

9CFE-1563



Gestión sinérgica de la prevención de incendios forestales en entornos de yacimientos arqueológicos mediante teledetección y simulación de incendios forestales.

ALONSO, L. (1,2), PICOS, J.(1), RINCÓN, T. (1), SOLARES-CANAL, A. (1,2), D. MOLINA-TERRÉN (3), ARMESTO, J. (1,2)

(1) Escola de Enxeñaría Forestal, Universidade de Vigo.

(2) Grupo Xestión Segura e sostible de Recursos Minerais (XESSMin), CINTECX, Universidade de Vigo

(3) Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agraria, Universidad de Lleida, Alcalde Rovira Roure 191, 25198 Lleida, España.

Resumen

Los incendios forestales constituyen uno de los principales riesgos para la conservación de los recursos culturales, naturales y económicos del planeta. Este trabajo aborda la gestión sinérgica de la prevención de incendios forestales en entornos de yacimientos arqueológicos mediante soluciones multisensor a diferentes escalas. Se ha llevado a cabo la identificación de aquellas áreas arqueológicas cuya gestión puede ser útil en la prevención de incendios forestales, la protección de los yacimientos, la mejora de la seguridad de los visitantes y el incremento de la resistencia del medio frente a esta amenaza. Se ha desarrollado una metodología para la caracterización de los combustibles forestales en áreas de paleointerfaz mediante la integración de sistemas multiespectrales satelitales y sistemas LiDAR aéreo. Se sistematizó el análisis del comportamiento de los incendios en el territorio en condiciones actuales. Se recrearon actuaciones de gestión de la vegetación en el entorno de áreas arqueológicas dirigidas a disminuir la carga de biomasa disponible para arder. Se identificó la ganancia en términos de disminución de intensidad de incendios y mejora en la capacidad de extinción, entre otros aspectos. Los resultados pueden ayudar a la gestión integrada de la prevención de incendios forestales y patrimonio cultural.

Palabras clave

Áreas estratégicas de gestión, patrimonio cultural, Sentinel-2, LiDAR.

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen uno de los principales riesgos para la conservación de los recursos culturales, naturales y económicos del planeta. Se espera que los regímenes de incendios forestales se intensifiquen en los próximos años en términos de frecuencia, gravedad y área quemada, lo que conducirá a un número cada vez mayor de eventos extremos de incendios forestales (SAYEDI et al. 2024; RODRIGUES et al. 2023). En este tipo de incendios forestales, los equipos de extinción de incendios han manifestado dificultades operativas, debido a comportamientos extremos del fuego y simultaneidad de eventos (CASTELLNOU et al. 2019; MOLINA-TERRÉN et al. 2019). Por ello es necesario renovar los enfoques tradicionales de gestión de incendios forestales (McWETHY et al. 2019; ROMERO-VIVÓ et al. 2019; QUÍLEZ et al. 2020). Ante esta necesidad, en España nace el concepto de las áreas estratégicas de gestión (AEG) (ROMERO-VIVÓ et al. 2019). Estos son “Áreas del territorio definidas y priorizadas de acuerdo a una



metodología concreta que, teniendo en cuenta el riesgo de incendio, el comportamiento del fuego en la zona de estudio y vulnerabilidad de sus valores naturales, rurales o urbanos a proteger, permita establecer y optimizar una planificación espacio-temporal de combustibles e infraestructuras que limite la potencialidad del incendio, detectando oportunidades de extinción y anticipando una estrategia de defensa eficaz y segura para grandes incendios forestales tipo para los que se ha diseñado” (ROMERO-VIVÓ et al. 2019).

Así mismo los incendios forestales son uno de los peligros más prevalentes a los que están expuestos los yacimientos arqueológicos (ICOMOS 2019, UNESCO 2016). En la literatura científica y técnica de todo el mundo se han reportado numerosos casos de daños a sitios arqueológicos producidos por incendios forestales. Algunos ejemplos se presentan en RYAN et al. (2012) para Estados Unidos y en PICKRELL (2020) para Australia. En España, POZO-ANTONIO et al. (2018) y POZO-ANTONIO et al. (2020) encontraron daños sobre petroglifos de granito expuestos a incendios forestales. Los efectos del fuego sobre los sitios arqueológicos pueden consistir en la fractura de artefactos de piedra o manchado de imágenes rupestres o geoglifos, entre otros (ICOMOS, 2019). Por ello, es fundamental desarrollar estrategias para proteger el patrimonio cultural de los incendios forestales (UNESCO, 2024). El proyecto de investigación PALEOINTERFAZ, ref PID2019-111581RBI00, financiado por la convocatoria Retos 2019 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, abordó la gestión de las áreas arqueológicas desde una perspectiva integrada con la prevención de incendios forestales a escala paisaje. En particular el proyecto se focalizó en la comarca pontevedresa del Baixo Miño. En esta comarca muchos de los elementos arqueológicos catalogados están rodeados de vegetación arbórea densa y matorral (SOLRES-CANAL et al. 2022), por lo que están ampliamente expuestos la amenaza de los incendios forestales. Por otro lado, se observó que están generalmente localizados en cumbres (SOLARES-CANAL et al. 2022). Estas posiciones topográficas tienden a generar oportunidades de extinción para los equipos de lucha contra incendios forestales cuando su vegetación está adecuadamente gestionada. Por ello la gestión del área circundante a estos elementos, a partir de ahora paleointerfaz, puede ser muy interesantes desde el punto de vista de la definición de AEG. Estas AEG podrían servir tanto para proteger el patrimonio cultural de los incendios forestales como para la protección del territorio en el que se sitúan.

La simulación de incendios forestales es una de las herramientas básicas de la detección de AEG (ROMERO-VIVÓ et al. 2019). Esta herramienta permite conocer el comportamiento del fuego en el territorio, así como conocer los nodos de propagación de los incendios forestales, elementos útiles para la definición de las AEG (QUÍLEZ 2020; ROMERO-VIVÓ et al. 2019). Estos último son aquellas áreas donde se acumulan los MTT (minimun travel time) (FINNEY 2002) considerando diferentes escenarios meteorológicos de incendio y múltiples puntos de ignición. Los datos de entrada de los softwares de simulación incluyen principalmente las condiciones meteorológicas, la información topográfica y mapas de modelos de combustible. Es necesario que esta información sea lo más precisa, detallada y actualizada posible. En este sentido cabe destacar que a la hora de realizar el proyecto la información sobre combustibles disponible para el área de estudio era aquella presente en el mapa forestal español (MITERD 2011). Este mapa tiene una unidad mínima de cartografiado de 1 ha (0.5 ha para bosques de ribera) y su año de publicación fue el 2011 (MITERD 2011). Para poder realizar simulaciones relevantes en el área de estudio es preciso actualizar este mapa y aumentar su

resolución. Especialmente si consideramos que el área de estudio se encuentra en Galicia dónde la vegetación tiene altas tasas de crecimiento (ARELLANO et al. 2020) y de cambio debido a aprovechamientos forestales e incendios (XUNTA DE GALICIA 2020; XUNTA DE GALICIA 2022). La teledetección supone una herramienta extraordinaria para ello (GALE et al. 2021) y por esta razón juega un papel muy importante en el proyecto PALEOINTERFAZ.

