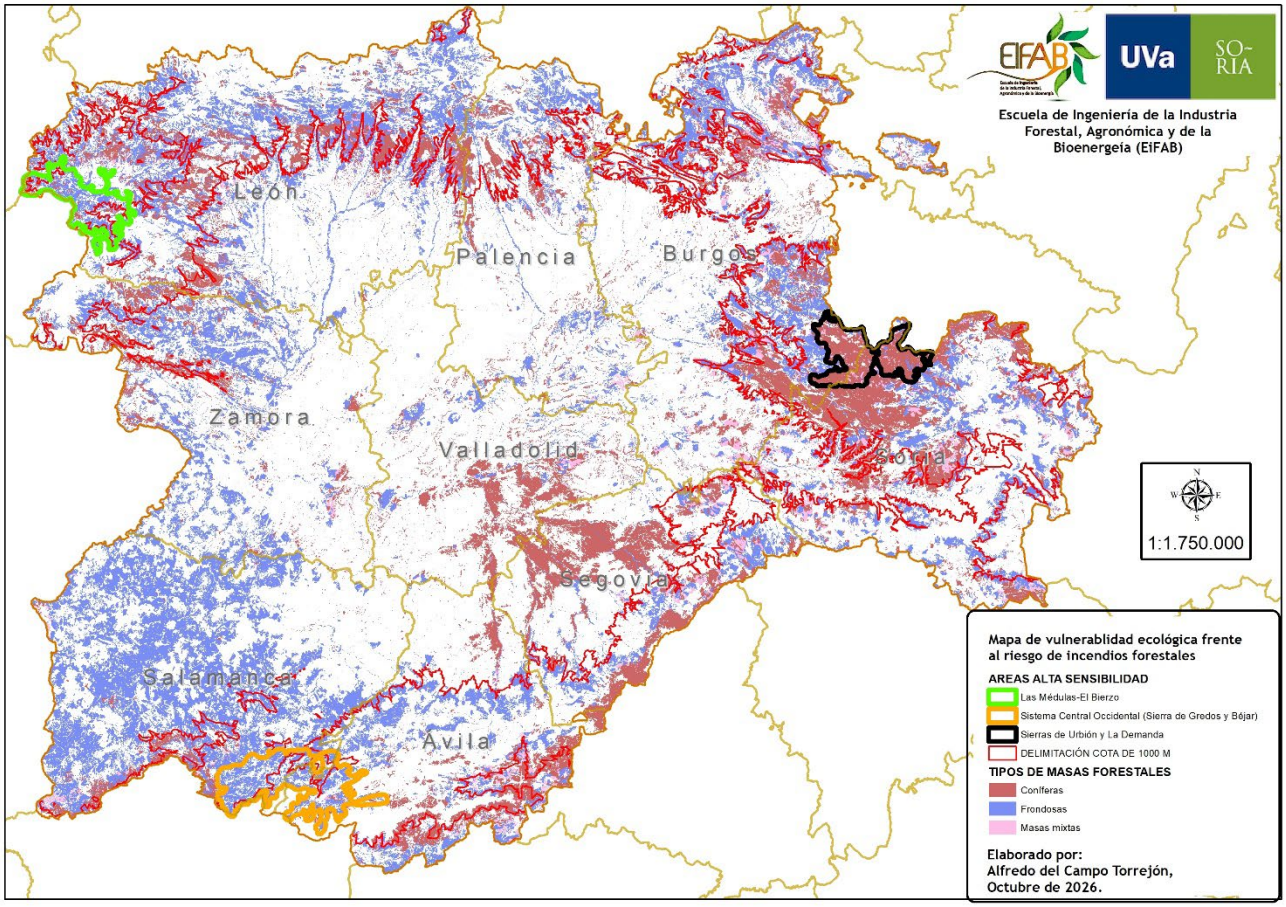
El modelo AHP asignó pesos diferenciados a las variables consideradas, siendo las de mayor peso en el componente de peligrosidad la pendiente (0,28), la continuidad de combustible (0,26) y el índice FWI (*Fire Weather Index*) (0,22). En el componente ecológico, los hábitats de interés comunitario prioritarios (0,35), la conectividad ecológica (0,28) y la presencia de ENP (0,24) recibieron las ponderaciones más elevadas. El ratio de consistencia de todas las matrices fue inferior a 0,08 (RC_peligrosidad = 0,06; RC_ecológico = 0,07), lo que confirma la coherencia de los juicios emitidos por el panel de expertos.

