



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1711

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

Organiza





Utilidades EPyRIS para el diagnóstico y apoyo a actuaciones de emergencia posincendio

HERNÁNDEZ MORENO-CID, JAVIER. (1), CARRILLO PATIÑO, ALVARO. (2), GARCÍA ALONSO, MAITE (3) y SÁNCHEZ RESCO, MARIA ISABEL (1)

(1) Departamento de Actuaciones Medioambientales. Gerencia. Agua y Medioambiente. Grupo Tragsa.

(2) Departamento de Nuevas Tecnologías, I+D. Gerencia. Nuevas Tecnologías. Grupo Tragsa.

(3) Gerencia de Desarrollo Rural y Política Forestal. Grupo Tragsa.

Resumen

Se describe la herramienta EPyRIS, que permite la implementación de métodos basados en teledetección, datos de campo y modelización en un plugin GIS (Sistema de Información Geográfica) para apoyar a los gestores en la prevención y estabilización de áreas incendiadas con carácter de emergencia para el territorio estatal peninsular, verificando sus utilidades y funcionamiento en diversos escenarios post incendio desde 2021.

En base a un extenso repositorio de capas, permite acercamientos progresivos sobre un área forestal de interés, aplicando diferentes modelos para la estimación de riesgos y priorización de actuaciones. Los resultados incluyen, entre otros, respuesta esperable de la vegetación, vulnerabilidad ecológica potencial (antes y después del incendio), diagnóstico temprano (perímetro y severidad del fuego sobre la vegetación), diagnóstico extendido con datos de campo (áreas prioritarias erosivas y mapas de pérdidas de suelo) y riesgo hidrológico-erosivo y recursos amenazados, con el fin de establecer áreas prioritarias de actuación.

Palabras clave

Teledetección satelital, severidad del fuego, erosión post-fuego, hidrología, gestión forestal adaptativa.

1. Introducción

Tras la ocurrencia de incendios, especialmente en terrenos de relieves pronunciados, las áreas afectadas enfrentan potenciales riesgos de escorrentía superficial y erosión severa por combinación de suelos alterados y de precipitaciones intensas. Esto no solo degrada el suelo, un recurso clave para la sostenibilidad del ecosistema, sino que también puede constituir una amenaza para la vida de las personas y sus bienes, así como otros recursos, dentro y fuera del área quemada.

Para mitigar estos impactos, es necesario actuar rápidamente mediante un diagnóstico rápido y, en su caso, la aplicación de medidas de estabilización de emergencia, que permitan reducir los riesgos en el periodo más vulnerable del ecosistema, generalmente durante los primeros meses tras el incendio. A partir de los años setenta, se pusieron en marcha en Estados Unidos programas de rehabilitación de emergencia en áreas quemadas, que dieron lugar a los equipos BAER (WOHLGENMUTH et al., 2009; ROBICHAUD et al., 2000), que constituyen hoy



en día el principal referente mundial, para el análisis de riesgos post-incendio y planificación de medidas urgentes, en aquellos casos en que sea preciso.

Estas medidas tienen una finalidad primordial en limitar los efectos de las lluvias intensas sobre suelos desnudos y altamente inestables, y, proporcionan un primer paso hacia la recuperación y funcionalidad del ecosistema afectado.

Su ejecución dependerá de múltiples factores, como las características del ecosistema, la severidad del fuego, el clima, y las limitaciones técnicas, socioeconómicas y logísticas, y su efectividad va a estar condicionada por un estrecho marco temporal y por la agilidad en la ejecución de los trabajos por parte de las administraciones.

Hoy en día, el conocimiento científico técnico y la tecnología disponibles, favorecen la aparición de herramientas capaces de apoyar a los gestores en el ajuste de las mejores respuestas a las necesidades de cada territorio, así como una buena coordinación entre los implicados.

En el marco del proyecto “EPyRIS: Estrategia conjunta para la protección y restauración de los ecosistemas afectados por incendios forestales” (proyecto Interreg Sudoe, SOE2/P5/E0811, epyris.eu); y del proyecto “Modelos de diagnóstico y análisis de riesgos post-incendio, y seguimiento de actuaciones de emergencia (DARPI)” (proyecto de innovación del Grupo Tragsa que ha dado continuidad al anterior), se ha generado un conjunto de utilidades para el apoyo de los técnicos en el desarrollo de su labor en las condiciones indicadas.

2. Objetivos

Implementado como plugin sobre el SIG de código abierto QGIS, la herramienta EPyRIS persigue dar soporte en la protección frente a los riesgos posincendio en las áreas afectadas, contribuyendo a posibilitar un mayor grado de armonización, de unificación de criterios y de aplicación de protocolos a partir de un diagnóstico y de una evaluación sobre las necesidades de intervención.

Ofrece para ello un conjunto de utilidades para la gestión del pre-incendio y de las fases inmediatamente posteriores a la ocurrencia del mismo, con orientación a la vulnerabilidad potencial del territorio, a las amenazas subsiguientes, como las derivadas de procesos erosivos e hidrológicos en condiciones de inestabilidad del suelo y pérdida de cobertura, y al análisis de valores amenazados y de riesgos.

Tras la finalización del proyecto Interreg en 2022, la herramienta ha ido completando su funcionalidad y usabilidad a fin de abrir su uso a casuísticas más amplias dentro del territorio nacional y dar más opciones a los usuarios.

Se espera con ello facilitar la explotación del conocimiento científico técnico existente y el generado a través del propio proyecto por parte de gestores y agentes implicados en la gestión del post incendio.

3. Metodología

El desarrollo de la herramienta se concibió en el marco de las políticas de aprovechamiento de la información pública promovida desde la Unión Europea de obligada implantación en los estados, valiéndose para ello del uso de cartografía temática pública y disponible por parte de los estados, regiones o agencias europeas, productos de teledetección, y herramientas SIG de código abierto.



Asimismo, es producto resultante de un esfuerzo por aglutinar el conocimiento proveniente del ámbito científico y de la gestión en campos diversos (teledetección, hidrología, gestión forestal, ciencias económicas), posibilitado a través del consorcio articulado para el proyecto Interreg.

De tal forma, se siguió una metodología de desarrollo incremental por módulos, que finalmente fueron integrados, atendiendo a una identificación de necesidades previas, llevada a cabo en contacto con gestores con interés en el Proyecto.

Tales módulos fueron:

- Análisis de la Vulnerabilidad Ecológica Potencial, que da soporte a la gestión de la prevención permitiendo hacer previsiones y ajustar la planificación conforme a la respuesta esperada del ecosistema en caso de ocurrencia de incendio.
- Diagnóstico temprano, a fin de aprovechar la información más inmediata tras el incendio, apoyada en la teledetección, para la obtención de diagnósticos de alto nivel en los primeros días tras la extinción del fuego.
- Diagnóstico extendido, que apoyado en el anterior, genere métodos ágiles para un diagnóstico más minucioso, que incorpore información no asequible sin un desplazamiento a campo (ej. efectos sobre el suelo), y que facilite las decisiones de tipo operacional en las primeras semanas tras la extinción.
- Análisis de riesgos, que permita la designación de áreas de atención prioritaria conforme a los valores amenazados y riesgos analizados.

Asimismo, se generaron diversas utilidades adicionales con la finalidad de facilitar el trabajo a los usuarios y de ampliar sus posibilidades, y que fueron agrupadas en un espacio a parte.

Dentro de cada apartado, fue preciso completar una revisión previa del estado del arte y una selección de modelos a incluir, de acuerdo con su nivel de disponibilidad para implementación. Varios de estos modelos debieron además ser ajustados para su integración en el SIG, en aquellos casos que ésta no podía ser directa, o requería procesos de excesiva complejidad, que alejaban su utilidad del ámbito de la gestión.

La operación del plugin requiere de la disponibilidad de las capas de repositorio en cada proyecto creado, por lo que esta función es también facilitada desde el propio plugin a través de una preconfiguración de proyecto que ya incorpora las conexiones precisas, y las capas base cargadas.

La información espacial y alfanumérica, vectorial, raster y tablas requeridas por los modelos como entradas a los mismos, fue integrada en base de datos, cargadas en Geoserver y conectadas a través de WFS.

La funcionalidad se diseñó, de manera incremental por el orden anteriormente indicado, contando con la participación de cada socio del proyecto Interreg en el ajuste de modelos, parametrizaciones por defecto y soporte en la toma de decisiones para su implementación (epyr.es).

4. Resultados

Se ha generado EPYRIS, como herramienta para su empleo como plugin de QGIS en la aplicación de metodologías tanto en el preincendio, a través del conocimiento de la vulnerabilidad ecológica potencial de las áreas forestales a proteger, como en las fases iniciales del post incendio en las que debe decidirse sobre la conveniencia o no de intervención urgente, que eviten riesgos post-incendio a través de la

estabilización de las áreas quemadas.

Para este segundo enfoque, incluye utilidades para: la obtención de un diagnóstico temprano, a partir de datos de teledetección; el diagnóstico extendido con datos de muestreos en campo; la estimación de la erosión y de la vulnerabilidad potencial post incendio; la determinación de la afección a la red de drenaje y de la amenaza hidrológica, y el análisis de riesgos y de recursos amenazados.