2. Objetivos

Este trabajo aborda la gestión sinérgica de la protección de elementos arqueológicos frente a los incendios forestales y la gestión de incendios forestales a escala territorial. Se ha llevado a cabo el mapeo de combustibles en el entorno de las áreas arqueológicas, la identificación del comportamiento del fuego en las mismas y la identificación de aquellas áreas arqueológicas con potencialidad para funcionar como AEG. Finalmente se ha analizado el efecto de la gestión de la vegetación en estas áreas de cara a la protección de los yacimientos arqueológicos y del territorio frente al fuego.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

La Figura 1 muestra el área de estudio seleccionada que se corresponde con casi la totalidad de la comarca del Baixo Miño (a excepción de una zona Este dónde no se tenía disponibilidad de vuelo LiDAR), situada en la provincia de Pontevedra (Galicia). Esta tiene una superficie de 365 km². La zona cuenta con un total de 2013 elementos patrimoniales culturales. De ellos, 692 se encuentran situados en superficie forestal. Se trata de elementos arqueológicos graníticos, mayoritariamente petroglifos y túmulos funerarios. La dimensión de los elementos que componen cada yacimiento es variable (desde pocos metros cuadrados a decenas de metros cuadrados), así como la superficie del conjunto.

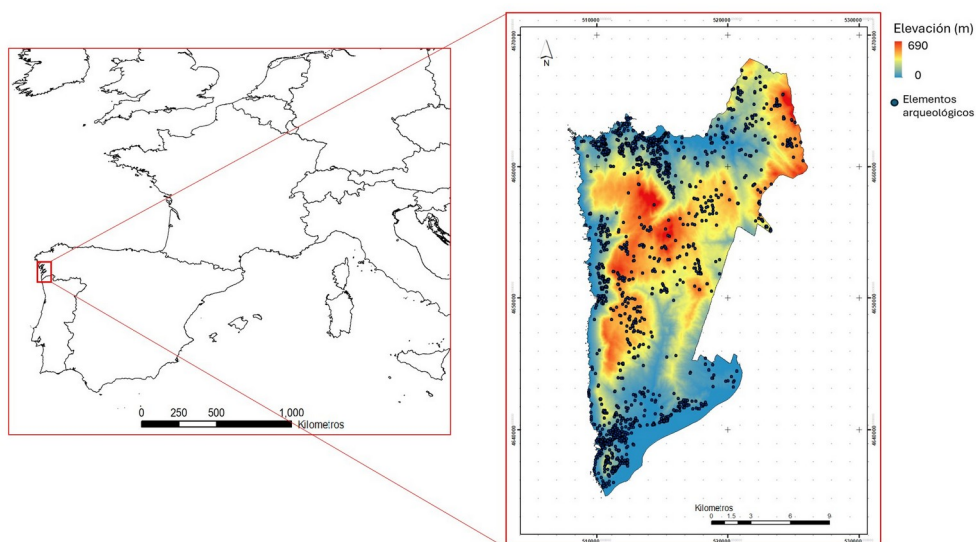


Figura 1. Área de estudio.

3.2. Materiales y software

- Sentinel-2: serie temporal de imágenes del satélite Sentinel-2 del año 2019. Se utilizaron un total de 12 imágenes, una imagen por mes. Para cada mes se seleccionó la imagen con menor nubosidad, con la consideración de que ninguna imagen debía tener una nubosidad superior al 50%. Las imágenes

se descargaron del Centro de Acceso Abierto de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>).

- LiDAR aéreo: Los datos LiDAR fueron adquiridos en noviembre de 2019. Las nubes de puntos tienen una resolución espacial media de 7,2 puntos/m².
- MDT: Se utilizó un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 5 m de resolución. Este fue obtenido del Instituto Geográfico Nacional de España (IDEE 2024).
- Datos meteorológicos: Los datos meteorológicos históricos se obtuvieron de la estación de Eiras (término municipal de O Rosal, Pontevedra), que se encuentra dentro del área de estudio (METEGOALICIA 2024). Para este estudio se descargaron la temperatura máxima, la humedad relativa mínima, la velocidad del viento predominante, la velocidad de las ráfagas de viento, la dirección del viento predominante y la dirección de las ráfagas de viento para los meses de junio, julio, agosto y septiembre para los años 2011 -2021.
- Software de simulación: el software Wildfire Analyst (Technosylva, 2014) fue el software utilizado.

3.3. Mapeado de modelos de combustible

El mapa de modelos de combustible de la totalidad del área de estudio se realizó a partir de imágenes Sentinel-2 y nubes de puntos LiDAR aéreas. Se diseñó un flujo de procesos para identificar el modelo de combustible Rothermel (ANDERSON 1982) en cada pixel del área de estudio. El mapeado de combustibles sigue la metodología descrita por SOLARES-CANAL et al. (2023), diseñada específicamente para el mapeo de modelos de combustibles en zonas de vegetación Atlántica.

El primer paso consistió en realizar un mapa de cobertura del suelo a partir de las imágenes Sentinel-2. La leyenda de mapa fue la siguiente: Eucalipto, Coníferas, Otras Frondosas, Cultivos y pastos, Matorrales, Áreas rocosas, Antrópico y Agua. El mapa se realizó siguiendo la metodología descrita en ALONSO et al. (2021). El siguiente paso consistió en realizar la caracterización estructural de la vegetación mediante el procesamiento de los datos LiDAR. Para ello se normalizaron las nubes de puntos y se obtuvo un mapa de alturas de vegetación o modelo de altura de copas (CHM) de 5 m de resolución espacial. Se obtuvieron también una serie de métricas derivadas de la nube de puntos, concretamente: altura máxima, media, desviación estándar, asimetría, curtosis, entropía, porcentaje de retornos por encima de la media, porcentaje de retornos por encima de 2 m, percentiles y porcentaje acumulado de retornos en diferentes capas (según WOODS et al. 2008). Todas ellas fueron obtenidas en una malla ráster de resolución espacial 5 m. Estas estadísticas fueron utilizadas para segregar las áreas con continuidad y discontinuidad en la distribución vertical de los puntos de la nube mediante una clasificación “random forest”. Todo el procesamiento LiDAR se realizó utilizando el paquete “lidR” del software R (ROUSSEL & AUTY 2021). La combinación de coberturas y estructuras de vegetación según se describe en la Tabla 1 permitió mapear los modelos de combustible del área de estudio. El mapa final tiene una resolución espacial de 5 m.