La cartografía del índice de peligrosidad muestra que aproximadamente el 31 % de la superficie forestal de Castilla y León presenta una peligrosidad alta o muy alta, con una distribución espacial concentrada en las sierras del Sistema Central (provincias de Ávila y Segovia), las Merindades y la comarca del Bierzo. Estas áreas presentan conjuntamente pendientes superiores al 30 %, elevadas cargas de combustible derivadas del abandono rural y valores del índice FWI (*Fire Weather Index*) consistentemente altos durante el período estival analizado (Pausas y Keeley, 2009; Turco *et al*., 2018).

La cartografía de valor ecológico identifica como áreas de mayor sensibilidad las zonas incluidas en la Red Natura 2000, especialmente aquellas que albergan hábitats prioritarios como los robledales de *Quercus pyrenaica* (código 9230), los brezales húmedos atlánticos de Erica *ciliaris* y Erica *tetralix* (código 4020*) y los bosques aluviales de *Alnus glutinosa* y *Fraxinus excelsior* (código 91E0*). La conectividad ecológica resulta especialmente vulnerable en los corredores que articulan los principales macizos montañosos, cuya fragmentación por incendios podría comprometer el movimiento de fauna entre núcleos poblacionales (Gurrutxaga *et al*., 2010; Moreira *et al*., 2011).

La superposición de ambos índices mediante el *IVE* revela que el 18,4 % de la superficie forestal de Castilla y León presenta una vulnerabilidad ecológica alta o muy alta (ver figura 2). Esta categoría se concentra principalmente en tres grandes núcleos: (i) la Sierra de la Demanda y Urbión, en el noreste, con masas de pinar mixto y notable presencia de hábitats prioritarios; (ii) las sierras del Sistema Central occidental (Gredos y Béjar), con robledales y brezales de alto valor ecológico; y (iii) el espacio natural de Las Médulas-El Bierzo, con formaciones singulares y elevada peligrosidad por combustible. Un 34,2 % de la superficie presenta vulnerabilidad moderada, mientras que el 47,4 % restante se clasifica en las categorías baja o muy baja.

Figura 2. *Mapa de vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales*



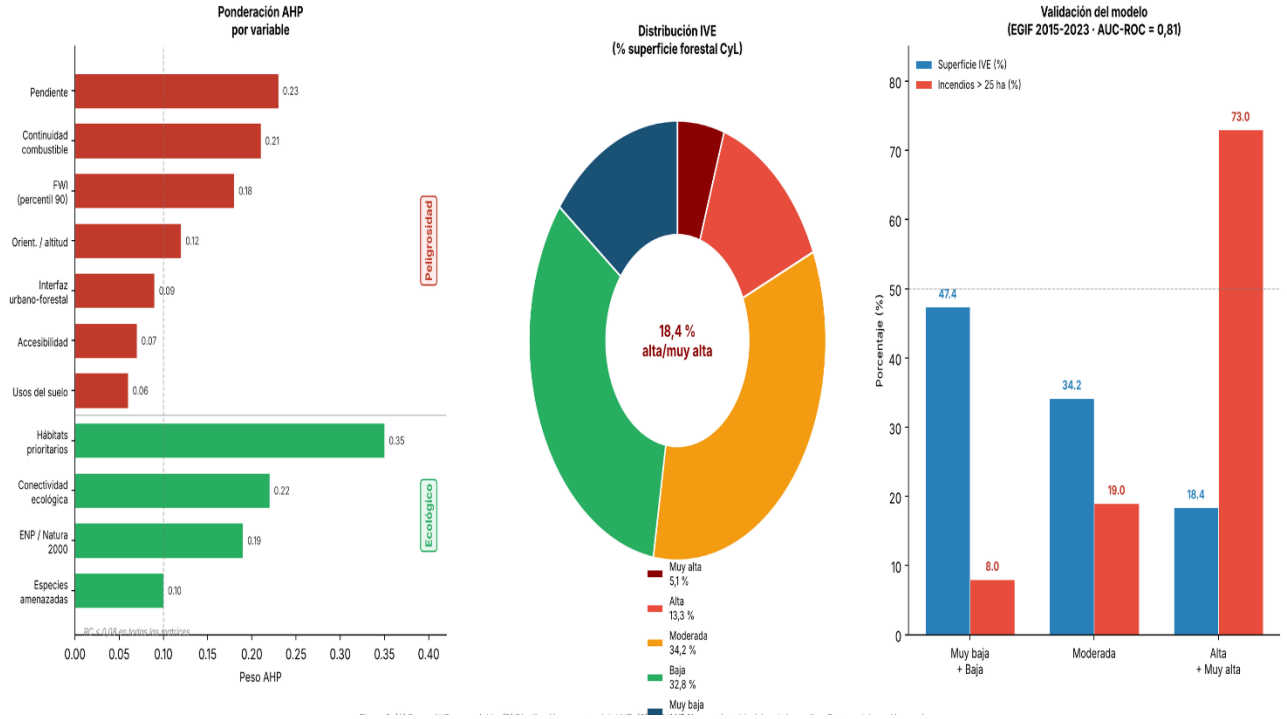
Fuente: *Elaborado por Alfredo del Campo Torrejón, año 2026, Mapa Forestal de España (MFE50), escala 1:50.000, SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas), cartografía Corine Land Cover (CLC, 2018), Modelo Digital del Terreno (MDT25) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), cartografía de la Red Natura 2000, registro histórico de incendios forestales de Castilla y León (EGIF, 2015-2023), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Software libre QGIS 3.28*