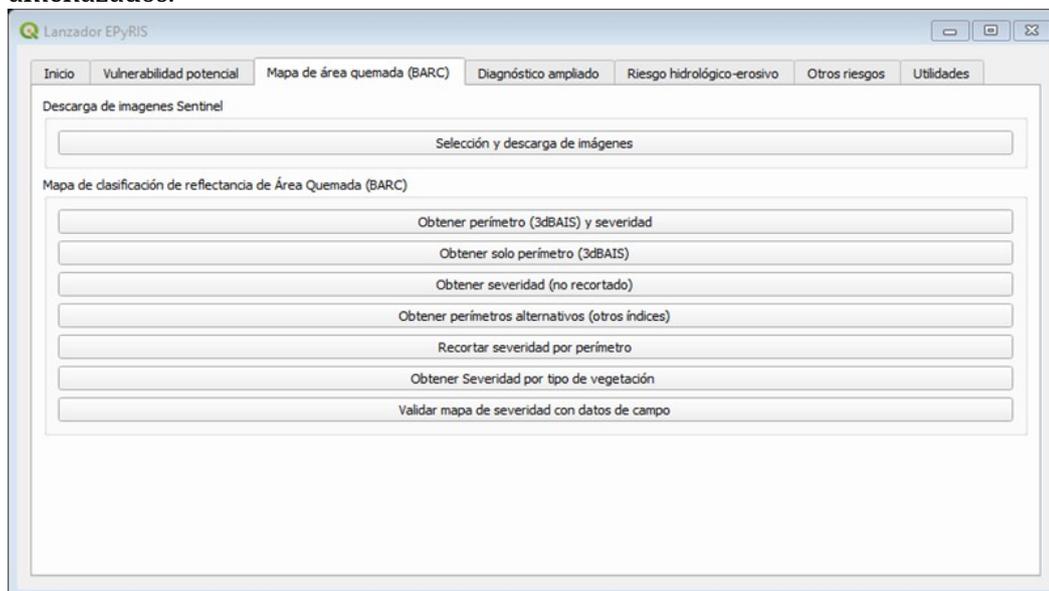


Figura 1. Interfaz de la herramienta EPyRIS y utilidades de determinación de área quemada y niveles de severidad.

Análisis preincendio

Basado en ALLOZA et al. (2013), la herramienta ofrece una estimación de la vulnerabilidad ecológica potencial (EV) a través de la combinación de capacidad de respuesta de la vegetación (VRA) con la erosión post incendio, como indicador de la degradación del suelo (Figura 3). Esta puede ser obtenida, de manera alternativa, bien a partir de los datos del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, con una resolución de 25 metros, o de la cartografía de RUSLE2015 del JRC (PANAGOS et al, 2015), ajustada en repositorio a las condiciones post-incendio, en lo que respecta al factor C de cobertura de la vegetación (Figura 2, Figura 3).

La capacidad de respuesta de la vegetación (VRA), es a su vez estimada a partir del potencial de regeneración (PR), el cual tiene en cuenta el nivel de adaptación de la vegetación al fuego y su nivel de madurez reproductiva, que consolidan la capacidad intrínseca de autosucesión (IAS), y la velocidad de regeneración (RR), indicativa del tiempo preciso para alcanzar la cobertura del suelo.

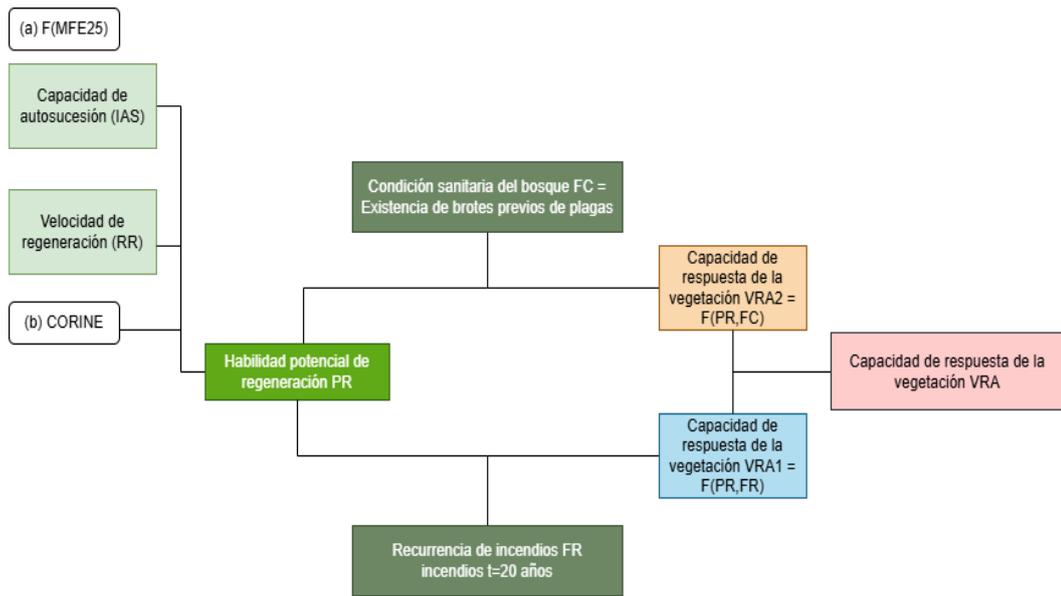


Figura 2. Lógica general para la estimación de la capacidad de respuesta de la vegetación VRA en la metodología de EPyRIS, a partir de fuentes cartográficas disponibles.

EPyRIS hace uso de los campos de vegetación arbórea (especie: SP1, SP2 y SP3), arbustiva y herbácea para asignar un valor de estrategia reproductiva (germinadoras o rebrotadoras), y de las capas de las regiones bioclimáticas. Actualmente, el proceso utiliza el Mapa Forestal Español 1:25.000 (MFE25), si bien el uso con otras cartografías podría adaptarse dependiendo de los campos de información disponibles. En su versión cartográfica, la información alfanumérica del Mapa Forestal está codificada y se relaciona con la distribución espacial de las teselas a través de una base de datos.

El Potencial de Regeneración de la vegetación (PR) es obtenido a través de matriz de decisión implementada en el SIG, en combinación de los parámetros anteriores (RR e IAS). La Capacidad de Respuesta de la Vegetación (VRA) se obtiene como resultado final tras integrar sus dos componentes (VRA1 y VRA2) provenientes del PR con la recurrencia de incendios y con la condición fitosanitaria del monte, respectivamente.

Finalmente, la vulnerabilidad ecológica es obtenida incorporando los efectos de la erosión posincendio, como indicador de la degradación del suelo, bien por reclasificación de la capa de cobertura (C) de RUSLE2015 (Panagos et al, 2015), bien empleando directamente la capa de erosión potencial del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES).

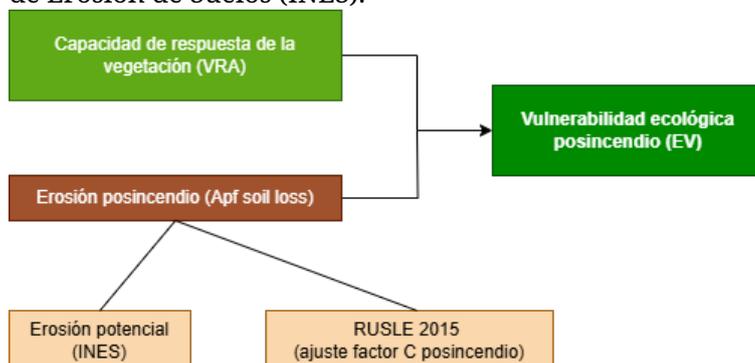


Figura 3. Lógica general de la estimación de la vulnerabilidad ecológica potencial en la metodología de EPyRIS, en base a ALLOZA et al. (2013).

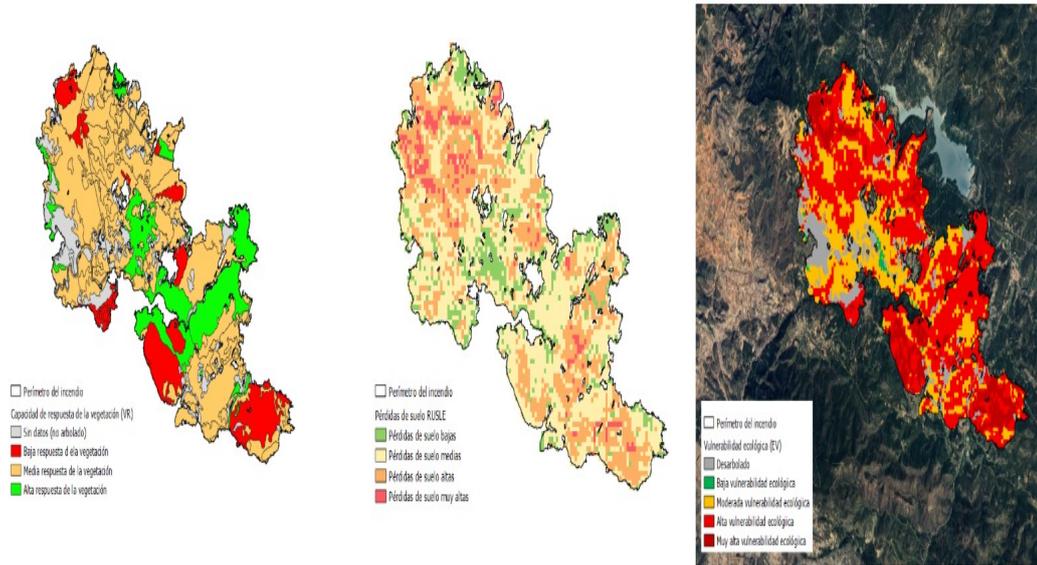


Figura 4. Estimación de la vulnerabilidad ecológica potencial (EV) (derecha), a través de la combinación de la respuesta de la vegetación (VRA) (izquierda) y de las pérdidas de suelo potenciales (centro).