Tabla 1. Relaciones entre modelos de combustible de Rothermel y variables de teledetección.

Modelo Rothermel	Sentinel-2	LiDAR
1	Zonas rocosas	-
2	Cultivos y pastos	-
4	Matorral	CHM > 1 m
5	Matorral	CHM < 1 m
7	Eucalipto o Coníferas u Otras Frondosas	Continuidad vertical
10	Eucalipto o Coníferas u Otras Frondosas	Discontinuidad vertical
12	Eucalipto o Coníferas u Otras Frondosas	CHM < 1 m

3.4. Exposición al fuego de áreas de paleointerfaz

La evaluación de la exposición al fuego de las áreas de paleointerfaz se realizó mediante la simulación sistemática de incendios forestales en el territorio. Para ello se simularon un total de 355 puntos de inicio situados de forma sistemática en el territorio mediante una malla de 1 km. Estos puntos de inicio se simularon en un total de 8 escenarios meteorológicos diferentes. Los escenarios meteorológicos se seleccionaron en base a los datos meteorológicos históricos. Se seleccionaron un total de 4 escenarios típicos (condiciones meteorológicas comunes) y 4 escenarios atípicos (condiciones meteorológicas extremas alcanzadas puntualmente en el área de estudio). La Tabla 2 presenta los escenarios seleccionados.

Tabla 2. Escenarios meteorológicos seleccionados. DV: dirección del viento, VV: Velocidad del viento, T: temperatura, HR: humedad relativa.

Condición	Escenario meteorológico	DV (°)	VV (km/h)	T (°C)	HR (%)
Típica	I	180 (S)	12,5	25	64,9
II	45 (NE)	11,7	28,0		53,1
III	315 (NO)	12,4	31,0		53,1
IV	225 (SW)	12,4	28,0		63,0
Atípica	V	180 (S)	58,8	35,7	24,0
VI	45 (NE)	46,0	38,9		21,0
VII	315 (NO)	54,7	41,5		14,0
VIII	225 (SW)	35,4	34,7		62,0

Las simulaciones de incendio se llevaron a cabo individualmente para cada punto de ignición y para cada escenario meteorológico. Todas las simulaciones se inicializaron a las 13:00 horas (tiempo de detección de ignición) y se ejecutaron permitiendo ocho horas de tiempo de propagación sin acciones de extinción de incendios. Se consideró que los valores meteorológicos permanecían constantes a lo largo de este período de propagación de ocho horas. Las simulaciones se

ejecutaron con una celda de 33 m, el tamaño por defecto de simulación del software. Disminuir el tamaño supone incrementar el tiempo de cómputo y dado el elevado número de simulaciones a realizar se decidió dejar en el valor por defecto.

Los resultados de las simulaciones individuales incluyen mapas de velocidad de propagación, intensidad y la longitud de llama para todo el territorio. Los mapas obtenidos para los escenarios típicos se agregaron para obtener un mapa único de cada variable. Para ello, para cada uno de los 4 escenarios meteorológicos típicos, entre todos los valores de esa variable generados para cada píxel a lo largo de las simulaciones individuales se seleccionó el valor máximo. Esto da lugar a 1 raster por escenario meteorológico y por variable. A continuación, las cuatro capas correspondientes a las condiciones meteorológicas típicas de una variable se promediaron para obtener el raster final de esa variable correspondiente a las condiciones meteorológicas típicas. Se hizo lo mismo para los escenarios atípicos.

Los resultados se analizaron en las áreas de paleointerfaz. Para ello se realizó un buffer de 100 m alrededor de todos los elementos arqueológicos presentes en el área de estudio. El análisis se realizó sobre agrupaciones de elementos en lugar de sobre elementos individuales analizando los valores de las variables dentro de las áreas de buffer.

3.5. Detección de AEG

Para cada simulación, punto de ignición y escenario meteorológico, se obtuvo un raster de MTT (mínimum travel time). Los rasters correspondientes a los escenarios típicos se sumaron siguiendo el protocolo descrito en QUÍLEZ et al. (2020). El resultado es un único raster, cuyos niveles digitales máximos corresponden a nodos de propagación del fuego. Este raster se analizó juntamente con las áreas de paleointerfaz (áreas de buffer de 100 m alrededor de los elementos arqueológicos). Se definió que aquellas áreas de paleointerfaz que estuvieran cerca de nodos de propagación podrían servir como AEG. Se siguió el mismo procedimiento para los escenarios atípicos.

3.6. Medidas de gestión de la vegetación en AEG

En este apartado se realizaron modificaciones virtuales de la vegetación en las AEG seleccionadas para comprender como la gestión preventiva en las AEG ayuda a modificar el comportamiento del fuego y por lo tanto ayuda a proteger el patrimonio arqueológico a la vez que genera oportunidades de extinción para los equipos de emergencia. Para ello se modificó el mapa de combustibles original. Las áreas ocupadas con modelo de combustible 4 se reemplazaron por combustible 5, lo cual resultaría de realizar desbroce de matorral rebajando la altura de los arbustos de más de 1 m a menos de 1 m. Las áreas ocupadas con modelos de combustible 7 y 10 se reemplazaron por combustible 9. Este modelo se caracteriza por áreas de árboles adultos o jóvenes sin continuidad vertical, con poco o ningún sotobosque excepto por la hojarasca producida por los árboles adultos. La conversión a este modelo resultaría de eliminar la vegetación arbustiva bajo el dosel arbóreo. Las simulaciones de incendios se ejecutaron nuevamente tomando el mapa de combustibles obtenido tras las modificaciones descritas. Las variables del fuego se compararon pre y post tratamiento. Esto ayuda a comprender el comportamiento del fuego junto con la capacidad de extinción.