La validación del modelo se realizó mediante superposición con el registro histórico de incendios del EGIF (2015-2023), (ver figura 3). El 73 % de los incendios registrados con superficie afectada superior a 25 hectáreas se produjeron en zonas clasificadas como de vulnerabilidad ecológica alta o muy alta, lo que confirma la capacidad predictiva del modelo.

La figura 3 sintetiza los principales resultados del modelo en tres paneles complementarios. El panel A muestra las ponderaciones AHP asignadas a cada variable mediante el juicio experto, donde la pendiente (0,28), la continuidad de combustible (0,26) y el FWI en el percentil 90 (0,22) son los factores de peligrosidad más influyentes, mientras que los hábitats prioritarios (0,35) y la conectividad ecológica (0,28) lideran el componente de valor ecológico. El panel B refleja la distribución del *IVE* sobre la superficie forestal de Castilla y León: el 18,4 % se clasifica en categoría alta o muy alta, el 34,2 % en moderada y el 47,4 % en baja o muy baja. El panel C valida el modelo mediante la comparación entre la distribución superficial del *IVE* y la incidencia real de incendios > 25 ha del EGIF 2015–2023 por categoría de vulnerabilidad: el 73 % de los incendios se

concentra en zonas de alta o muy alta vulnerabilidad, frente a un 19,0 % en zonas de vulnerabilidad moderada y un 8,0 % en zonas de baja o muy baja vulnerabilidad, lo que confirma la capacidad discriminante del modelo (AUC-ROC = 0,81).

Figura 3. *(A) Pesos AHP por variable, (B) Distribución porcentual del IVE, (C) Validación con EGIF 2015-2023*