Análisis post incendio

Un proceso fundamental para la toma de decisiones tras un incendio y para planificar y ejecutar, en caso de ser preciso, tareas de estabilización de emergencia, es la evaluación de la alteración sufrida por el ecosistema afectado. En una gran parte de los casos, y siempre dependiendo de la visibilidad atmosférica, la severidad del fuego va a ayudar a valorar de forma general este nivel de alteración desde fases muy iniciales tras el incendio gracias al uso de la teledetección.

Dentro de EPyRIS se revisó en profundidad las diferentes alternativas en el sudoeste europeo para una rápida determinación de las áreas quemadas y su nivel de severidad, de forma que se permita completar un primer “*diagnóstico temprano*”, de utilidad en la toma de decisiones a alto nivel de forma inmediata. Por otro lado, los resultados obtenidos se orientan también a facilitar la ejecución de posteriores análisis de mayor detalle, con especial atención al suelo, integrados así en un “*diagnóstico extendido*”, igualmente implementado, que facilite la toma de decisiones más operativas, en un plazo de tiempo razonable.

Diagnostico temprano

El uso de índices espectrales es un método ampliamente extendido para cartografiar las zonas afectadas por el fuego a partir de datos de satélite. La clasificación basada en el umbral de diferencia del índice dNBR (difference normalized burn ratio), del Servicio Forestal de Estados Unidos, es referencia metodológica para la detección y clasificación de áreas quemadas, si bien, tanto esta como otras requieren ajustes dependiendo a menudo de las condiciones

específicas en cada caso, y actualmente no existe un acuerdo sobre la idoneidad de un único índice.

Dentro del proyecto EPyRIS se propuso una metodología para la detección automática, mediante imágenes de satélite Sentinel-2, del área quemada (perímetro) y de los diferentes grados de la severidad causada por el fuego a la vegetación (GARCÍA FERNÁNDEZ et al 8CFE-489). Todo ello se sintetiza en forma de mapas de clases de reflectancia sobre área quemada (GARCÍA et al, 2022).

Tras la realización de un estudio sobre los principales índices utilizados en teledetección para la definición de perímetros de áreas quemadas se implementó el algoritmo 3dBAIS (Figura 5), que combina diversos índices, y tiene la capacidad de discriminar zonas de área quemada y no quemada con gran precisión, siendo la alternativa que mostró minimizar los errores generados de manera independiente por cada uno de ellos (GARCÍA et al, 2022).

Dado el uso extendido de otros índices y la falta de acuerdo sobre la idoneidad de uno por encima del resto, y su ajuste en cada caso, la herramienta implementa funcionalidades adicionales a fin de contar con la cartografía más fiable posible: edición de los umbrales de clasificación, obtención de perímetros a partir de índices alternativos a 3dBAIS, en concreto dNBR, RBR, dBAIS2, dBAI, dBAIM; obtención de pilas de imágenes multibanda en infrarrojo medio (SWIR), Falso Color (FC), y Color verdadero (RGB), para una mejor interpretación de los resultados obtenidos, y herramientas de edición semiautomática para el refinado de la cartografía.

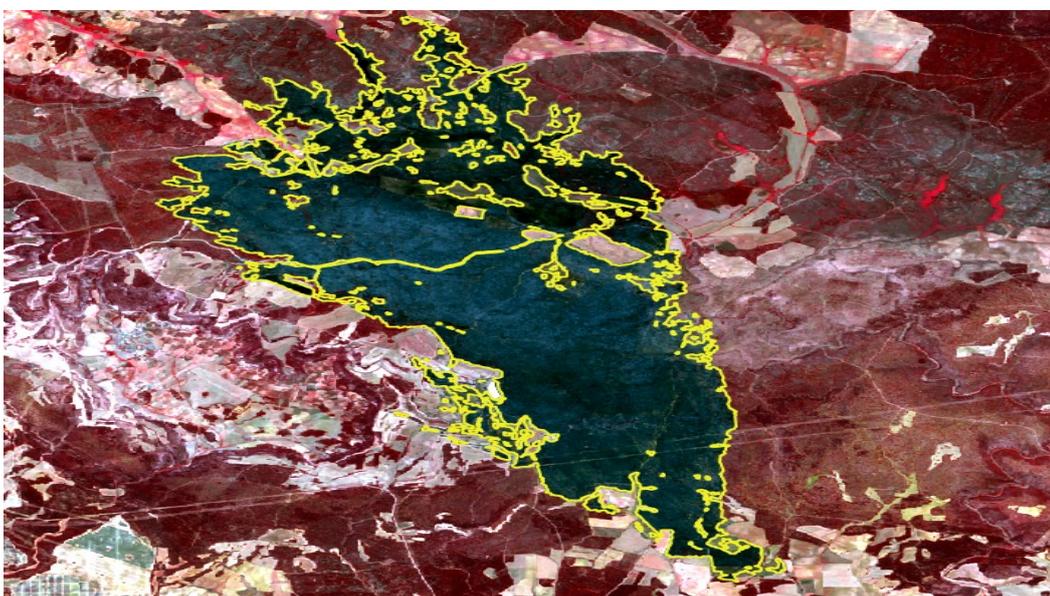


Figura 5. Perímetro 3dBAIs obtenido en el incendio de Valverdejo (Cuenca), sobre imagen Sentinel 2 en falso color posincendio (31/07/2024)

A partir del área quemada, genera mapas de severidad clasificados, según los índices dNBR, BAI, y metodología EPyRIS (GARCÍA FERNÁNDEZ et al, 2022; Figura 6), que combina ambos índices en función de la densidad de la vegetación determinada por el índice NDVI.

Como resultado, se obtienen mapas de clasificación de reflectancia sobre área

quemada, con determinación del perímetro y de cuatro niveles de severidad (alta, media, baja y muy baja o no quemada).

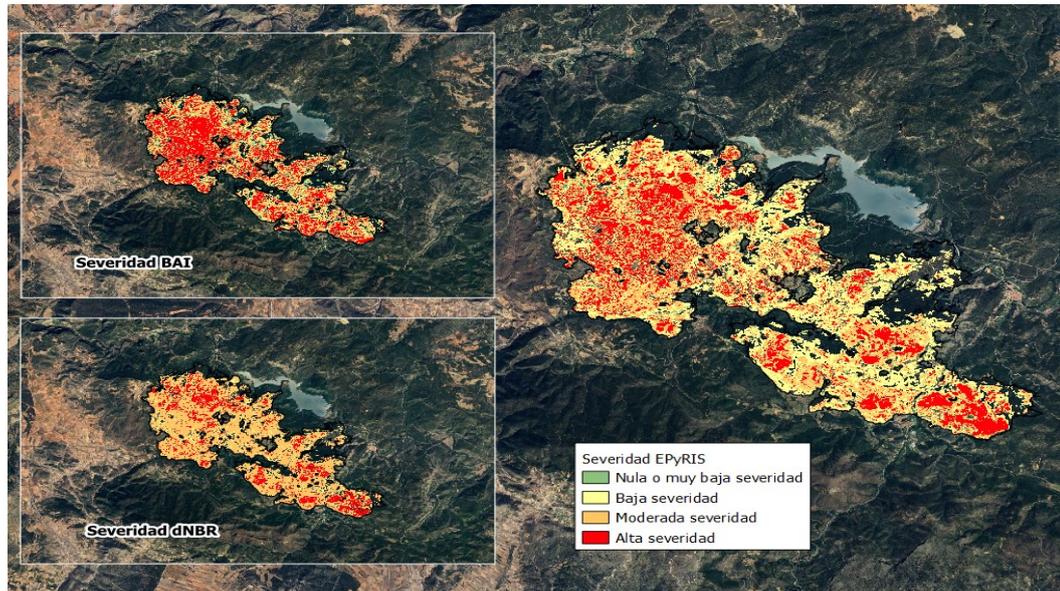


Figura 6. Niveles de severidad según metodología EPyRIS para el incendio de Villanueva de Viver (Castellón), sobre imagen Sentinel-2 color natural (RGB) posincendio (05/05/2023) (derecha), resultado de la combinación del índice dNBR (delta Normalized Burn Ratio)(izquierda) y BAI (Burned Area Index) (centro), en función de la densidad de la vegetación marcada por el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

Finalmente, EPyRIS implementa la opción de obtener un mapa de severidad clasificado según la estructura de la vegetación (Figura 7), a partir de la categoría TIPESTR50 del Mapa Forestal Español, o code_18 en caso de usar CORINE (Mapa de ocupación del suelo en España correspondiente al proyecto europeo CORINE Land Cover).