4. Resultados

4.1. Mapa de modelo de combustibles

El mapa de combustibles (5 m de resolución) correspondiente a las áreas de

PALEOINTERFAZ se muestra en la Figura 2. La Tabla 3 muestra la superficie ocupada por cada uno de los combustibles considerados en términos absolutos (hectáreas) y relativos (%). Estos resultados muestran que la mayor parte de la superficie en torno a los yacimientos arqueológicos está ocupada por combustibles con comportamientos desfavorables frente al fuego como cultivos y pastos (27,0%), arbolado con continuidad vertical (23,9%) y matorral alto (10,2%).

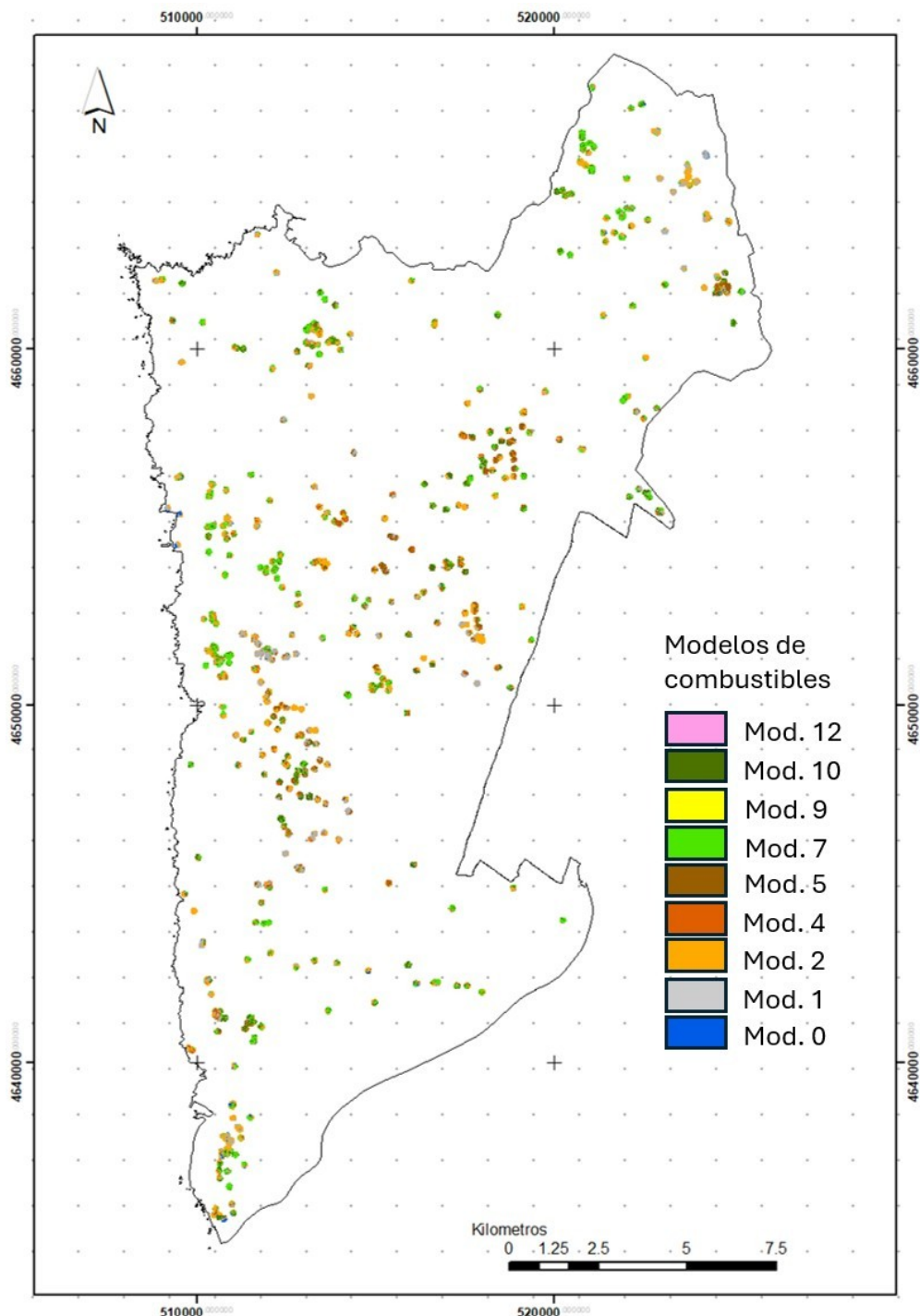


Figura 2. Modelos de combustible en áreas de paleointerfaz.

Tabla 3. Superficie ocupada por los modelos de combustible en áreas de paleointerfaz del área de estudio.

Modelo de combustible	Superficie (ha)	Superficie (%)
15,4	1	
1	180,7	14
2	353,0	27
4	139,9	11
5	90,3	7
7	322,9	24
10	197,8	15
12	18,9	1
TOTAL	1.318,9	100

4.2. Análisis del comportamiento del fuego

Las variables velocidad de propagación, intensidad y longitud de llama se obtuvieron de forma individual y agregada para toda el área de estudio. El resultado de intersectar las respectivas capas agregadas con las áreas de paleointerfaz se muestra en las figuras 3 y 4, condiciones meteorológicas típicas y atípicas respectivamente.

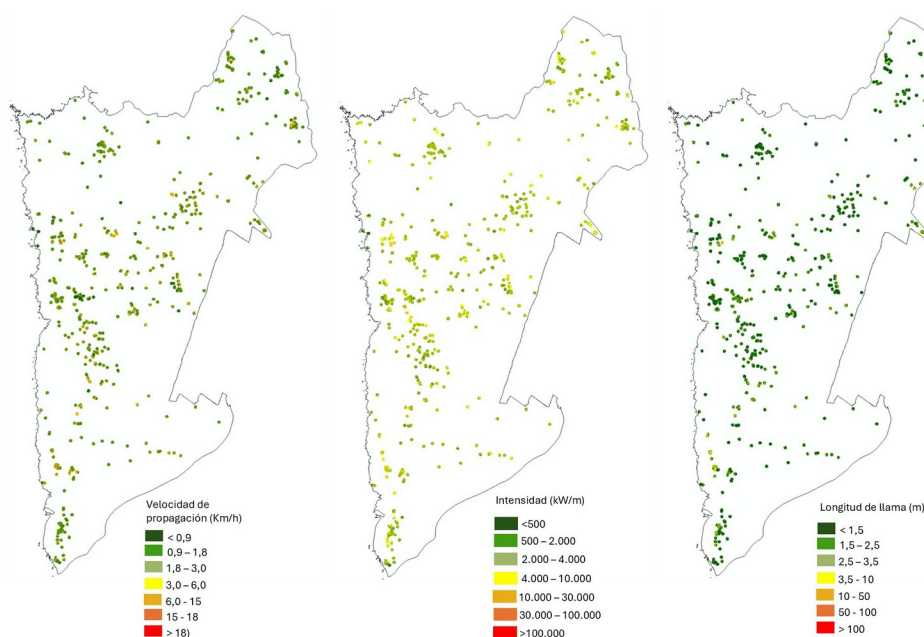


Figura 3. Variables descriptivas del comportamiento de incendios en áreas de paleointerfaz en condiciones meteorológicas típicas.

