



GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE CAMPO DE LA SEVERIDAD DEL FUEGO EN EL SUELO

• CRISTINA FERNÁNDEZ • JOSÉ M. FERNÁNDEZ-ALONSO
• JACOB KEIZER • ANTONIO GIRONA-GARCÍA

Centro de Investigación Forestal de Lourizán-Xunta de Galicia
Centre for Environmental and Marine Studies (CESAM),
Dept. Environment and Planning, University of Aveiro

Introducción

La evaluación de la severidad del fuego en el suelo, definida como el grado de cambio causado por el fuego (Keeley 2009; Lentile *et al.* 2006; Morgan *et al.* 2014; Neary *et al.* 2005), es un paso urgente y crítico en la priorización de las áreas a rehabilitar (por ejemplo, Neary *et al.* 2005; Jain *et al.* 2012; Vega *et al.* 2013a) en el contexto de las actividades de estabilización del suelo tras el incendio.

La mayoría de las clasificaciones de severidad del fuego en el suelo disponibles actualmente para categorizar el efecto del fuego en el suelo se basan en indicadores de los cambios en la cubierta orgánica del suelo (nivel de consecución) y en la superficie del suelo mineral (cambios de color o estructura) además de la deposición de cenizas procedentes de la combustión de la biomasa o del propio suelo.

En esta guía se describe la clasificación de Fernández y Vega (2016), una modificación de la inicialmente propuesta por Vega *et al.* (2013b), con el objetivo de facilitar la identificación de los diferentes niveles de severidad del fuego en el suelo propuestos en el monte. Además, se resume de forma práctica cómo esos niveles visuales se relacionan bien con las alteraciones en una serie de propiedades del suelo representativas de la susceptibilidad a la erosión. La mayoría de los casos proviene de Galicia, donde esta clasificación está siendo usada en la planificación de las acciones de rehabilitación urgente desde 2013 y de otros incendios evaluados en España en el transcurso del proyecto EPYRIS.

Finalmente, se incluye un anexo para orientar el diseño del muestro de campo y un ejemplo real del mismo, efectuado en el incendio de la Granja en 2019.

En un segundo anexo se explica brevemente cómo medir en el campo la repelencia al agua del suelo.

Descripción de los niveles de severidad del fuego en el suelo en función de indicadores visuales de alteración de la cubierta orgánica y suelo mineral

Figura 1.

Suelo afectado por un nivel de severidad de fuego en el suelo 1. Incendio Mourentán (Pontevedra, 2016) y Dimo (Pontevedra, 2016).



1 | MUY BAJO. Cubierta orgánica aún reconocible. Estrato de hojarasca total o parcialmente consumido por el fuego. Mantillo sólo consumido parcialmente. Sin cambios en el suelo mineral. Presencia de raicillas finas. El nivel de repelencia al agua del suelo (normalmente alto cuando el suelo está seco) no ha sido modificado por el fuego.



Figura 2.

Suelo afectado por un nivel de severidad de fuego en el suelo 2. Incendio Nerva (Huelva, 2018) y Flariz (Ourense, 2020).



2 | BAJO. Quedan abundantes restos carbonosos de la consunción de la hojarasca y mantillo sobre el suelo mineral intacto. A veces puede haber depósitos de ceniza procedentes de la combustión de la vegetación y de la cubierta orgánica del suelo. Sin cambios en el suelo mineral. Presencia de raicillas finas. El nivel de repelencia al agua del suelo (normalmente alto cuando el suelo está seco) no ha sido modificado por el fuego.



Figura 3.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 2 en el incendio de La Granja (Segovia, 2019).



Figura 4.

Raicillas del suelo mineral superficial intactas en un suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 2 (Trazo-A Coruña, 2015).

3 | MODERADO. Cobertura del estrato orgánico del suelo completamente consumida. Puede haber una capa de ceniza mineral de espesor variable. Suelo desnudo. La materia orgánica del suelo no ha sido consumida y la superficie del suelo permanece intacta tras el fuego. Se conserva su estructura y las raíces finas superficiales pueden estar parcialmente consumidas. El suelo superficial presenta repelencia generalmente.



Figura 5.

Suelo afectado por un nivel de severidad de fuego en el suelo 3. Incendio Nerva (Huelva, 2018) y Flariz (Ourense, 2020).