Los valores obtenidos corresponden a la clasificación de las zonas arboladas, de matorral, pastos, agrícolas, sin vegetación y temporalmente desarbolado, en los niveles de severidad indicados.

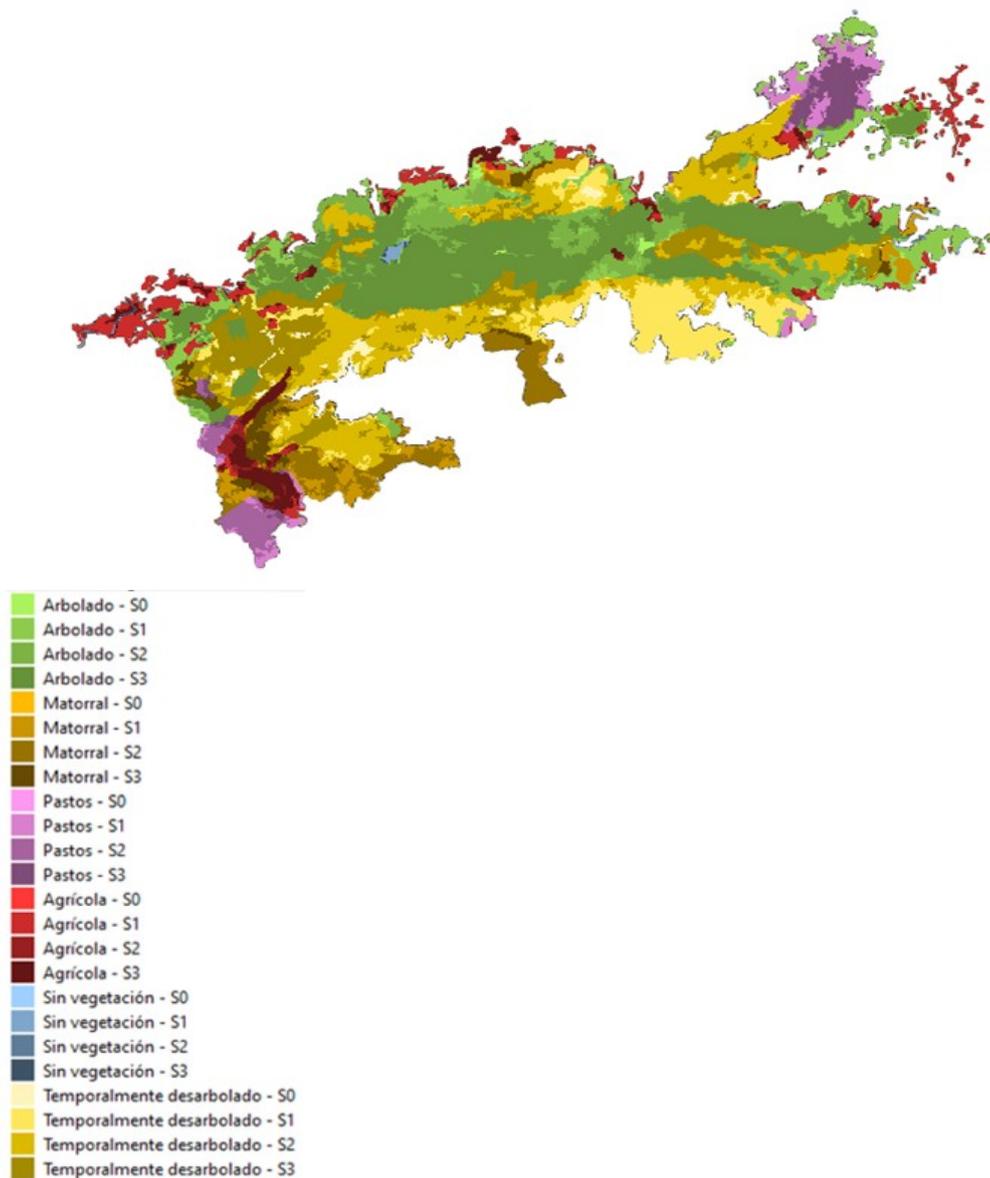


Figura 7. Mapa resultado de la combinación de las diferentes estructuras de vegetación y la severidad (S0, S1, S2, S3) que ha sufrido cada tipo de estructura tras el incendio. Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023).

Diagnostico extendido

El diagnóstico temprano proporciona información de utilidad en la toma de decisiones y para la realización de diagnósticos más profundos en áreas de interés, designado en EPyRIS como diagnóstico extendido.

Este conjunto de utilidades permite la obtención de zonas de atención prioritaria y de puntos de muestreo de acuerdo con el nivel de severidad detectado y la pendiente, la obtención de mapas de severidad del fuego en el suelo, conforme a datos de campo ingresados, la estimación de pérdidas de suelo post-incendio mediante tres modelos diferenciados, y la vulnerabilidad ecológica estimada, conforme a la erosión post-incendio.

En conjunto, permitirá un análisis más preciso de los riesgos erosivos, diferenciando entre los enfoques de teledetección, que son efectivos para evaluar la severidad en la vegetación, y aquellos centrados en el suelo.

La herramienta nos ofrece en primer término, de manera automática, un plan de muestreo que incluye un mapa de zonas de atención prioritarias y una red de puntos de muestreo asociada. Su finalidad es facilitar la toma de datos a través de un muestreo de tipo intencional, de carácter exploratorio que, aunque no tiene valor probabilístico, resulta más eficiente ante la urgencia de las operaciones. Esto permitirá evaluar factores como la severidad en el suelo y la estimación de la erosión y actuar en ellas en el menor tiempo posible (Figura 8).

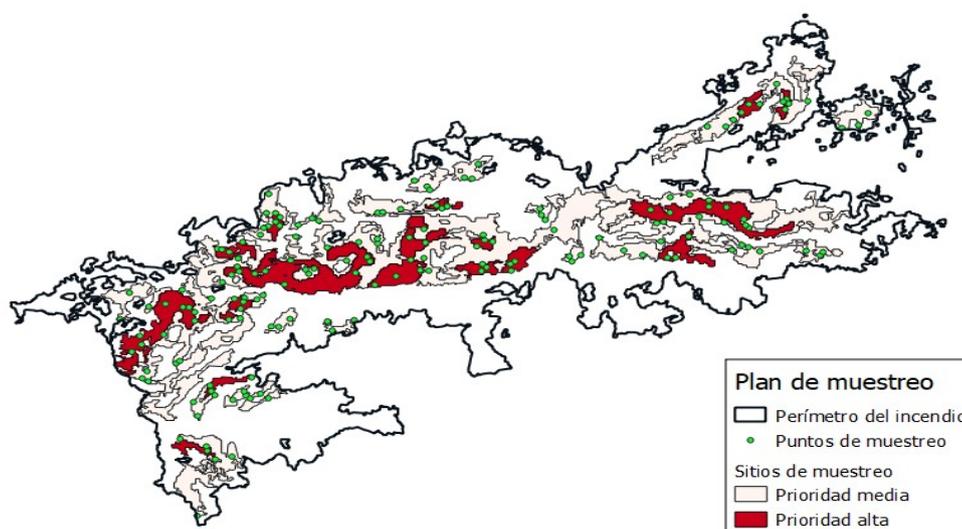


Figura 8. Plan de muestreo con los sitios clasificados según su prioridad y los puntos de muestreo asociados. Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023).

La capa de sitios de muestreo se obtiene a partir de la combinación de las clases del mapa de pendientes (clasificado), con el mapa raster de área quemada (mapa de severidad clasificado) o con el mapa de índice de área quemada NBR o RBR, para obtener cuatro prioridades (descartable, baja, media y alta).

El resultado es un mapa vectorial de polígonos (sitios de muestreo) y otro de puntos (parcelas de muestreo) que será de utilidad en la selección rápida y eficaz de zonas prioritarias y con mayor riesgo de sufrir eventos erosivos. Esto permitirá evaluar factores como la severidad en el suelo y actuar en ellas en el menor tiempo posible.

La entrada de datos de campo, orientados a la estimación de pérdidas de suelo tras el incendio se ha implementado a través de archivo de texto, identificando para cada punto de muestreo, su localización, y los parámetros precisos para alimentar los modelos de erosión incorporados.

En este sentido, el plugin incorpora la generación de mapas de erosión a través de la aplicación de RUSLE2015 (PANAGOS et al., 2015), el modelo del CIF de Lourizán (FERNÁNDEZ Y VEGA, 2017), y el modelo Morgan Morgan Finney ajustado conforme a los trabajos realizados por la Universidad de Aveiro (VIEIRA

et al, 2014).

Para la aplicación del modelo RUSLE 2015 del JRC, el cual facilita en forma de información espacial los factores concernidos: erosividad de la lluvia, erodibilidad (vulnerabilidad a la erosión) del suelo, pendiente y longitud de ladera, cobertura de vegetación y prácticas de conservación, se ha implementado una trasposición de la cartografía existente para cada factor del modelo a nivel europeo, puesta a disposición pública por el European Soil Data Center (ESDAC), calculando el ajuste de los dos factores afectados por la ocurrencia de incendios forestales (C, cobertura del suelo; y K, erodibilidad del suelo) de acuerdo con la región bioclimática (atlántica o mediterránea) y usando como referencia diversos estudios científicos sobre el efecto del fuego en estos factores.