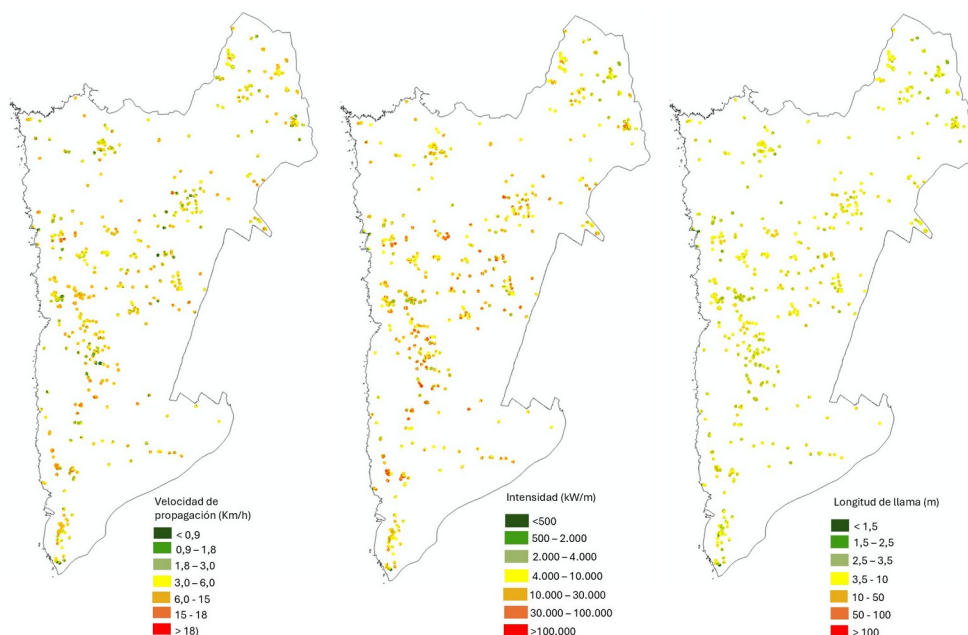


Figura 4. Variables descriptivas del comportamiento de incendios en áreas de paleointerfaz en condiciones meteorológicas atípicas.

Las condiciones meteorológicas atípicas analizadas conducen a valores notablemente más altos que las condiciones típicas en todas las variables estudiadas. Los mapas agregados muestran que el comportamiento del fuego alcanza valores extremos de velocidad de propagación (por encima de 6 km/h), intensidad (por encima de 10.000 kW/m) y/o longitud de llama (superior a 10 m) en casi todas las áreas de paleointerfaz analizadas, concretamente en el 98%, 97% y 94% de las áreas de paleointerfaz respectivamente. Por encima de los valores umbral se considera que están fuera de capacidad de extinción.

En condiciones típicas los valores extremos umbral de velocidad, intensidad y longitud de llama se superan en el 4%, 94% y 94% de las agrupaciones arqueológicas. El análisis individual de las mismas muestra que en algunos casos los valores extremos de intensidad afectan a más del 50% de la superficie de la agrupación.

4.3. Detección de AEG

La figura 5 muestra los máximos locales detectados en los caminos del fuego en el área de estudio. Las áreas de paleointerfaz se muestran superpuestas. El análisis conjunto muestra que 28 agrupaciones se encuentran en nodos de propagación de incendios, 17 correspondientes a escenarios típicos y 11 a escenarios atípicos.

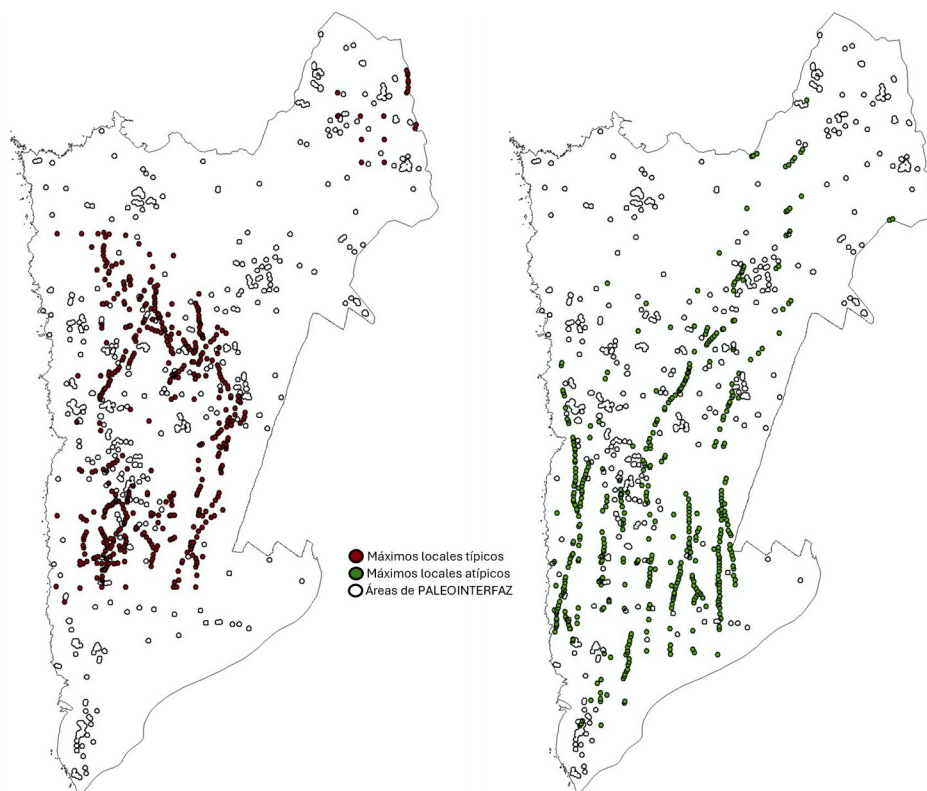


Figura 5. Máximos locales en caminos del fuego y áreas de paelointerfaz en condiciones meteorológicas típicas (izquierda) y atípicas (derecha).