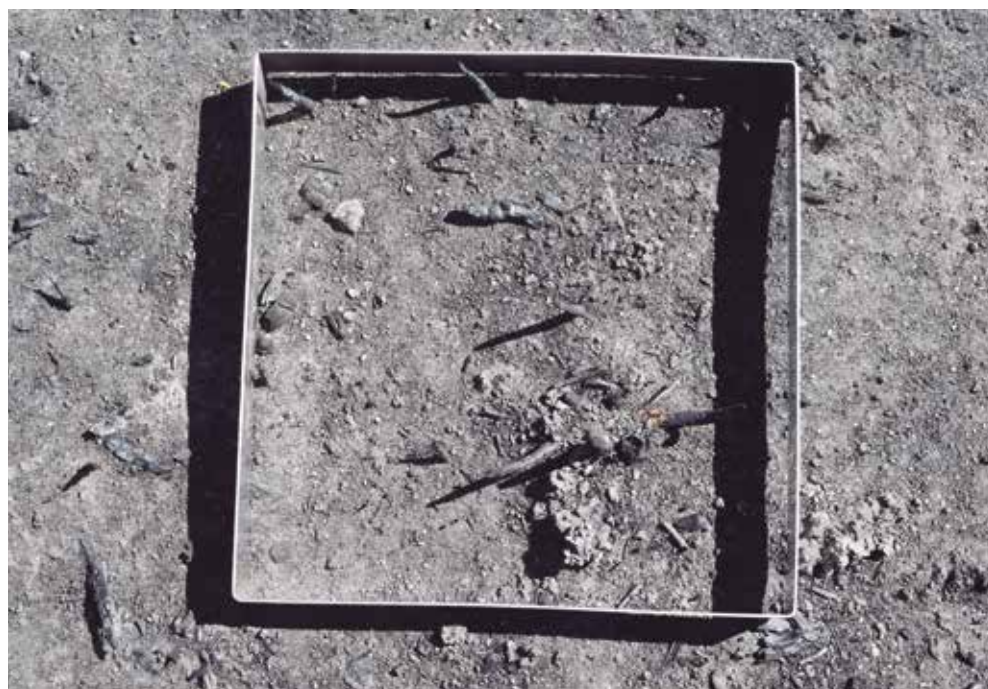




Figura 6.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 3 en el incendio de La Granja (Segovia, 2019).



Figura 7.

Raicillas del suelo mineral superficial intactas en un suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 3 (Figueiras-A Coruña, 2015).

4 | ALTO. Consunción total de la cubierta orgánica del suelo; predomina el color gris y es evidente una deposición abundante de ceniza mineral. Suelo desnudo. Consunción de la materia orgánica del suelo. La pérdida de estructura es muy clara y también la consunción de raicillas en una profundidad inferior o igual a 1 cm. El suelo superficial no presenta repelencia, siendo habitual detectarla en los centímetros inmediatamente inferiores a la superficie, en función de la profundidad hasta la que se observan las alteraciones descritas.

Figura 8.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 4 en el incendio de Dimo (Pontevedra, 2016) y Flariz (Ourense, 2020).





Figura 9.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 4 en el incendio de La Granja (Segovia, 2019).

5 | MUY ALTO. La descripción de las alteraciones es equivalente al del nivel de severidad alto pero alcanza profundidades superiores a 1 cm.



Figura 9.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 5 en el incendio de Dimo (Pontevedra, 2016) y Flariz (Ourense, 2020).





Figura 10.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 5 en el incendio de Nerva (Huelva, 2018).



Figura 11.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 5 en el incendio de La Granja (Segovia, 2019).

6 | EXTREMO. Suelo desnudo. Consunción total de la materia orgánica del suelo; predomina el color naranja a rojizo. La pérdida de estructura es muy clara y también la consunción de raicillas. El suelo superficial no presenta repelencia, siendo habitual detectarla en los centímetros inmediatamente inferiores a la superficie. Esta profundidad depende de aquella a la que han llegado las alteraciones descritas. En los casos más extremos, por debajo de este nivel subyace un nivel 4 e, incluso, por debajo de éste un 3 antes de alcanzar el suelo sin alterar.





Figura 12.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 6 en el incendio de A Mezquita (Ourense, 2020), a la izquierda, y Sabuguido (Ourense, 2020), arriba.



Figura 13.

Suelo afectado por un nivel de severidad del fuego en el suelo 6 en el incendio de La Granja (Segovia, 2019).

Relación en los indicadores visuales de severidad y propiedades del suelo relacionadas con la susceptibilidad a la erosión

Diferentes trabajos llevados a cabo en Galicia en los últimos años han mostrado que los niveles de severidad del fuego en el suelo basados en signos de alteración visuales se corresponden bien con alteraciones en diferentes propiedades edáficas relacionadas con la susceptibilidad a la erosión.

Estabilidad de agregados del suelo

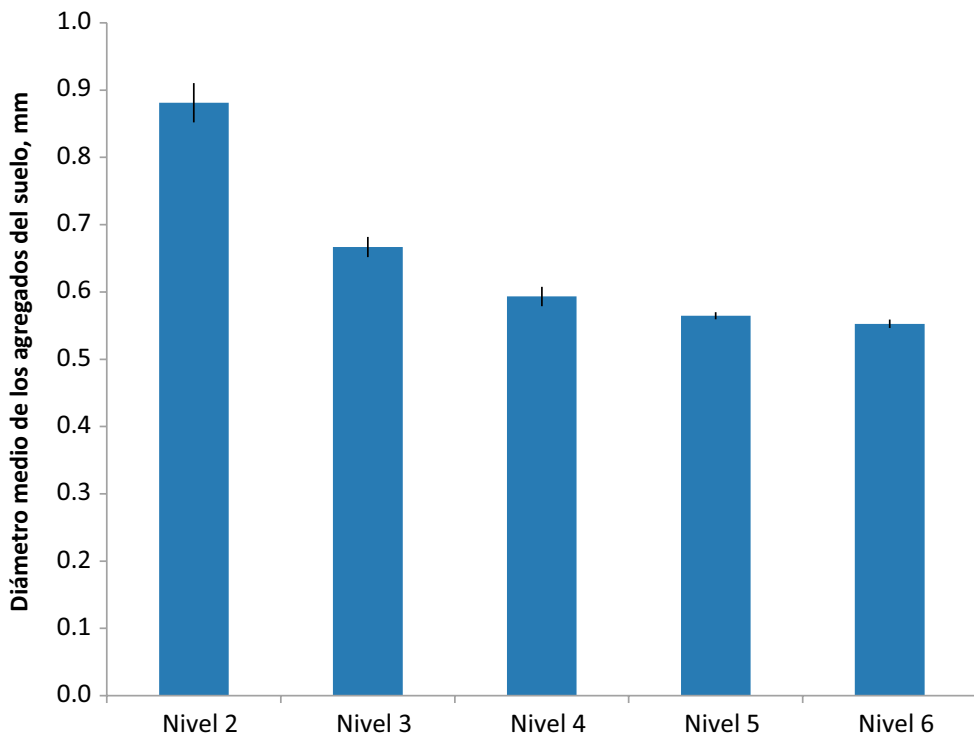


Figura 15.