La cartografía de erosión es obtenida de forma automática como producto de las imágenes de cada factor, y posteriormente clasificada de acuerdo con los umbrales: baja para pérdidas de suelo inferiores a una tonelada por hectárea y año; moderada para valores inferiores a cinco toneladas; alta para valores inferiores a veinte toneladas; y muy alta para valores superiores (Figura 9).

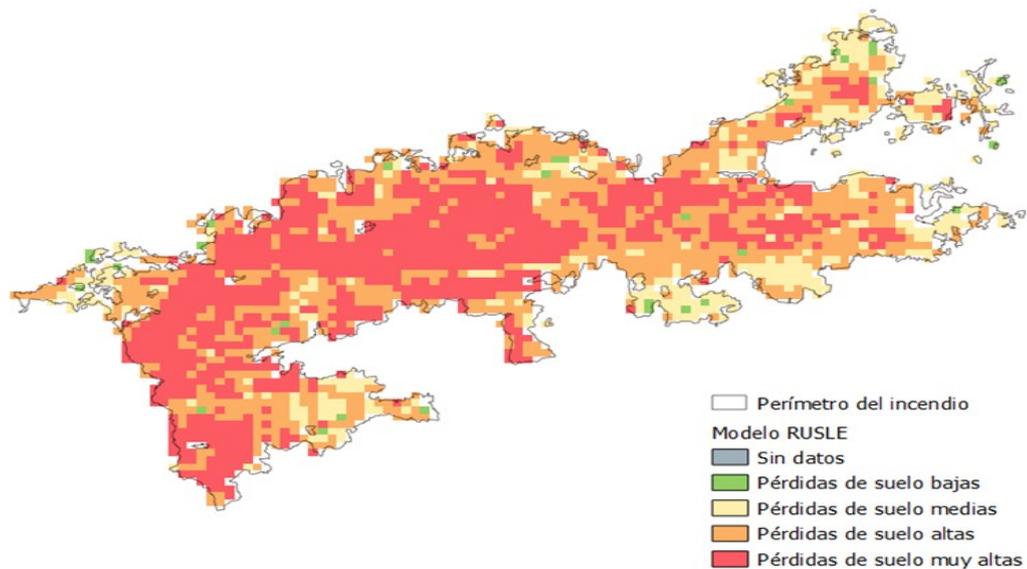


Figura 9. Pérdidas de suelo según modelo RUSLE 2015 para el incendio de Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023)

Por su parte el modelo empírico CIF Lourizán (FERNÁNDEZ Y VEGA, 2017), de aplicación en zonas de características edáficas similares a las del noroeste peninsular, tiene en cuenta el carácter crítico del grado de cambio ambiental causado por el fuego en el suelo (KEELEY 2009; LENTILE et al. 2006; MORGAN et al. 2014; NEARY et al. 2005), como indicador de la alteración de propiedades del suelo, sobre el riesgo erosivo en áreas quemadas, y consecuentes necesidades de estabilización.

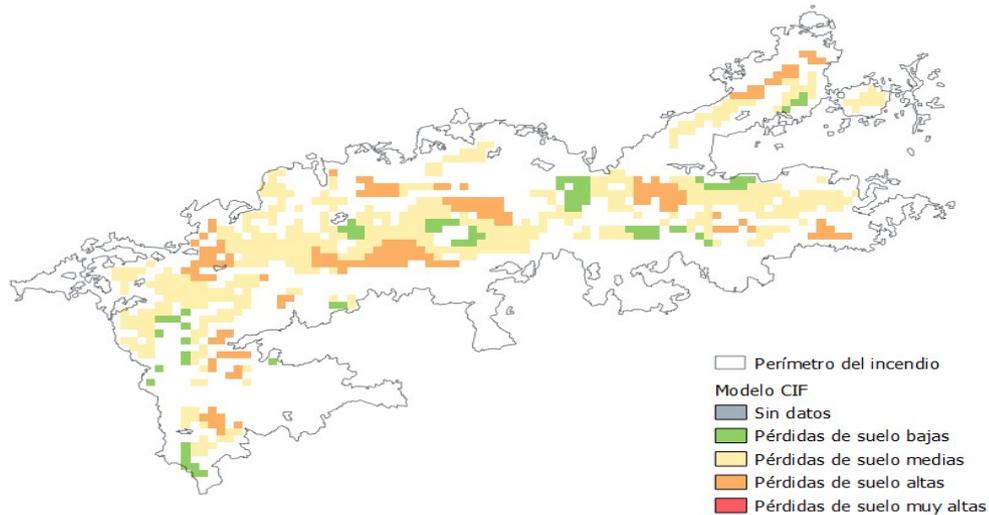


Figura 10. Pérdidas de suelo según modelo CIF para el incendio de Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023).

Junto a los datos de pedregosidad (P) y uso de la tierra (LU), emplea como entrada para cada punto de muestreo, los valores de Severidad del Fuego en el Suelo (SBSI), anotados en el muestreo de campo según la clasificación de Fernández y Vega (2016), y mapificados a continuación mediante interpolación, como paso intermedio para la generación de mapa de pérdidas de suelo (Figura 10).

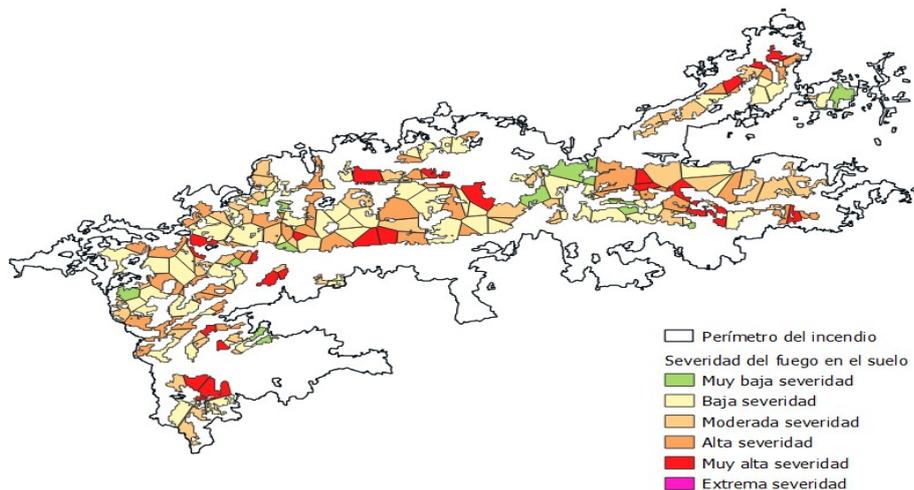


Figura 11. Niveles de severidad sobre el suelo obtenido en el incendio de Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023)

El modelo Morgan Morgan Finney (VIEIRA et al, 2014) es el tercero de los modelos implementados para la estimación de la erosión post-incendio, la cual predice a partir de datos de campo que informen sobre la cubierta vegetal en

contacto con el suelo (GC, único parámetro obligatorio, y requerido en la toma de datos de campo), la densidad aparente (BD) y la profundidad hidrológica del suelo (EHD).

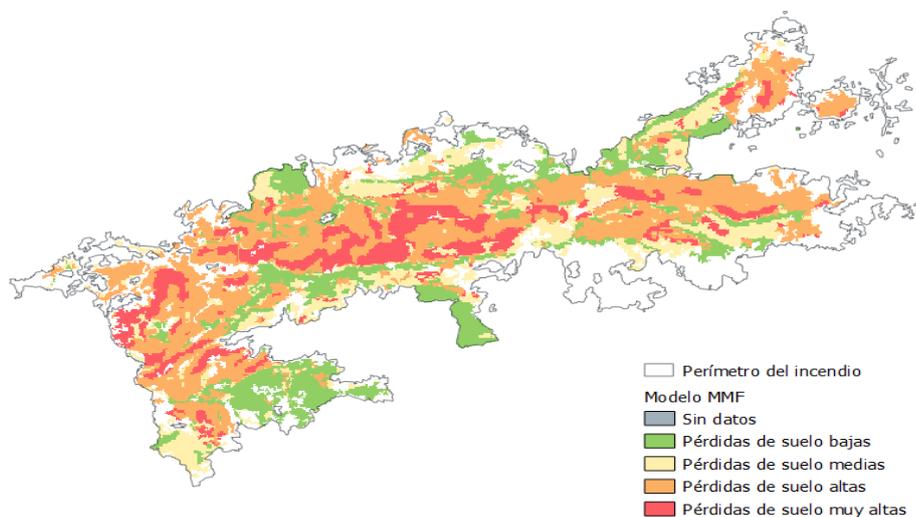


Figura 12. Pérdidas de suelo según modelo MMF para el incendio de Montitxelvo (Valencia, 02/11/2023).

Vulnerabilidad ecológica estimada

Una vez obtenida la erosión estimada conforme a la aplicación de uno o varios de los modelos anteriores, se puede obtener, de forma análoga al análisis preincendio, un valor de Vulnerabilidad Ecológica que, en EpyRIS, es identificado como vulnerabilidad ecológica del territorio, resultados idénticos a la figura 3, pero adaptados a las condiciones post-incendio.