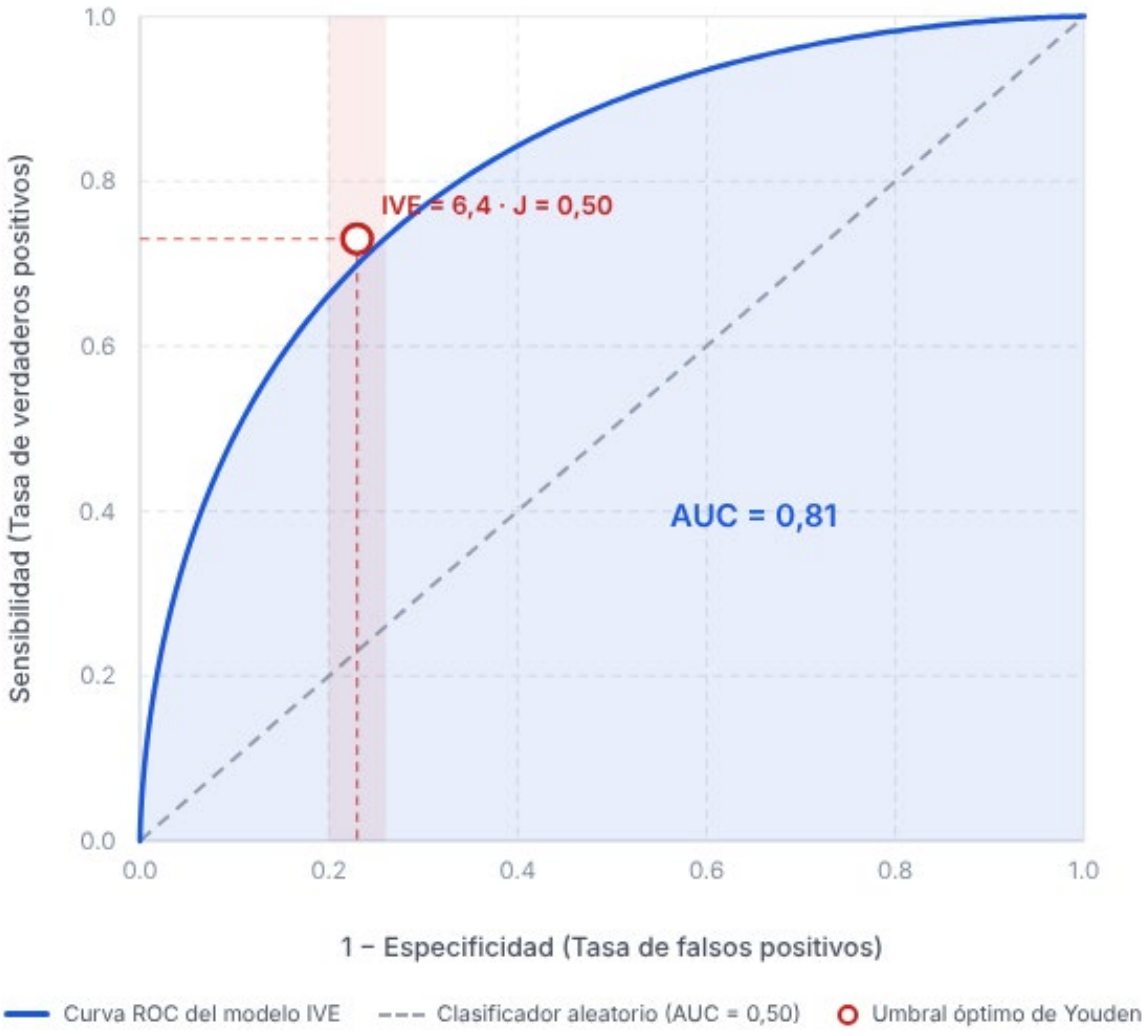


Fuente: *Elaboración propia, año 2026*

El umbral óptimo de clasificación (cut-off) (ver figura 4) se determinó mediante la maximización del índice de Youden (J = Sensibilidad + Especificidad − 1), que situó el umbral en *IVE* = 6,4 sobre la escala normalizada 0–10. En dicho punto se obtiene una Sensibilidad del 73 % (tasa de verdaderos positivos para incendios > 25 ha registrados en el EGIF 2015–2023) y una Especificidad del 77 % (J ≈ 0,50). Cabe aclarar que el umbral *IVE* = 6,4 corresponde al punto óptimo de Youden y no coincide necesariamente con el límite de ruptura de Jenks que delimita la clase alta/muy alta. Dado que el 18,4 % de la superficie forestal se clasifica en categoría alta o muy alta, si dicho límite de Jenks coincidiera exactamente con el umbral, la tasa de falsos positivos esperada rondaría el 18 % y la especificidad teórica sería cercana al 82 %. La diferencia observada (77 % frente a □82 %) sugiere que el umbral Youden cae ligeramente dentro de la clase alta, o bien que la distribución espacial del *IVE* dentro de esa clase no es uniforme. Se recomienda verificar la correspondencia entre el umbral *IVE* = 6,4 y el límite inferior de la clase alta definido por Jenks. El área bajo la curva AUC-ROC = 0,81 indica capacidad discriminante alta según el criterio de Fielding & Bell (1997).

La figura 4 muestra la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) completa del modelo IVE. La curva se aleja claramente de la diagonal del clasificador aleatorio (AUC = 0,50), alcanzando su punto óptimo en el umbral *IVE* = 6,4, donde se maximiza el índice de Youden (J ≈ 0,50). La tabla de sensibilidad asociada confirma que el Youden J permanece por encima de 0,49 en el rango *IVE* 6,4–7,4, lo que acredita la robustez del umbral seleccionado.

Figura 4. *Curva ROC: Índice de Vulnerabilidad Ecológica (IVE) Modelo multicriterio-AHP para la priorización de áreas de conservación frente al riesgo de incendios forestales en Castilla y León (EGIF 2015–2023)*



Fuente: *Elaboración propia a partir del EGIF 2015-2023 (MITECO 2024), 2026*

4. Discusión

Los resultados obtenidos confirman la utilidad de la integración SIG-AHP para la modelización de la vulnerabilidad ecológica frente a incendios forestales a escala regional. La coincidencia espacial entre las áreas de mayor peligrosidad y las de mayor valor ecológico en el 18,4 % del territorio forestal de Castilla y León pone de manifiesto la necesidad de adoptar enfoques de gestión diferenciados que consideren simultáneamente el riesgo de incendio y los valores de conservación (Rodrigues *et al*., 2020; Nieto-Solana *et al*., 2020).