4.4. Identificación de beneficios de la gestión de la vegetación en las AEG

Las medidas establecidas para la gestión preventiva de la vegetación se aplicaron total o parcialmente en las áreas de paleointerfaz seleccionadas como AEG. Tras la realización de las simulaciones y agregación de resultados de cada uno de los incendios simulados individualmente, el análisis comparado de las variables del fuego antes y después de la modificación de los combustibles se realiza individualmente en cada área de paleointerfaz. La figura 6 muestra un ejemplo de la transformación de los combustibles en una agrupación arqueológica situada en el municipio de Oia, Pontevedra. Como puede observarse, el mapa de modelos de combustibles derivado de la gestión de la vegetación carece de modelos 4, 7 y 10 en toda el área.

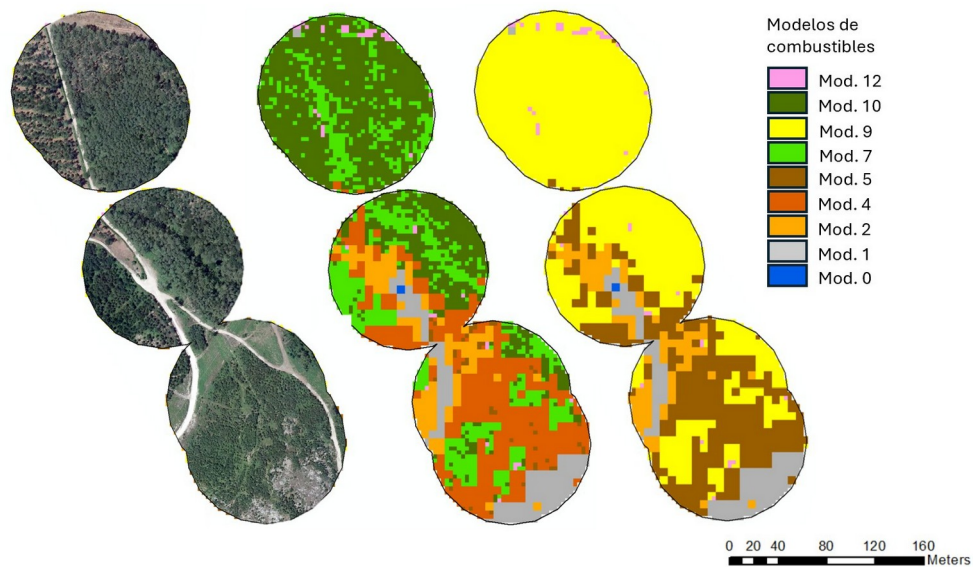
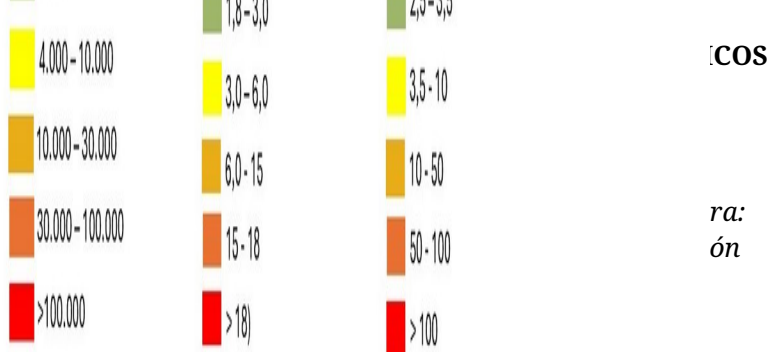


Figura 6. Ejemplos de áreas de paleointerfaz en Oia, Pontevedra: ortofotografía PNOA 2020 (izquierda), mapa de modelos de combustibles original (centro), mapa de modelos de combustibles modificados (derecha).

La Figura 7 muestra las variables del fuego antes y después de la modificación de los combustibles en el AEG de ejemplo. Los mapas agregados revelan que la ganancia en condiciones atípicas es muy notable. Solo se superan valores extremos de intensidad, velocidad o longitud de llama en el extremo noroeste de la agrupación. El resto de los píxeles tienen valores intermedios o bajos. En condiciones típicas la ganancia principal se aprecia en la variable longitud de llama; tras la modificación de combustibles la mayor parte de los píxeles en el área se encuentran en las dos categorías más bajas de la leyenda.





Este proyecto permitió abordar la identificación de combustibles a partir de datos Sentinel-2 y LiDAR aéreo y la generación de mapas detallados y actualizados. Este mapeado es relevante en el contexto de Galicia ya que, aunque existen trabajos previos que pretenden mapear los modelos de combustibles mediante teledetección, la mayoría de ellos se centran en ecosistemas Mediterráneos y no en ecosistemas Atlánticos como es la zona de estudio. Estos tienen tipologías de vegetación específicas y requieren metodologías adaptadas a las mismas (GALE et al. 2021). Además, la alta resolución del mapa lo hace especialmente adecuado para Galicia dado el elevado grado de fragmentación de masas que caracteriza el medio forestal gallego (RODRÍGUEZ-DORNA et al., 2023).

El análisis detallado del mapa obtenido en las áreas de paleointerfaz revela que un alto porcentaje de estas áreas están cubiertas con modelos de vegetación 4 y 7 (34,1%). Estos modelos tienden a generar condiciones de extinción más complejas que otros de sus respectivos grupos (arbustos y arbolado), según las variables descritas por ANDERSON (1982) y las categorías de control de incendios descritas por TEDIM et al. (2018) y ALEXANDER & LANOVILLE (1989). Estos resultados ponen de manifiesto que la gestión de áreas arqueológicas es deficiente en cuanto a la prevención de incendios forestales y la protección de los elementos de interés patrimonial frente a la acción del fuego.

Los resultados de las simulaciones han revelado que casi todas las áreas de paleointerfaz en el área de estudio presentan algún píxel con valores extremos de intensidad, velocidad y/o longitud de llama, tanto en condiciones meteorológicas atípicas como típicas. La explicitud geoespacial de los resultados permite identificar aquellas áreas donde se dan las condiciones menos favorables. En este caso los valores más elevados de velocidad de propagación, intensidad y longitud de llama se dan en los yacimientos ubicados sobre las principales cordilleras presentes en el área de estudio. Los resultados también permiten medir la extensión de las áreas con comportamientos desfavorables. En algunos casos la extensión de los valores extremos supera el 50% del área de paleointerfaz. Esta distribución espacial de los resultados es clave para establecer órdenes de prioridad en el desarrollo de planes de gestión de riesgo de incendios y el diseño de acciones de prevención.