Amenaza hidrológica

En tanto que tras la ocurrencia de un gran incendio, las prioridades de intervención urgente van a tener que orientarse hacia la protección de las personas y bienes, así como de los valores ambientales y culturales aguas abajo del área quemada, EPyRIS incluye una aproximación para el análisis de amenaza hidrológica potencial, la cual orienta desde dos enfoques: la determinación de la red de drenaje afectada, y la clasificación del territorio en función de la morfometría de cuencas incluidas y su tendencia a generar crecida.

Red de drenaje

La herramienta hace uso de la información generada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico para la obtención de la clasificación hidrográfica de los ríos de España «© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico» mediante el método Pfafstetter modificado (CEDEX, 2016).

Del cruce de capas de cuencas y ríos completos, con el perímetro del incendio, se

resuelve el solape entre cuencas y subcuencas contenidas por los diferentes niveles de jerarquía del sistema Pfafstetter, y se obtiene de manera automática la selección de todas ellas, incluyendo cauces y área de influencia o perímetro (establecido por usuario).

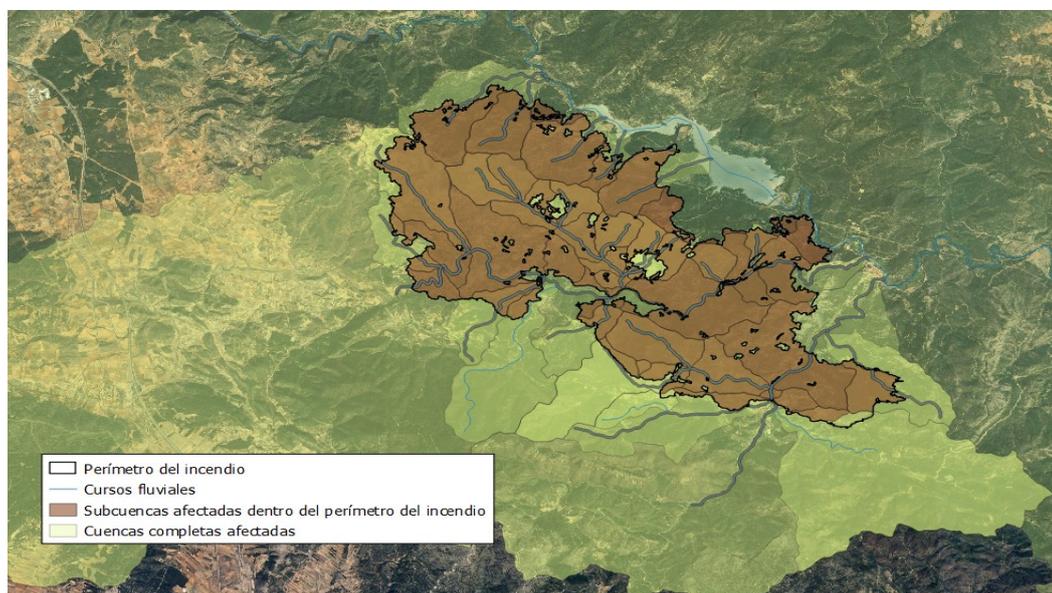


Figura 13. Red hidrográfica afectada en el incendio de Villanueva de Viver (Castellón, 05/05/2023).

Niveles de amenaza hidrológico-erosiva

En el proyecto EPyRIS este enfoque se propone a partir de los parámetros morfométricos de cuenca, asimilando condiciones de pluviometría equiparables para una misma área afectada.

Otros aspectos como la pendiente de los cauces, o el perfil longitudinal de los mismos, por ejemplo, serían también fácilmente incorporables en este diagnóstico, que resulta en la obtención de un área de amenaza, comprendiendo la fracción quemada de las cuencas más vulnerables (por pendiente, severidad y morfometría), extendida aguas abajo sobre el área inundable de los cauces que alimentan.

Con objeto de orientar posibles áreas más sensibles a la ocurrencia de procesos hidrológico erosivos tras el incendio, se incluye algoritmo que combina aspectos morfométricos (coeficiente de compacidad y Densidad de drenaje $-Kc$ y DV , respectivamente), como aproximadores del potencial de crecida de la cuenca, con niveles de severidad del fuego para proporcionar un mapa que representa el potencial del riesgo hidrológico por cuenca y subcuenca, con independencia de su nivel de jerarquía. De este modo podremos encontrarnos diferentes niveles de riesgo en función al contexto de cuenca en que nos fijemos.

El nivel de amenaza se obtiene como resultado de la combinación mediante matriz de decisión del valor de potencial de crecida y el de severidad o pérdidas de suelo. Debe tenerse en cuenta que, por niveles de amenaza ante riesgos erosivos, se entiende la probabilidad de que suceda un evento con potencial erosivo y capacidad de producir daños, en sentido amplio. Se incluye en ello todo tipo de efectos sobre recursos amenazados vinculados a procesos erosivos en cualquiera de sus componentes (disgregación, transporte y sedimentación), pudiendo incluir

desde daños a las aguas y vida acuática por aumento de la turbidez, hasta daños mecánicos derivados del caudal sólido, o aterramiento por acumulación de sedimentos sobre recursos productivos.

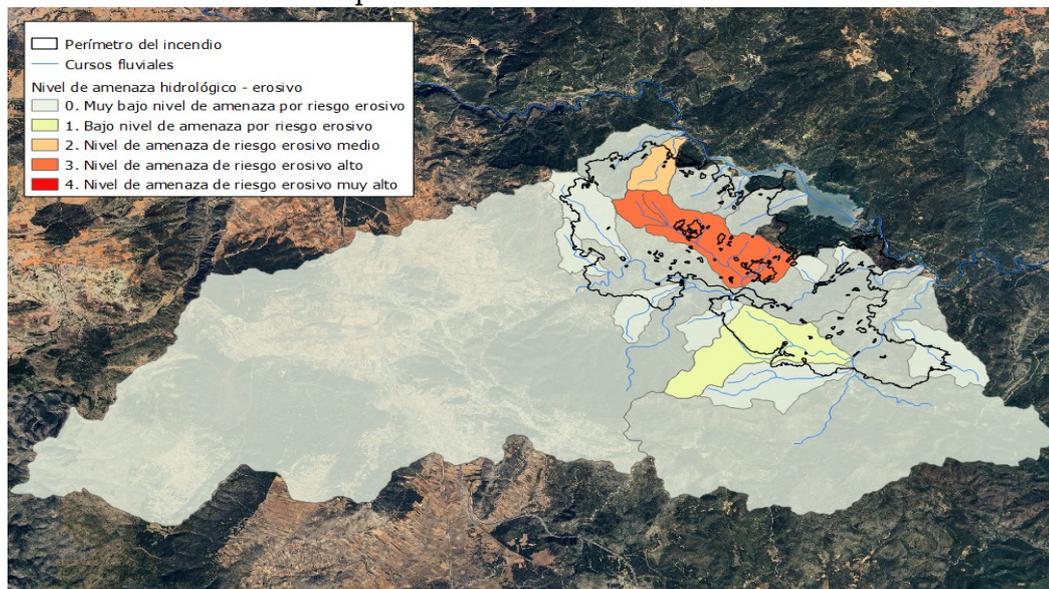


Figura 14. Niveles de amenaza por riesgos derivados de procesos erosivos por cuencas y subcuencas. Villanueva de Viver (Castellón, 05/05/2023).

Análisis de riesgo y apoyo a operaciones

La realización de un diagnóstico ágil y detallado acerca del daño ocasionado sobre vegetación y suelo como el indicado, a través de dos enfoques de alcance progresivo (temprano y extendido), se considera un punto de partida necesario para la estimación de riesgos para las personas, las propiedades, los recursos productivos (bienes de mercado y servicios), y los recursos ambientales y culturales afectados.

Avanzar una estimación sobre éstos constituye por su parte un paso necesario para el establecimiento de estrategias de respuesta (priorización de zonas de actuación, selección de medidas a aplicar, etc.).

A través del enfoque de EPyRIS, el análisis se centra en la determinación de amenazas derivadas de daños de carácter erosivo-hidrológico, plagas, y caída de arbolado, relacionados con factores como la severidad en vegetación y suelo, la pendiente, la estructura forestal o los usos previos al incendio, entre otros.

Fundada sobre la metodología del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (USDA Forest Service, 2020), se orientó hacia la atención a los Valores Amenazados (VAR), y sus probabilidades de sufrir daños, así como la magnitud de sus consecuencias (Tabla 1), en función de las amenazas diagnosticadas (CALKING et al, 2007). Este enfoque facilita asignar una dimensión económica a la situación post-incendio, facilitando la localización de los espacios prioritarios para su protección.

De este modo, se establece una probabilidad de daño como:

- Muy probable; Ocurrencia casi segura (90% - 100%)
- Probable; Ocurrencia probable (50% - 89%)
- Posible; Ocurrencia posible (10% - 49%)
- Improbable; Ocurrencia improbable (0% - 9%)



Tabla 1. Matriz para la estimación de la magnitud de consecuencias.