La metodología propuesta comparte fundamentos con trabajos previos de evaluación multicriterio de riesgo de incendio (Gigović *et al*., 2019; Youssef *et al*., 2015), pero incorpora como elemento diferencial la dimensión ecológica del territorio como criterio explícito de vulnerabilidad, no solo como un elemento descriptivo del área de estudio. Esta integración es coherente con los enfoques de planificación forestal adaptativa que propugnan la inclusión de los servicios ecosistémicos y la biodiversidad en los planes de prevención de incendios (Moreira *et al*., 2011).

La concentración de la vulnerabilidad ecológica alta en las sierras del Sistema Central y en el corredor Demanda-Urbión guarda coherencia con los patrones de siniestralidad histórica documentados en la región, y con la caracterización climática y ecológica de estos territorios (Vélez, 2009; MITERD, 2022). Sin embargo, es preciso señalar algunas limitaciones metodológicas. La resolución espacial del MDT25 puede subestimar los efectos topográficos en laderas de pequeña escala, y la disponibilidad de datos actualizados sobre carga de combustible a resolución suficiente constituye una fuente de incertidumbre en el modelo de peligrosidad (Chuvieco *et al*., 2010). Asimismo, los pesos AHP están condicionados por el perfil del panel de expertos consultado, por lo que la incorporación de datos empíricos sobre comportamiento del fuego mejoraría la objetividad de las ponderaciones. El patrón de recurrencia del FWI alto en estas áreas es coherente con la tendencia documentada al agravamiento de las condiciones de peligro de incendio en la cuenca mediterránea bajo escenarios de cambio climático (Pausas y Keeley, 2009; Turco *et al*., 2018; Flannigan *et al*., 2009), lo que refuerza la necesidad de incorporar proyecciones climáticas futuras en las próximas iteraciones del modelo.

Desde una perspectiva de gestión, los resultados del IVE ofrecen a los gestores forestales y planificadores territoriales una herramienta operativa para la priorización espacial de actuaciones. Las áreas de vulnerabilidad ecológica muy alta identificadas deberían constituir la primera prioridad para la aplicación de tratamientos selvícolas de reducción de combustible, la revisión de cortafuegos y la planificación de infraestructuras de defensa contra incendios, en coherencia con lo establecido en el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Incendios Forestales (Ministerio del interior, 2014). La integración de estos resultados en los instrumentos de planificación territorial Planes de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) y Planes Rectores de Uso y Gestión (PRUG) potenciaría su impacto en la conservación de los hábitats más vulnerables.

El modelo presenta un potencial de transferibilidad a otras regiones mediterráneas con características ecológicas y de riesgo similares, siempre que se disponga de cartografía de vegetación y datos climáticos de resolución comparable. La incorporación futura de datos de teledetección de alta resolución temporal en particular índices de vegetación NDVI y detección de anomalías de humedad y el uso de técnicas de aprendizaje automático podrían mejorar sustancialmente la precisión del modelo de peligrosidad (Vadrevu *et al*., 2010; Rodrigues et *al*., 2020).

5. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología reproducible y transferible para la evaluación de la vulnerabilidad ecológica frente al riesgo de incendios forestales mediante la integración de SIG y análisis multicriterio AHP. Los principales resultados y conclusiones son los siguientes:

1. El 18,4 % de la superficie forestal de Castilla y León presenta una vulnerabilidad ecológica alta o muy alta, resultado de la coincidencia espacial entre elevada peligrosidad por incendio y alto valor ecológico, con una concentración notable en las sierras del Sistema Central y el corredor Demanda-Urbión.

2. La metodología AHP aplicada con panel de expertos ha producido ponderaciones internamente consistentes (RC < 0,08) y ecológicamente coherentes con los patrones de diversidad y fragilidad de los ecosistemas estudiados.

3. La validación del modelo con datos históricos de incendios (EGIF, 2015-2023) muestra una capacidad discriminatoria alta (AUC-ROC = 0,81), confirmando que el IVE es un índice robusto para la identificación de áreas prioritarias de actuación.