La obtención de los resultados geoespacialmente explícitos permitiría evaluar el grado de proximidad a los elementos arqueológicos y abordar una evaluación detallada de la vulnerabilidad frente a incendios de los elementos de interés arqueológico (UNESCO, 2024). No obstante, para ello sería preciso disponer de los contornos de dichos elementos georreferenciados con precisión. El trabajo de ROIHA et al. (2024) apunta que este tipo de información no suele estar disponible y que es necesario desarrollar este tipo de producto para mejorar la protección de los elementos patrimoniales frente al fuego.

La superposición de los MTT con las áreas de paleointerfaz ha revelado que en algunos casos se produce coincidencia geoespacial de enclaves arqueológicos con nodos de propagación de incendios. Por lo tanto, algunas áreas pueden constituir AEG. Esto coincide con la idea expuesta en Solares-Canal, 2022 de que se podría

abordar de forma integrada la prevención de incendios forestales a escala territorial con la protección específica de los elementos arqueológicos del territorio.

Finalmente, las simulaciones realizadas con la modificación virtual de combustibles evidencian que las modificaciones en la estructura de la vegetación pueden conducir a valores más bajos de velocidad, intensidad y longitud de llama, tanto en condiciones meteorológicas típicas como atípicas. Esto implica que las acciones propuestas contribuyen a disminuir el nivel de exposición los elementos arqueológicos y su entorno. Además, estos valores, unidos a la posición topográfica de algunas áreas arqueológicas y su extensión, supone oportunidades favorables para los equipos de extinción de incendios, que es el objetivo final de un AEG (ROMERO-VIVÓ et al. 2019). Las modificaciones de combustible propuestas podrían lograrse mediante diferentes técnicas como el desbroce, la quema prescrita o el pastoreo, así como combinaciones de ellas (RYAN 2012). La técnica, frecuencia y condiciones seleccionadas para cada AEG variarán según la distribución de los combustibles, la dinámica de la vegetación, la naturaleza del elemento arqueológico y las características del sitio (ej., topografía). Se necesitaría la colaboración entre expertos en patrimonio cultural e incendios para identificar la estrategia adecuada a seguir en cada uno de ellos (RYAN 2012).

6. Conclusiones

Este trabajo presenta un flujo de procesos basado en el empleo de fuentes de teledetección y herramientas de simulación de incendios dirigido a mejorar la protección frente al fuego de yacimientos arqueológicos y el territorio circundante. Las fuentes cartográficas se han empleado para elaborar de forma automática un mapa de modelos de combustible actualizado, de alta resolución y adaptado a las especificidades de la vegetación atlántica (SOLARES-CANAL et al. 2023). Este mapa ha permitido realizar simulaciones sistemáticas de incendios forestales en las condiciones actuales del territorio y obtener mapas de las principales variables descriptivas del comportamiento del fuego. El análisis de estos ha permitido determinar que todas las áreas de paleointerfaz del área de estudio están expuestas a comportamientos extremos de fuego sean cuales sean las condiciones meteorológicas analizadas. Esto muestra la necesidad de abordar medidas urgentes de gestión de áreas arqueológicas orientadas a la prevención de incendios forestales. Además, el análisis conjunto de las áreas de paleointerfaz y los caminos del fuego ha revelado que estas áreas pueden servir como AEG. A la vista de los resultados, la gestión preventiva de áreas de paleointerfaz permitiría mejorar la protección de elementos arqueológicos y del territorio frente a incendios forestales.

Finalmente, la recreación de actuaciones de gestión de la vegetación en áreas de paleointerfaz ha permitido evaluar la ganancia en términos de exposición a valores extremos del fuego y capacidad de control por parte de los medios de extinción. La interrupción de la continuidad vertical de masas arbóreas (cambio modelos de combustibles 7 y 10 a 9) y reducción de altura de matorrales en zonas de matorral (cambios modelo de combustible 4 a 5) se han mostrado eficaces para la reducción de la exposición a valores extremos y la mejora de las condiciones para los medios de extinción. A la vista de estos resultados, y considerando el marco actual de cambio climático, las actuaciones propuestas deberían abordarse de forma periódica. Sería deseable establecer equipos multidisciplinares conformados



por expertos en la gestión del patrimonio cultural, la prevención de incendios y la gestión forestal que estableciesen la periodicidad y los medios técnicos a emplear en cada caso. La gestión integrada es esencial para proteger el patrimonio arqueológico de una de sus principales amenazas a la vez que se contribuye a proteger el territorio de los incendios forestales.

7. Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto “PALEOINTERFAZ: Elemento estratégico en la prevención de incendios forestales. Desarrollo de metodologías de análisis 3D y multiespectral para la gestión integrada” de la convocatoria RETOS 2019 del Ministerio de Ciencias Innovación y Universidades (PID2019-111581RB-I00), del proyecto INTERREG Firepocetp+: 0139_FIREPOCTEP_MAS_6_E y del proyecto USE4FOREST_ INTERREG SUDOE. Además, para su realización Laura Alonso contó con la financiación del Programa Postdoctoral de la Xunta de Galicia (ED481B_059) y del Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades (FPU19/02054).

8. Bibliografía

ALEXANDER, M.E.; LANOVILLE, R.A.; 1989. Predicting fire behavior in the black spruce-lichen woodland fuel type of western and northern Canada. Canadian Forestry Service, Northwest Region, Edmonton, Alberta, Government of Northwest Territories, Department of Renewable Resources, Territorial Forest Fire Centre, Fort Smith, Northwest Territories.
<https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/entities/publication/9720cbfe-5132-438a-b4d4-79e2b5cfa79c>

ALONSO, L.; PICOS, J.; ARMESTO, J.; 2021. Forest Land Cover Mapping at a Regional Scale Using Multi-Temporal Sentinel-2 Imagery and RF Models. *Remote Sensing*, 13(12), 2237. <https://doi.org/10.3390/rs13122237>.

ANDERSON, H.E.; 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

ARELLANO-PÉREZ, S.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; ALONSO-REGO, C.; VEGA, J.A.; RUIZ-GONZÁLEZ A.D.; 2020. Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behaviour and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. *Forest Ecology and Management*, Volume 460, 17895, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117895>.

CASTELLNOU, M.; PRAT-GUITART, N.; ARILLA, E. et al.; 2019. Empowering strategic decision-making for wildfire management: Avoiding the fear trap and creating a resilient landscape. *Fire Ecology*, 15(31). <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0048-6>.