Diámetro medio ponderado de los agregados del suelo para cada nivel de severidad del fuego en el suelo. Barras verticales, error estándar.

La estabilidad de los agregados del suelo es una importante propiedad física que refleja la capacidad de los agregados para persistir cuando son afectados por diferentes fuerzas disruptivas externas (Mataix-Solera *et al.*, 2011).

Está bien establecido que la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo (Benito y Díaz-Fierros, 1992; García-Corona *et al.* 2004; Mataix-Solera *et al.* 2011), la mineralogía del suelo (Giovannini *et al.* 1988), la repelencia al agua (Mataix-Solera y Doerr, 2004) y los microorganismos, especialmente los hongos (Six *et al.*, 2004) ejercen una fuerte influencia sobre la estabilidad de los agregados del suelo.

Se ha encontrado una progresiva disminución del diámetro medio en peso de los agregados del suelo (Fernández *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2019) en diferentes zonas quemadas del NO de España (Figura 15).

Esta reducción del tamaño de los agregados se relacionó de forma significativa y positiva con las pérdidas de suelo post-incendio (Fernández *et al.*, 2016).

En otros lugares muestreados fuera de Galicia (Fernández *et al.*, 2021), también se ha observado esa misma pauta (Figura 16).

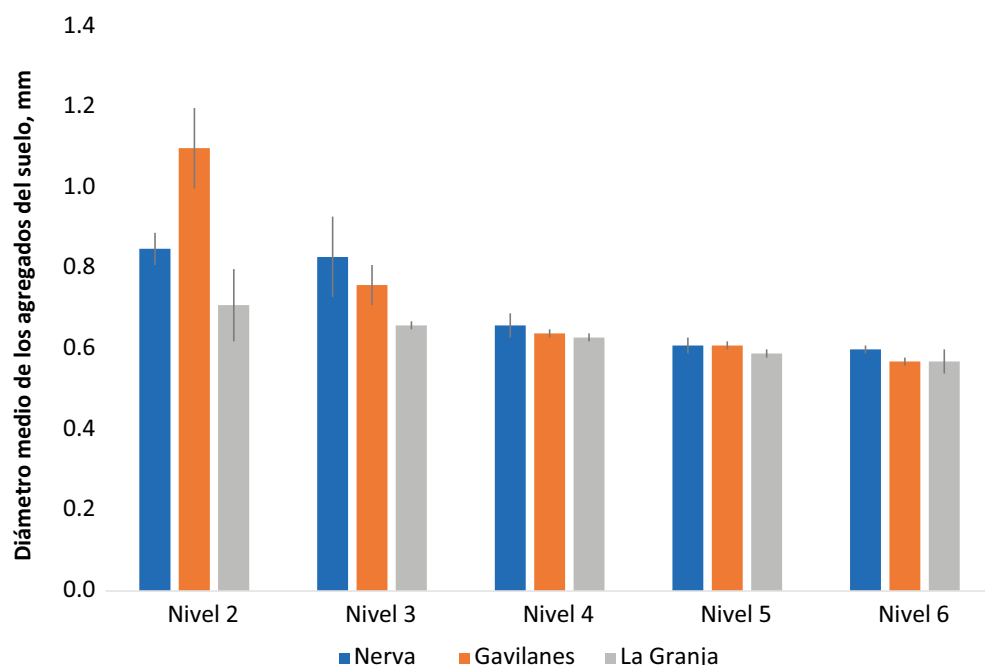


Figura 16.

Diámetro medio ponderado de los agregados del suelo para cada nivel de severidad del fuego en el suelo. Barras verticales, error estándar.

Repelencia al agua del suelo

La hidrofobicidad o repelencia al agua del suelo hace referencia a su dificultad para absorber el agua de la lluvia y se da de forma natural en muchos tipos de suelo y climas de todo el mundo (DeBano 2000; Doerr *et al.* 2000). Su importancia radica en que afecta a muchos procesos ecohidrológicos importantes como la infiltración, la evaporación, la formación de flujos preferentes, la escorrentía, la erosión del suelo y la disponibilidad de agua para las plantas, entre otros. Es ampliamente reconocido que algunas propiedades del suelo juegan un papel muy influyente en la repelencia al agua del suelo, como la textura (Giovannini y Lucchesi, 1983), la agregación (Mataix-Solera *et al.*, 2011), el contenido de materia orgánica y la composición química (Atanassova y Doerr, 2010; Girona-García *et al.*, 2018), la acidez, el tipo de suelo y la mineralogía de la fracción arcillosa (Mataix-Solera *et al.* 2008; Zavala *et al.* 2009), el contenido de agua (Dekker *et al.*, 2001) y la vegetación (Doerr *et al.* 2000, García-Corona *et al.*, 2004).