Magnitud de consecuencia					
	a. Vida y seguridad ciudadana	b. Recursos culturales y naturales		c. Propiedad y servicios	
	A. Vida y seguridad de las personas	B. Valor no de mercado (Cultural)	C. Valor no de mercado (Ecológico)	D. Valor de mercado (Pérdida de uso)	D. Valor de mercado (Coste de reparación/restablecimiento)
Importante	Pérdida de vidas o lesiones a seres humanos	Daños irreversibles a recursos culturales críticos	Daños irreversibles a recursos naturales críticos.	Daño sustancial a la propiedad	Daño sustancial a la producción
Moderado	Lesión o enfermedad a los seres humanos	Daños a recursos culturales críticos que tengan efectos considerables o de largo plazo	Daños a recursos naturales críticos que tengan efectos considerables o de largo plazo.	Daño moderado a la propiedad	Daño moderado a la producción
Menor	No aplica	Daños a recursos culturales críticos que tengan como resultado efectos mínimos, recuperables o localizados	Daños a recursos naturales críticos que tengan como resultado efectos mínimos, recuperables o localizados	Los daños a la propiedad tienen un valor económico limitado y / o pocas inversiones	Los daños a la producción tienen un valor económico limitado y / o pocas inversiones

Los Valores Amenazados mantienen siempre en EPyRIS una correspondencia física con algún elemento geográfico del entorno u objeto, sea éste de tipo superficial, como un embalse, lineal, como una pista forestal, o puntual, como una edificación aislada (Tabla 2). El repositorio incluye para ello la información necesaria, si bien es posible actualizarlo con capas disponibles por el usuario.

En todo caso, un mismo elemento geográfico puede a su vez incorporar varios VAR, y la herramienta prevé y permite ajustar la asignación, para cada elemento, de uno o varios de los tres tipos de valor siguientes: 1) Vida y seguridad ciudadana, 2) Recursos culturales o ambientales, 3) Valores de mercado, distinguiendo si pueden ser objeto de intercambio en el mercado (reparación, reposición) en forma de bienes, o de prestación de servicios (restablecimiento).

Tabla 2. Matriz de correspondencia entre los valores amenazados (VAR), amenazas y elementos geográficos.

Amenaza (factor de peligrosidad)	Elemento geográfico (Objeto)	Recurso amenazado – Valores en Riesgo (VAR)
Erosión	Captaciones de agua Cauces protegidos agua potable Depósitos de agua Embalses Lagunas Edificios aislados Poblaciones Bienes de interés cultural Carreteras Pistas y pasos de agua	Vida y seguridad ciudadana Recursos Culturales Recursos Naturales Propiedad Producción de bienes y servicios
Caída de arbolado	Infraestructuras: Captaciones de agua Depósitos de agua	



	Embalses Edificios aislados Poblaciones Bienes de interés cultural Carreteras Pistas y pasos de agua	
Plagas	Masas arboladas	

Ejemplos de valores confluyentes en un mismo elemento geográfico serían construcciones de interés cultural que, en caso de resultar dañadas, integrarían además de una pérdida de valor de mercado o coste de reparación (restauración), una de valor del servicio cultural provisto (visitas); o un tramo de río sobre el que podría suceder una pérdida de valor económica sobre las capturas de peces, pero también ambiental, por el daño al ecosistema, e incluso para la seguridad ciudadana, en caso de abastecer de agua potable una población aguas abajo.

Con el potencial de pérdida de valor para cada recurso amenazado calculado en el área de afección, la herramienta devuelve la totalidad del valor monetario en riesgo por adición de las cuantías afectadas para cada valor en cada zona. La traducción en euros permite reducir a un mismo tipo de unidad todas las pérdidas potenciales, con independencia de su tipología, sean o no bienes o servicios, e intercambiables en el mercado o no. Del mismo modo, ofrece una clasificación de áreas de intervención, conforme al valor global y parcial comprometido.

Si bien en el caso de daños a bienes y servicios de mercado la cuantificación del valor en euros puede ser medida a través de costes de reparación, reposición, o pérdidas por la interrupción del servicio, transferencia de beneficio u otros métodos objetivos directos, en el caso de valores culturales y ambientales su determinación resulta más compleja, y es en sí objeto de un ámbito de investigación propio.

Los valores monetarios obtenidos se infieren de estimadores de disposición a pagar, en función de las preferencias de los agentes analizados. Este método permite incluir recursos “no-de-mercado” en la toma de decisiones, tanto a través de análisis de coste-beneficio, como de otros análisis multicriterio más sofisticados.

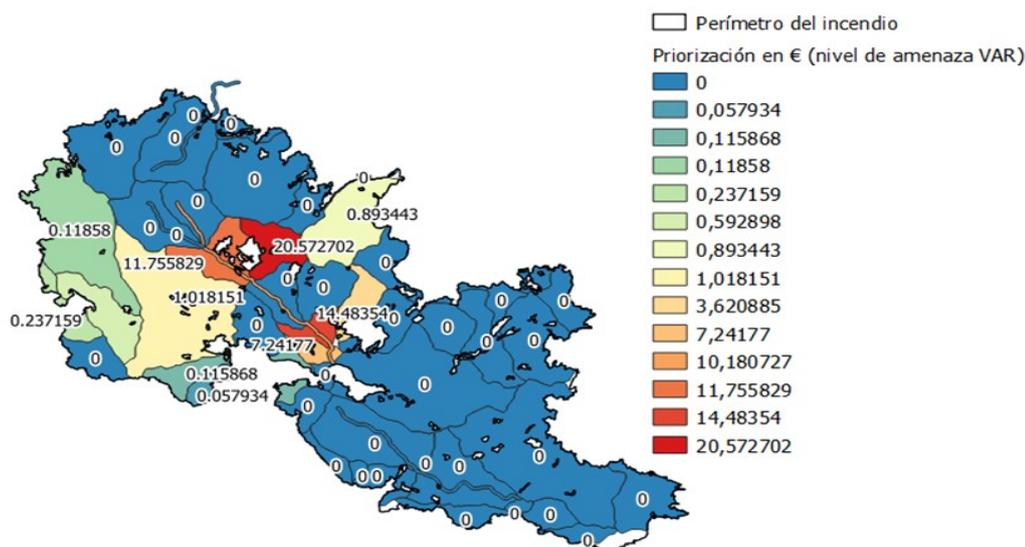


Figura 15. Mapa de simulación de priorización en función de la zona afectada. Villanueva de Viver (Castellón, 05/05/2023).

5. Discusión

Una efectiva aplicación de medidas de estabilización requiere de una evaluación suficiente del daño producido, representado por la severidad del fuego sobre la cobertura vegetal y sobre el suelo.

Las técnicas de teledetección proporcionan actualmente resultados con una resolución temporal y espacial suficiente para un análisis temprano parcial (la separación de resultados de suelo y vuelo no es posible hoy en día con estos métodos). Establecer métodos que permitan maximizar la eficiencia de la evaluación en campo apoyada en estos primeros análisis con técnicas SIG y de teledetección, y la inclusión de otros factores como los socioeconómicos, ayudaría a un mejor diseño de los trabajos post-incendio, proporcionando información valiosa sobre las áreas de actuación prioritaria y las técnicas de estabilización más efectivas, incluyendo la relación coste-beneficio de su aplicación.

Existen tecnologías suficientes para instrumentar protocolos orientados en este sentido, que pongan en valor el conocimiento generado desde el ámbito científico (fuentes públicas de datos, Infraestructuras de Datos Espaciales, sensorización, TIC...).

Adicionalmente, extender los conocimientos y herramientas existentes a la fase previa al incendio, puede permitir una identificación de las zonas que, conforme a sus condiciones edáficas, climáticas, geomorfológicas, etc., se presenten como más vulnerables a riesgos post-incendio, lo que puede ser útil en el diseño de planes de prevención.

Desde su desarrollo inicial hasta la actualidad, el uso de la herramienta EPyRIS ha permitido detectar limitantes a la aplicación de unos u otros métodos, y ofrecer a través de utilidades SIG de código abierto, ajustables en la selección de modelos más adecuados y ajustables tanto a los recursos disponibles en términos de tiempo, como de información de entrada.

Debe además resaltarse que, junto con las diferentes condiciones de cada territorio, a menudo también son diferentes las preocupaciones que los gestores



han de atender, estando el proyecto centrado en torno a riesgos relacionados con el suelo y su dinámica tras los incendios forestales, como principal factor relacionado con intervenciones de urgencia.

La casuística es diversa, no obstante, factores como posibilidad de desprendimientos, caída de arbolado o aparición de brotes de plagas pueden requerir atención urgente, y en ocasiones, priorizarse sobre los anteriores. EPyRIS trata de dar respuesta a algunos de ellos mediante utilidades específicas adicionales.

En su planteamiento la herramienta EPyRIS, mantiene su finalidad instrumental, sin reemplazar el juicio técnico en ningún caso, ofreciendo herramientas flexibles y amplias para facilitar la valoración por parte de los gestores, mediante opciones de personalización y ajuste y validación.

Después del análisis de numerosos incendios, se puede asegurar que herramientas como EPyRIS permiten realizar un análisis de abundantes variables de relevancia antes y después de la ocurrencia de un incendio forestal, incluyendo un extenso repositorio de capas, datos y matrices.