COPERNICUS OPEN ACCESS HUB. (n.d.). SciHub: Copernicus Open Access Hub. Retrieved January 13, 2023, from <https://scihub.copernicus.eu/>

FINNEY, M. A.; 2002. Fire growth using minimum travel time methods. *Can. J. For. Res.* 32, 1420–1424. doi: 10.1139/x02-068

GALE, M.G.; CARY, G.Y.; VAN ALBERT, I.J.M.; YEBRA M.; 2021. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sensing of Environment*, 255: 112282. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112282>

ICOMOS; 2019. ICOMOS releases Future of Our Past report to increase engagement of cultural heritage in climate action. <https://www.icomos.org/en/77-articles-en>



francais/59522-icomos-releases-future-of-our-pasts-report-to-increase-engagement-of-cultural-heritage-in-climate-action

INSTITUTO DE DATOS ESPACIALES DE ESPAÑA (IDEE); 2024. Catálogo de datos y servicios IDEE. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. <https://www.idee.es/csw-inspire-idee/srv/spa/catalog.search?#/metadata/spainMDT05>

MCWETHY, D.B.; SCHOENNAGEL, T.; HIGUERA, P.E. ; 2019. Rethinking Resilience to Wildfire. *Nature Sustainability*, 2: 797–804. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0353-8>

METEOGALICIA. (n.d.). Red Meteorological. Retrieved September 10, 2023, from <https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacioneshistorico/historico.action?idEst=10091#>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO (MITERD); 2011. Mapa Forestal de España (MFE) de máxima actualidad. Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe.aspx>.

MOLINA-TERRÉN, D.M.; XANTHOPOULOS, G.; DIAKAKIS, M.; RIBEIRO LUIS, CABALLERO, D.; DELOGU, G.M.; VIEGAS, D.X.; SILVA, C.A.; CARDIL, A.; 2019. Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy). *International Journal of Wildland Fire* 28, 85-98. <https://doi.org/10.1071/WF18004>.

PICKRELL J.; 2020. Thousands of ancient Aboriginal sites probably damaged in Australian fires. *Nature*, 10.1038/d41586-020-00164-8. Advance online publication. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00164-8>.

POZO-ANTONIO, J. S.; RIVAS, T.; CARRERA, F.; GARCÍA, L.; 2018. Deterioration processes affecting prehistoric rock art engravings in granite in NW Spain. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43, 2435–2448. <https://doi.org/10.1002/esp.4406>.

POZO-ANTONIO, J.S.; SANMARTÍN, P.; SERRANO, M.; DE LA ROSA, J.M.; MILLER, A.Z.; SANJURJO-SÁNCHEZJ.; 2020. Impact of wildfire on granite outcrops in archaeological sites surrounded by different types of vegetation. *Science of The Total Environment*, 747, 141143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141143>

QUÍLEZ, R.; VALBUENA, L.; VENDRELL, J.; UYTEWAAL, K.; RAMIREZ J.; 2020. Establishing Propagation Nodes as a Basis for Preventing Large Wildfires: The Proposed Methodology. *Front. For. Glob. Change*, 3, 548799. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.548799>

RODRIGUES, M.; CUNILL CAMPRUBÍ, A.; BALAGUER-ROMANO, R.; COCO MEGÍA, C. J.; CASTAÑARES, F.; RUFFAULT, J.; FERNANDES, P. M.; DE DIOS, V. R.; 2023. Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of the Total Environment*, 859, 160320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160320>.

RODRÍGUEZ-DORNA, A.; ALONSO, L.; PICOS, J.; ARMESTO, J.; 2023. Mapping Feasibility for Wood Supply: A High-Resolution Geospatial Approach to Enhance Sustainable Forest Management in Galicia (NW Spain). *Forests*, 14(11), 2124. <https://doi.org/10.3390/f14112124>.

ROIHA, J.; TANHUANPÄÄ, T.; HYYPPÄ, J.; HOLOPAINEN, M.; 2024. Precision



Forestry Versus Non-Precision Archaeology—Integrating Forest Management and Archaeological Site Protection. *Forests*, 15(6), 918. <https://doi.org/10.3390/f15060918>.

ROMERO-VIVÓ, M.; SORIANO, J.L.; BOTELLA, M.A. et al.; 2019. Definición y recomendaciones técnicas en el diseño de puntos estratégicos de gestión. Valencia: Sociedad Española de Ciencias Forestales; Generalitat Valenciana-Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. <http://secforestales.org/sites/default/files/archivos/documentopeg.pdf>.

ROUSSEL, J.R.; D. AUTY; 2021. Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. R package version 3.1.4.

RYAN, K.C.; JONES, A.T.; KOERNER, C.L.; LEE, K.M.; 2012. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on cultural resources and archaeology. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 3. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 224 p.

SOLARES-CANAL, A.; ALONSO, L.; RINCÓN, T.; PICOS, J.; MOLINA-TERRÉN, D.M.; BECERRA, C.; ARMESTO, J.; 2023. Operational fuel model map for Atlantic landscapes using ALS and Sentinel-2 images. *Fire Ecology*, 19, 61. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00218-y>

SOLARES-CANAL, A.; ALONSO, L.; RODRÍGUEZ, A.; MUÑOZ, P.; PICOS, J.; ARMESTO, J.; 2022. Tecnologías Cartográficas para la Caracterización del entorno de agrupaciones de yacimientos arqueológicos de cara a la Gestión Integrada de incendios forestales y patrimonio cultural. 8º Congreso Forestal Español.

SAYEDI, S.S.; ABBOTT, B.W.; VANNIÈRE, B. et al.; 2024. Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*, 20, 18. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9>

TECHNOSYLVA; 2024. Wildfire Analyst Software. <https://technosylva.com/products/wildfire-analyst/>

TEDIM, F.; LEONE, V.; AMRAOUI, M., et al.; 2018. Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>

UNESCO; 2016. Understanding World Heritage in Europe and North America Final Report on the Second Cycle of Periodic Reporting, 2012 - 2015. <https://whc.unesco.org/en/series/43/>

UNESCO; 2024. Fire risk management guide: protecting cultural and natural heritage from fire. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391847>

XUNTA DE GALICIA; 2020. Consellería do Medio Rural: Estadística, incendios forestales. <https://indicadores-forestal.xunta.gal/portal-bi-internet/dashboard/Dashboard.action;jsessionid=ZjfAkRRzdCFH+cvmzuDBCu-P.prd-jboss-c05-0002-hc-001:prd-jboss-c05-0002-hc-001-server-07>

XUNTA DE GALICIA; 2022. Consellería do Medio Rural: Estadística, incendios forestales. <https://mediorural.xunta.gal/es/recursos/estadisticas/estadisticas-forestales/incendios-forestales>