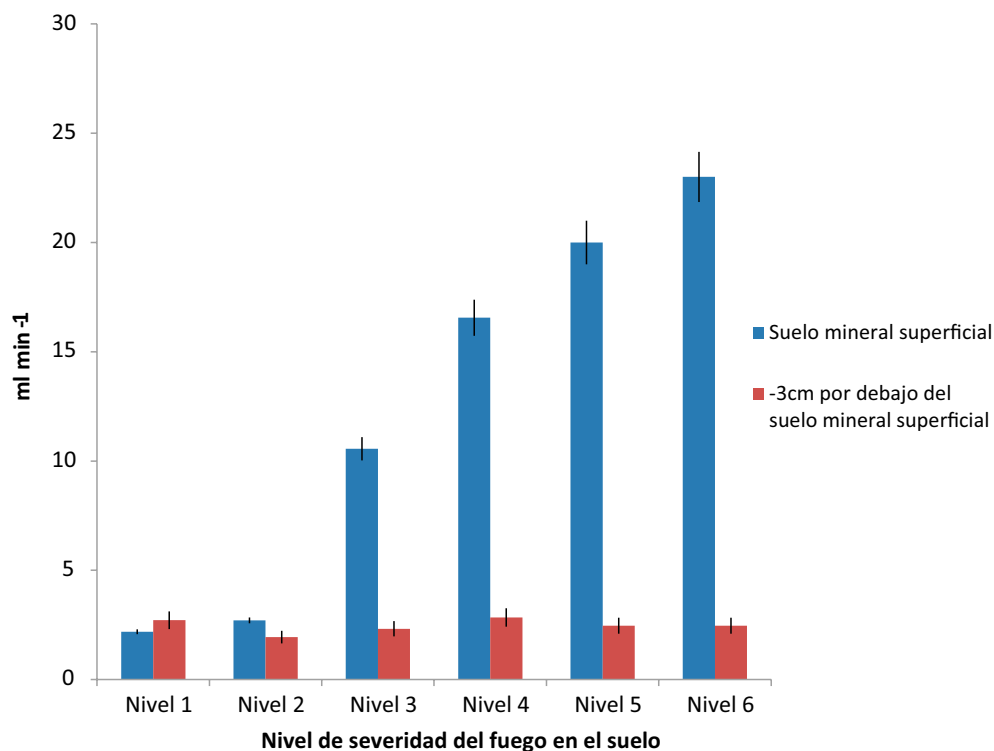


Figura 17.

Valores medios de la velocidad de infiltración relativa en el suelo superficial y 3 cm por debajo de la superficie del suelo para cada nivel de severidad del fuego en el suelo. Barras verticales, error estándar.

En estudios realizados en zonas afectadas por incendios forestales en Galicia se encontró que la repelencia al agua del suelo se destruía a niveles altos de severidad del fuego en el suelo, permaneciendo en el suelo subsuperficial (Figura 17). Este fenómeno puede así favorecer la erosión de ese suelo superficial desestructurado que ofrece menos resistencia a la escorrentía.

Esa misma tendencia se observó en los muestreos realizados en los incendios de Nerva, Gavilanes y La Granja en el suelo mineral superficial (Figura 18).

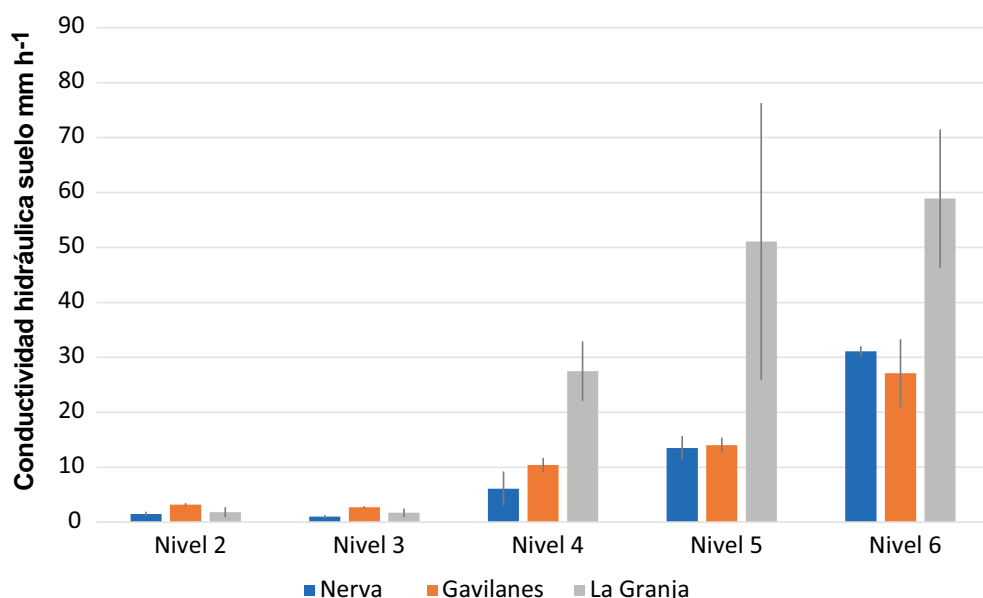


Figura 18.

Valores medios de la conductividad hidráulica del suelo superficial para cada nivel de severidad del fuego en el suelo en Nerva, Gavilanes y La Granja. Barras verticales, error estándar.

Carbono orgánico

El carbono orgánico del suelo es uno de los parámetros más sensibles al calentamiento provocado por los incendios forestales debido a su descomposición térmica y combustión, y se utiliza frecuentemente como indicador del grado de perturbación generado por el fuego (González-Pérez *et al.*, 2004; Knicker, 2007; Mataix-Solera *et al.*, 2011). Además, el carbono orgánico del suelo es un parámetro crucial, ya que juega un papel importante en la formación y estabilización de los agregados del suelo, en la capacidad de infiltración y en numerosas propiedades químicas y microbianas del suelo.

Vega *et al.* (2013b) encontraron una disminución gradual del carbono orgánico del suelo con la severidad de la quema del suelo usando la misma clasificación. Con este sistema de clasificación, se observaron reducciones medias relativas del contenido de carbono orgánico del suelo del 48 y 72% en los niveles de severidad del fuego en el suelo muy alto y extremo.