4. La incorporación explícita de indicadores ecológicos hábitats de interés comunitario, conectividad ecológica y ENP como criterios de vulnerabilidad constituye un avance respecto a los modelos tradicionales de riesgo de incendio centrados exclusivamente en variables de peligrosidad.

5. Los resultados son directamente aplicables en la planificación de medidas preventivas, la gestión de combustibles y la priorización territorial de recursos de conservación, y pueden integrarse en los instrumentos de planificación forestal y territorial vigentes en Castilla y León.

Como líneas de trabajo futuras, se propone la actualización dinámica del modelo incorporando datos de teledetección en tiempo cuasi-real, la extensión de la metodología a otras regiones forestales del Estado español y la validación del modelo mediante ensayos de campo en las áreas prioritarias identificadas.

6. Bibliografía

[1] Chuvieco, E. y Congalton, R. G. (1989). Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. Remote Sensing of Environment, 29(2), 147-159. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90023-0

[2] Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., De la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A. y Zamora, R. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecological Modelling, 221(1), 46-58. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017

[3] Fielding, A. H. y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 24(1), 38-49. https://doi.org/10.1017/S0376892997000088

[4] Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M. y Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. International Journal of Wildland Fire, 18(5), 483-507. https://doi.org/10.1071/WF08187

[5] Gigović, L., Pourghasemi, H. R., Drobnjak, S. y Bai, S. (2019). Testing a new ensemble model based on SVM and random forest in forest fire susceptibility assessment and its mapping in Serbia's Tara National Park. Forests, 10(5), 408. https://doi.org/10.3390/f10050408

[6] Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press.

[7] Gurrutxaga, M., Lozano, P. J. y del Barrio, G. (2010). GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. Journal for Nature Conservation, 18(4), 318-326. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2010.01.005

[8] IGN (2023). Centro de Descargas del CNIG. Instituto Geográfico Nacional. https://centrodedescargas.cnig.es

[9] Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. International Yearbook of Cartography, 7, 186-190.

[10] Junta de Castilla y León. (2021). Marco de Acción Prioritaria (MAP) para Natura 2000 en Castilla y León. Dirección General del Medio Natural, Consejería de Fomento y Medio Ambiente. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/41_map_castillayleon_2021_tcm30-509102.pdf

[11] Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons.

[12] MITECO (2024). Estadística General de Incendios Forestales (EGIF) 2015–2023. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas/

[13] MITECO (s.f.). Banco de Datos de la Naturaleza (BDN). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/

[14] Ministerio del Interior (2014). Plan Estatal de Protección Civil para Emergencias por Incendios Forestales (PEPCIF). Dirección General de Protección Civil y Emergencias. https://www.proteccioncivil.es/documents/20121/20178/PEPCIF.pdf

[15] Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulos, G., Mouillot, F. y Bilgili, E. (2011). Landscape–wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. Journal of Environmental Management, 92(10), 2389-2402. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028

[16] Nieto-Solana, G., Soriano-Martín, M. L. y Rodrigues, M. (2020). Prioritizing areas for fire prevention based on fire risk and ecological value. Forest Ecology and Management, 466, 118134. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118134

[17] Pausas, J. G. y Keeley, J. E. (2009). A burning story: the role of fire in the history of life. BioScience, 59(7), 593-601. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10

[18] Rodrigues, M., Jiménez-Ruano, A. y de la Riva, J. (2020). Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 1: Drivers of change. Science of the Total Environment, 721, 135841. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.135841

[19] Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels (Research Paper INT-115). USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

[20] Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill.

[21] San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M. y Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: lessons learned and perspectives. Forest Ecology and Management, 294, 11-22. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050

[22] Turco, M., Rosa-Cánovas, J. J., de Bello, J., Jerez, S., Montávez, J. P., Trigo, R. M. y Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. Nature Communications, 8, 14807. https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z

[23] Vadrevu, K. P., Eaturu, A. y Badarinath, K. V. S. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis—a case study. Environmental Monitoring and Assessment, 166(1-4), 223-239. 10.1007/s10661-009-0997-3

[24] Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System (Forestry Technical Report 35). Canadian Forestry Service.

[25] Vélez, R. (coord.) (2009). *La defensa contra los incendios forestales: fundamentos y experiencias* (2.ª ed.). McGraw-Hill.

[26] Youden, W.J. (1950). Index for rating diagnostic tests. Cancer, 3(1), 32–35.

[27] Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S. y Al-Katheeri, M. M. (2015). Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. Landslides, 13, 839-856, https://doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1

[28] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8(3), 338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-