Uno de los desafíos más importantes detectados se encuentra en el aprovechamiento del estrecho hueco temporal tras la ocurrencia de los incendios para completar los diagnósticos y análisis de datos de campo. El modelo de EPyRIS plantea por ello una metodología ágil adaptada a tal fin (horizonte temporal de semanas tras el incendio), a través de equipos reducidos pero cualificados y disponibles durante las épocas de riesgo.

Sería conveniente apoyar la realización de diagnósticos sobre las áreas quemadas con personal formado en la evaluación de suelos quemados, así como en el apoyo a la validación de mapas de área quemada clasificados por reflectancia (BARC).

6. Conclusiones

Tras las labores de extinción aparecen otros factores de riesgo tan importantes o más que el propio incendio y que pueden acarrear eventos como escorrentía, erosión, riadas, desprendimientos y plagas, siendo conveniente actuar de una manera rápida, efectiva y eficiente.

Se puede asegurar que existe además un cuerpo de conocimiento, un estado de la tecnología y unas políticas de reutilización de la información pública propicios para la generación de instrumentos de apoyo en esta labor. También se cuenta en los equipos de prevención y combate de incendios con un personal altamente tecnificado, tanto en técnicas operativas como en el manejo de la información y de herramientas SIG, comunicaciones, captura de datos, etc., fuertemente vinculado al territorio, y a la población rural, y con una gran capacidad de trabajo en estas áreas.

La generación de herramientas como la descrita en la presente comunicación se plantea como un instrumento de utilidad en la toma de decisiones a distintos niveles y diferentes horizontes temporales, así como para la confrontación de criterios que favorezca la armonización de políticas de las administraciones con competencias desde distintos ámbitos de gestión.

La asignación de esfuerzos en aspectos como la formación sobre la evaluación de los efectos sobre el suelo, el seguimiento de las actuaciones de urgencia realizadas, la apertura de datos públicos o la valoración de los bienes y servicios afectados constituye una oportunidad, a través de este tipo de utilidades, para una eficaz aplicación de protocolos de respuesta e incluso para sustentar el planteamiento de programas de estabilización de emergencia de áreas quemadas.



Queda en todo caso un importante trabajo por hacer en el seguimiento de la efectividad de las actuaciones posincendio, encontrando carencias en la documentación sobre los resultados de las distintas técnicas de estabilización actualmente en uso bajo diferentes condiciones.

Igualmente, se espera que la progresiva apertura de datos públicos en el espacio europeo serán un gran refuerzo para una mayor utilización de estos, y que el auge de tecnologías novedosas (IA, ciencia de datos, etc.) facilitará el desarrollo de algoritmos con un alcance superior.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración de las personas de los equipos del CIF de Lourizán (y en la actualidad CSIC-Misión biológica de Galicia), del Departamento de Ambiente e Ordenamento de la Universidad de Aveiro, de la Unidad de Cambio Global del Laboratorio de Procesado de Imágenes de la Universidad de Valencia, de la Office National des Forêts y del Departamento de Fundamentos de Análisis Económico de la Universidad de Santiago de Compostela, así como cada una de las unidades del Grupo TRAGSA (Gerencia de Sistemas de Información geográfica, Política forestal, Actuaciones Medioambientales) implicadas en el proyecto EPyRIS y que hicieron posible la materialización de los resultados en las utilidades descritas, con su contribución o esfuerzos en la transferencia de conocimiento, el ajuste de modelos para su implementación en el SIG, y en el diseño de metodologías y su testado.

Asimismo, agradecen la colaboración a las personas de las diferentes administraciones del Estado y autonómicas su apoyo en el seguimiento del proyecto y en la facilitación de los trabajos en el territorio para los diferentes análisis de caso realizados: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Xunta de Galicia, Junta de Castilla y León, Junta de Extremadura, Junta de Castilla-La Mancha, Gobierno de Canarias.

Por último, a personas pertenecientes a otros equipos colaboradores en el desarrollo (Agresta) y despliegue de bases de datos (Centro de Supercomputación de Castilla y León), así como a todas las que han apoyado como becarios, y personal de campo.

8. Bibliografía

- ALLOZA, JA; GARCIA, S; GIMENO, T; VALLEJO, VR; ROJO, L; MARTÍNEZ, A; 2014. Guía técnica para la gestión de montes quemados. Protocolos de actuación para la restauración de zonas quemadas con riesgo de desertificación. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 188 pp. Madrid.
- CALKIN, DAVID E. AND HYDE, KEVIN D. AND ROBICHAUD, PETER R. AND JONES, J. GREG AND ASHMUN, LOUISE E. AND LOEFFLER DAN . 2007. Assessing post-fire values-at-risk with a new calculation tool. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <http://dx.doi.org/10.2737/RMRS-GTR-205>.
- FERNÁNDEZ, C; VEGA, JA; 2016. Modelling the effect of soil burn severity on soil erosion at hillslope scale in the first year following wildfire in NW Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*. 41(7),928 - 935. <https://doi.org/10.1002/esp.3876>.
- FILIPPONI, F; 2028. BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. Vol. 2, No. 7, p. 364.
- FORNACCA, D.; REN, G.; XIAO, W.; 2018. Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a mountainous region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10(8), 1196.
- GARCÍA FERNÁNDEZ, MA; CAÑIZARES CARDÓS, M; SOBRINO RODRÍGUEZ, JA; LLORENS COMPANY, R; CARRILLO PATIÑO, A; ROLDÁN ZAMARRÓN, A; 2022.



- Análisis por teledetección de la severidad del fuego en la vegetación, SECF. 8º Congreso Forestal Español: "La ciencia forestal y su contribución a los objetivos de desarrollo sostenible". 8CFE-489, Lleida, Cataluña (España), 27/06/2022-1/07/2022. ISBN: 978-84-941695-6-4.
- KEELEY, J.; 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18(1):116-126.
- KEY, CARL; BENSON, NATE; 2006. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio.
- LENTILE, L.; HOLDEN, Z.; SMITH, A.; FALKOWSKI, M., 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* 15(3).
- MITECO, 2022. Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES) 2000–2022. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.
- MPAKAIRI, K.; NDAIMANI, H.; KAVHU, B.; 2020. Exploring the utility of Sentinel-2 MSI derived spectral indices in mapping burned areas in different land-cover types.
- NEARY, D.; RYAN, K.; DEBANO, L.; 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.
- PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; POESEN, J.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; MEUSBURGUER, K.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C.; 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, 5(2), 117-126; <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.
- PARKS, S; DILLON, G; MILLER, C; 2014. A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing* 6(3): 1827-1844.
- J. PICOTTE, J.; M. ROBERTSON, K.; 2011. Validation of remote sensing of burn severity in south-eastern US ecosystems. *International Journal of Wildland Fire* 20(3) 453-464 <https://doi.org/10.1071/WF10013>.
- PPAFSTETTER, O; 1989. Clasificación de cuencas hidrográficas: una metodología de codificación. Manuscrito no publicado. Departamento Nacional de Obras de Saneamiento. Brasil.
- ROBICHAUD, PETER. R.; BEYERS, JAN. L.; NEARY, DANIEL. G.; 2000. Evaluating the Effectiveness of Postfire Rehabilitation Treatments. General Technical Report RMRS-GTR-63.
- ROUSE, JW; 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFG, Type III. Final Report, 371.
- QUINTAS RIPOOLL, LUIS; 2016. Clasificación hidrográfica de los ríos de España. Publicación unitaria, Serie Monografías: M-133. CEDEX. Depósito Legal: M 26047-2016 ISSN: 0211-8203. 418 p. Madrid. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica. Ministerio de Fomento. Edición 1ª, ISBN: 978-84-7790-587-5, NIPO: 163-16-002-3;17-0049.
- SOBRINO, JA; JIMÉNEZ-MUNOZ, JC; PAOLINI, L; 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.
- W.P.; 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual review of ecology and systematics*, 15(1), 353-391.
- USDA Forest Service. 2020. *Forest Service Manual 2520 – Watershed Protection and Management*. <https://www.fs.usda.gov/about-agency/regulations-policies/manual/2520-watershed-protection-and-management>. USDA FOREST SERVICE; 2004. Emergency Stabilization – Burned-Area Emergency Response (BAER). Section 2523 of Chapter



2520, Watershed Protection and Management. In 'Forest Service Manual FSM 2500, Watershed and Air Management'. (USDA Forest Service: Washington, DC.

VIEIRA, D.C.S.; PRATS, S.A.; NUNES, JP; SHAKESBY, RA.; COELHO, COA.; KEIZER, JJ.; 2014. Modelling runoff and erosion, and their mitigation, in burned Portuguese forest using the revised Morgan–Morgan–Finney model. *Forest Ecology and Management*, 314, 150–165. doi: 10.1016/j.foreco.2013.12.006.

WOHLGEMUTH, PM.; BEYERS, JL.; HUBBERT, KR.; 2009. Rehabilitation strategies after fire: the California, USA experience. In: Cerdá, A.; Robichaud, P. R., eds. *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, NH: Science Publishers. pp. 511-536.

YUN, DU; YIHANG, ZHANG; FENG, LING; QUNMING, WANG; WENBO, LI; XIAODONG, LI; 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*. 8(4) - 354.