Esta respuesta probablemente se vio favorecida por los contenidos relativamente altos de carbono orgánico de los suelos gallegos (Calvo de Anta *et al.* 2015) pero se ha detectado también en otros lugares fuera de Galicia con menores contenidos de carbono en el suelo (Figura 19).

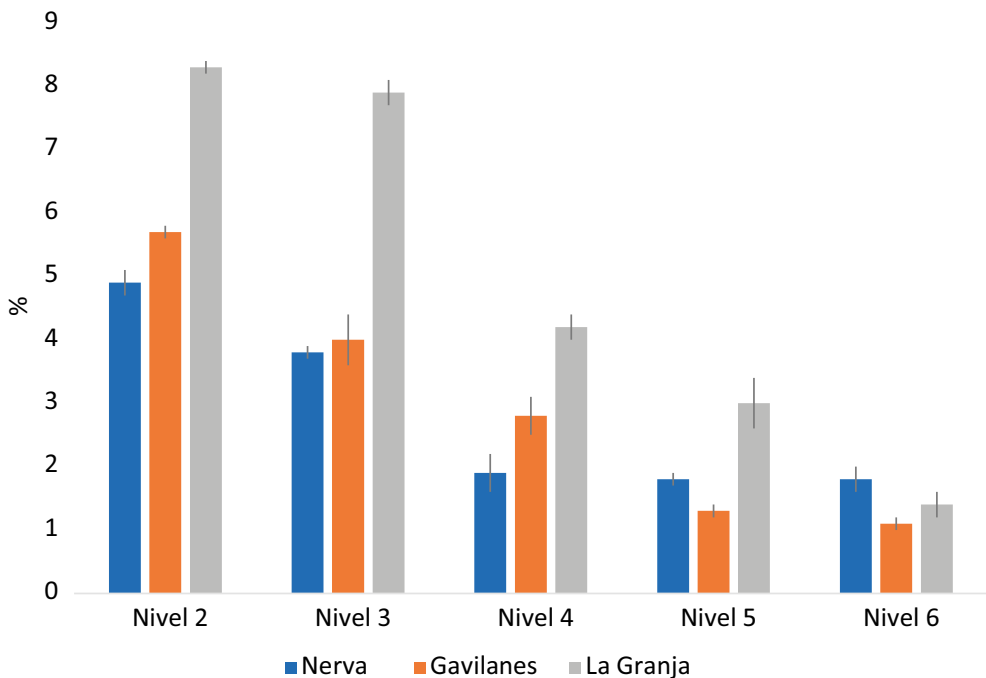


Figura 19.

Valores medios de contenido de carbono orgánico del suelo mineral superficial para cada nivel de severidad del fuego en el suelo en Nerva, Gavilanes y La Granja. Barras verticales, error estándar.

La clasificación visual de la severidad del fuego en el suelo tiene también una correspondencia con los cambios en la calidad de la materia orgánica del suelo. Se ha observado un aumento de los compuestos aromáticos y una disminución de los hidratos de carbono y productos alquílicos con el aumento de la severidad del fuego en el suelo (Merino *et al.*, 2014; 2018).

Erosión del suelo

En los apartados anteriores se han mostrado algunas evidencias de la relación entre los indicadores visuales y el grado de alteración de algunas propiedades del suelo, descriptoras de la erodibilidad del mismo. En consecuencia, los indicadores visuales simples de la severidad del fuego son también útiles predictores del riesgo de erosión del suelo post-incendio como se muestra en la Figura 20. La figura indica que se detecta un aumento de las pérdidas de suelo cuando la severidad del fuego en el suelo alcanza el valor 3 (suelos desnudos) con valores superiores a 50 Mg ha⁻¹ cuando la severidad del fuego en el suelo se acerca a 5.

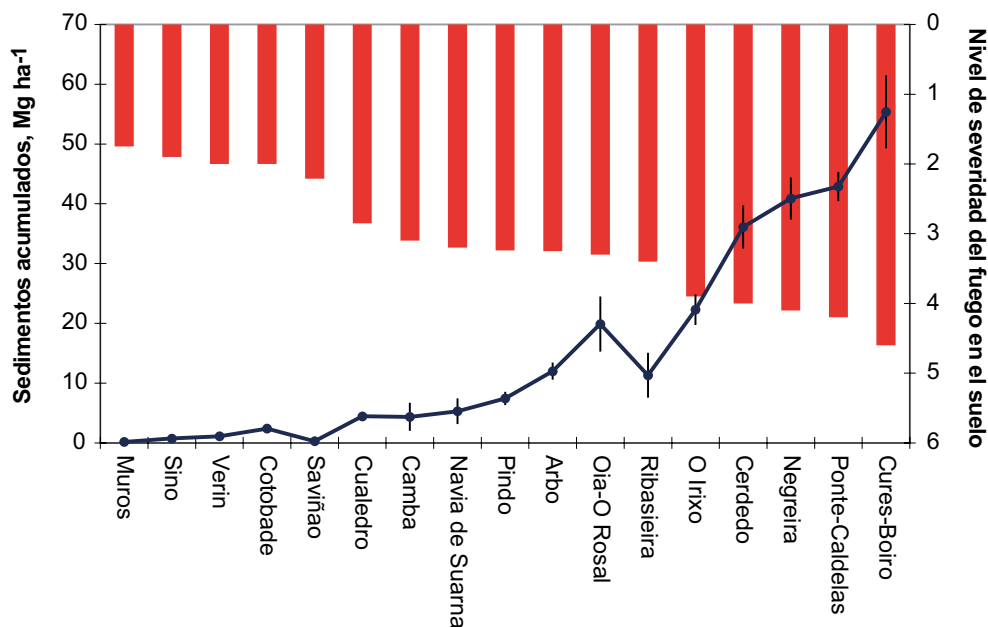


Figura 20.

Severidad del fuego en el suelo y pérdidas de suelo acumuladas durante el primer año tras el incendio en diferentes áreas quemadas en Galicia. Barras verticales, error estándar.

Diseño de muestreo



Figura 21.

Laderas incendiadas en As Neves (Pontevedra, 2017).

Para diseñar el muestreo in situ en el marco de un escenario de emergencia, la superficie a muestrear debe definirse según los criterios relacionados con la vulnerabilidad a los riesgos post-incendio. Dada la urgencia de las acciones a realizar para mitigar el riesgo hidrológico y erosivo, es preferible centrar todos los esfuerzos de inventario in situ en las zonas potencialmente más vulnerables.

El muestreo estratificado se utiliza para proporcionar una mayor precisión en las estimaciones, aumentando la densidad de las parcelas en las zonas potencialmente más importantes (vinculadas a la identificación de los valores en riesgo). En consecuencia, tanto la pedregosidad superficial como la pendiente y la cubierta vegetal juegan un papel importante en la vulnerabilidad potencial de las zonas afectadas. La zona debe limitarse en función de la relevancia de esta vulnerabilidad.

Por lo tanto, no se tendrán en cuenta las zonas con alta pedregosidad ($> 50\%$) ni las zonas con una pendiente $< 20\%$ en las que el riesgo de erosión es menor. Las zonas donde se han hecho labores de plantación recientemente



Figura 22.

Incendio de Meixideen la Sierra do Eixe (Ourense, 2016).

tampoco son prioritarias porque en ellas el riesgo de erosión después de incendio es bajo (Fernández *et al.*, 2019.)

Se identificarán los puntos dentro y fuera de la zona quemada que puedan verse afectados por la erosión: zona poblada, diferentes infraestructuras, embalses, captaciones de agua, zonas de riesgo de inundación...

Potencialmente, las zonas más vulnerables son los bosques y matorrales que han sufrido incendios de copa, ya que no les protegen las hojas caídas de las copas quemadas y la erosión depende únicamente de la severidad del fuego en el suelo (Fernández *et al.*, 2020). Se considera que el suelo está protegido de la erosión cuando más del 60-70% de su superficie está cubierta. Por lo tanto, con idea de ser lo más práctico y efectivo posible, el muestreo de la severidad del fuego en el suelo debe priorizarse en las áreas de matorral y en las arboladas que han sufrido fuego de copa. Esta estratificación puede basarse en índices espectrales para localizar los estratos de árboles afectados por los incendios de copas. La información obtenida a partir de las imágenes de satélite deberá ser validada in situ.



Figura 23.

Vegetación afectada por distintos niveles de severidad en el incendio de Nerva (Huelva, 2018).



Figura 24.

Laderas del incendio de Aljezur (Portugal, 2020) con alto grado de severidad en la vegetación.



Figura 25.

Alta severidad del fuego en la vegetación y suelo en área de matorral en el incendio de Arauxo (Ourense, 2017).



Figura 25.

Alta severidad del fuego en la vegetación y baja en el suelo en un área de matorral del incendio de La Granja (Segovia, 2019).



Figura 26.

Severidad moderada en la vegetación. Incendio de Xuño (A Coruña, 2016).
En estos lugares la hojarasca caída del arbolado soflamado protege al suelo.



Figura 27.

Severidad moderada en la vegetación. Incendio de Gavilanes (Ávila, 2019).
En estos lugares la hojarasca caída del arbolado soflamado protege al suelo.

Situación de parcelas de muestreo

Para la determinación del número de parcelas se utilizarán los criterios previstos en la guía “Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas” (Vega *et al.*, 2013a).

1. Superficie del incendio (ha)	1. 100	1. 500	> 1.000
1. Número de puntos de muestreo	1. 20	1. 50	> 100

Una vez determinada el área de muestreo (superficie de inventario), los estratos, según el caso, y el número de puntos de muestreo, la muestra se tomará sistemáticamente in situ, apoyándose en un patrón geométrico de malla cuadrada de $l=(A/n)^{0.5}$. Se sugiere utilizar parcelas circulares de 20 metros de radio.

Una aplicación SIG ajustará la malla, haciendo coincidir sus vértices con las coordenadas de la parcela, que serán revisadas in situ gracias a un dispositivo GPS. Para ello, se visualiza sobre la zona dañada la cobertura vegetal previa, la litología, la pendiente y la severidad en la vegetación, los valores en riesgo, mediante la obtención de capas de información geográfica (.shp), con valores ‘1’ o ‘0’, en función de qué ubicaciones de parcela son relevantes en cada estrato definido.

Tras localizar el centro de la parcela con un dispositivo GPS, se establecerán dos transectos de 40 metros de longitud, haciendo coincidir su punto medio con el centro de la parcela. Uno de los transectos se establecerá con un rumbo aleatorio y el otro será perpendicular al primero.

Estos transectos se definirán utilizando banderas de señalización y cinta métrica (Figura 28).



Figura 28 .

Para evaluar la severidad del fuego en el suelo, se localiza un cuadro de 30 x 30 cm en cada transecto cada 2 metros para determinar el valor dominante de los indicadores visuales de severidad del fuego. La ratio de pedregosidad superficial se estima visualmente localizando un 1 x 1 m cada 4 m en los transectos.

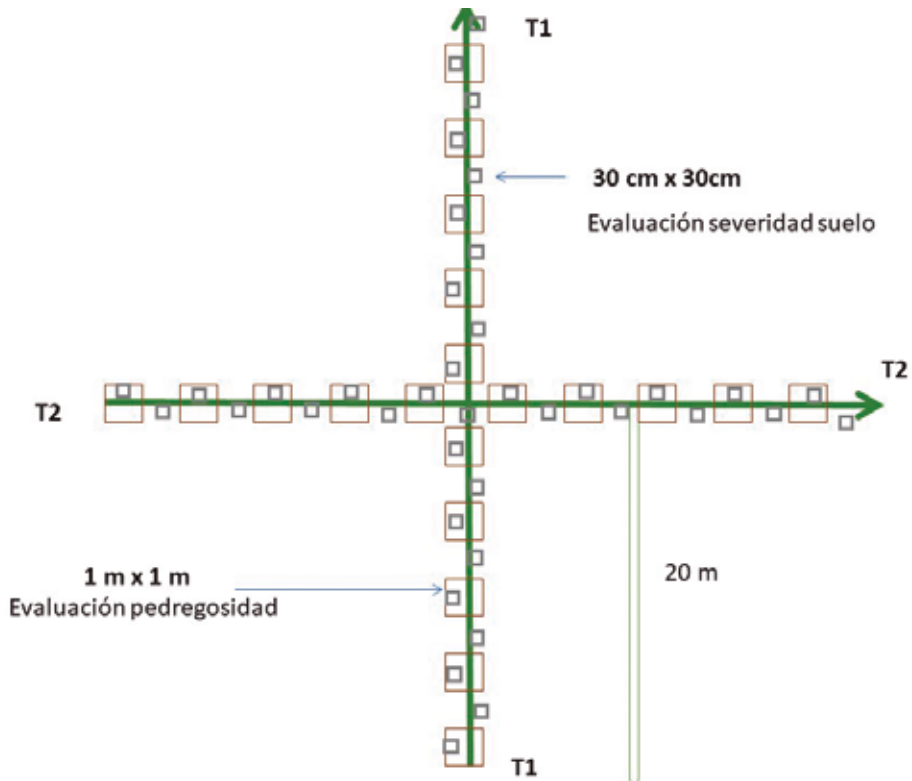


Figura 29.

Esquema de parcela para la evaluación de la severidad del fuego en el suelo.

ANEXOS

ANEXO 1.

Procesado y generación de mapa de severidad mediante SIG. Caso de estudio.

El presente anexo tiene como objetivo ejemplificar el uso de la metodología de evaluación de la severidad del fuego que se presenta en este documento. Para ello, se seleccionó un caso de estudio, el incendio de Guadarrama, y sobre él se aplicaron las fases que se definen en la metodología: evaluación previa de severidad post-incendio y factores de peligro, diseño de muestreo sobre el terreno, ejecución de muestreo en campo y generación de mapas de severidad. Los resultados de la aplicación de esta metodología permitirán identificar aquellas áreas para las que las actuaciones de estabilización post-incendio debería ser prioritarias.

Incendio de Guadarrama, 2019

El incendio de Guadarrama se declaró el día 4 de agosto de 2019 en el término municipal del Real Sitio de San Ildefonso (Segovia, Comunidad Castilla y León). El incendio se desarrolló de forma rápida debido a la fuerte pendiente, éste se inició en la base de la ladera, y fue conducido por la topografía hasta la cresta del sistema montañoso donde se encuentra el límite con la Comunidad de Madrid.

En total resultaron afectadas alrededor de 353 hectáreas, de las cuales más de 250 pertenecen al Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. El incendio quemó áreas de *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en las cotas inferiores mientras que las zonas más altas estaban dominadas por matorral y afloramientos rocosos.

La evaluación inicial del área quemada, así como el posible daño a los valores más próximos al incendio, evidenciaron la necesidad de aplicar la presente metodología de evaluación de los efectos post-incendio potenciales y de definición de actividades de mitigación de dicho riesgo.

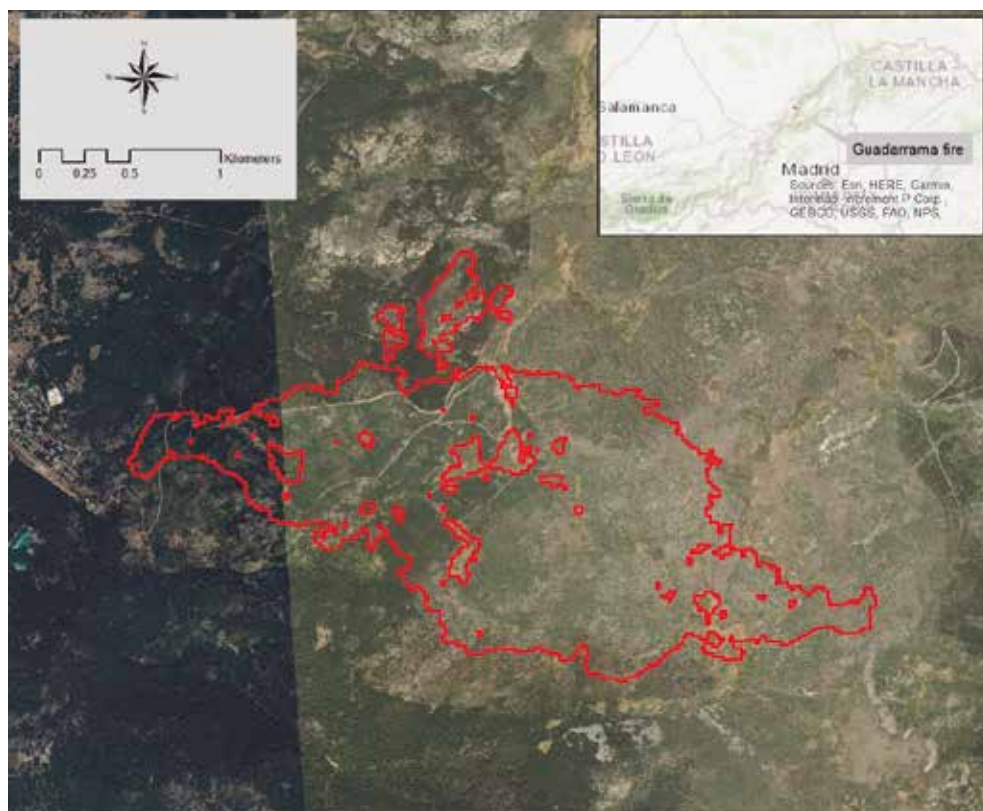


Figura 30.

Perímetro final del área quemada por el incendio de Guadarrama.

Una vez definidos los límites del área quemada, en este caso mediante teledetección, ésta fue evaluada acorde a los factores que determinan la prioridad de tratamiento en la presente metodología. En primer lugar, se evaluó la topografía del área incendiada a través del cálculo de la pendiente. Las zonas con pendientes inferiores al 20 % fueron descartadas para una posible implementación de actuaciones, ya que independientemente de la severidad alcanzada se considera que el riesgo de un aumento en las pérdidas de erosión post-incendio es menor. Las pendientes superiores al 20 % fueron clasificadas en dos categorías, con el 40% como punto de corte.

Al criterio de pendiente se superpuso el criterio de severidad del fuego, evaluado mediante teledetección. Este segundo criterio tiene como objetivo determinar aquellas partes del territorio que podrían ser más susceptibles a un incremento de erosión post-fuego debido a una mayor consunción de la vegetación. Existen dos alternativas en cuanto al cálculo de este segundo factor: la primera consiste en el cálculo del índice dNBR para el área incendiada como la

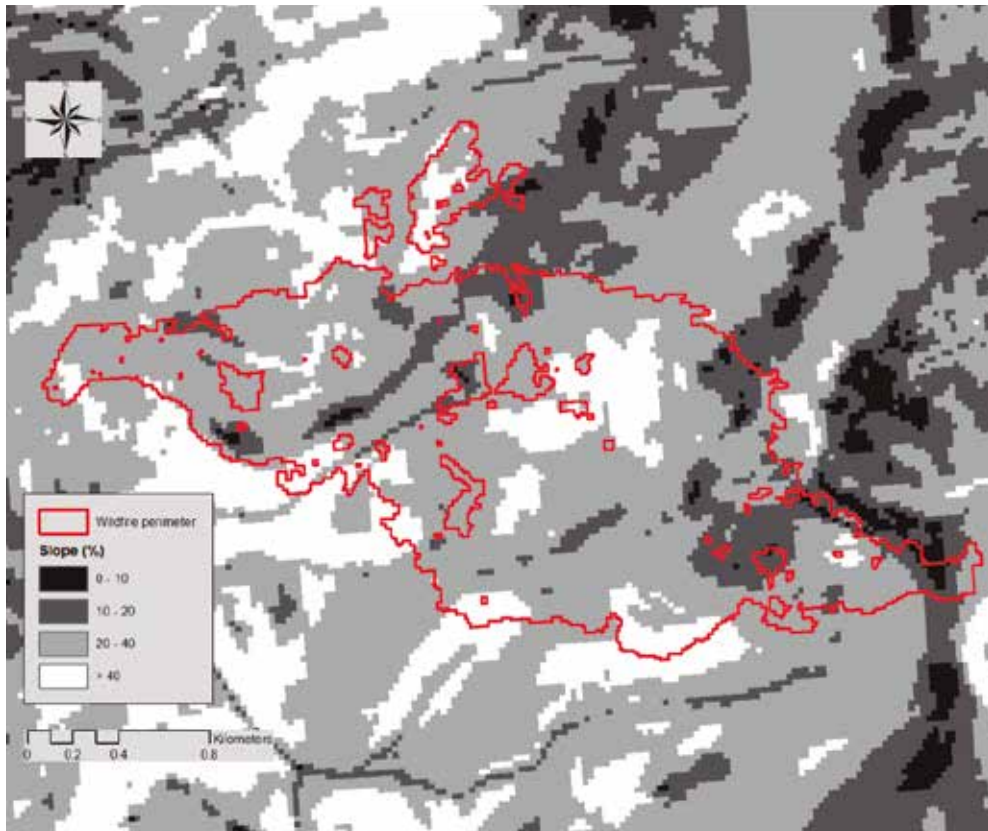


Figura 31.

Rangos de pendiente para el área de interés en el incendio de Guadarrama.

diferencia entre el índice NBR antes del incendio y el mismo índice tras la ocurrencia. En el desarrollo del presente proyecto se introdujo una modificación a dicho índice al combinarlo con el Burned Area Index (BAI), que permitió caracterizar mejor la ocurrencia de grados moderados y altos sobre la vegetación. La segunda alternativa consiste en emplear el índice NBR post-incendio como indicador de cobertura vegetal tras la ocurrencia del fuego.

El índice combinado dNBR+BAI permite clasificar el territorio afectado acorde a los umbrales determinados con la calibración basada en medición en campo realizada en el desarrollo de este proyecto, lo cual da como resultado una evaluación rápida de la severidad del incendio. De modo similar a la clasificación de niveles de severidad del índice dNBR, el objeto de este análisis es la selección de las clases de severidad 2 (moderado) y 3 (alto), ya que son estas categorías las que presentan en su mayor parte consunción total o casi total de la vegetación y dejan el suelo desprotegido.

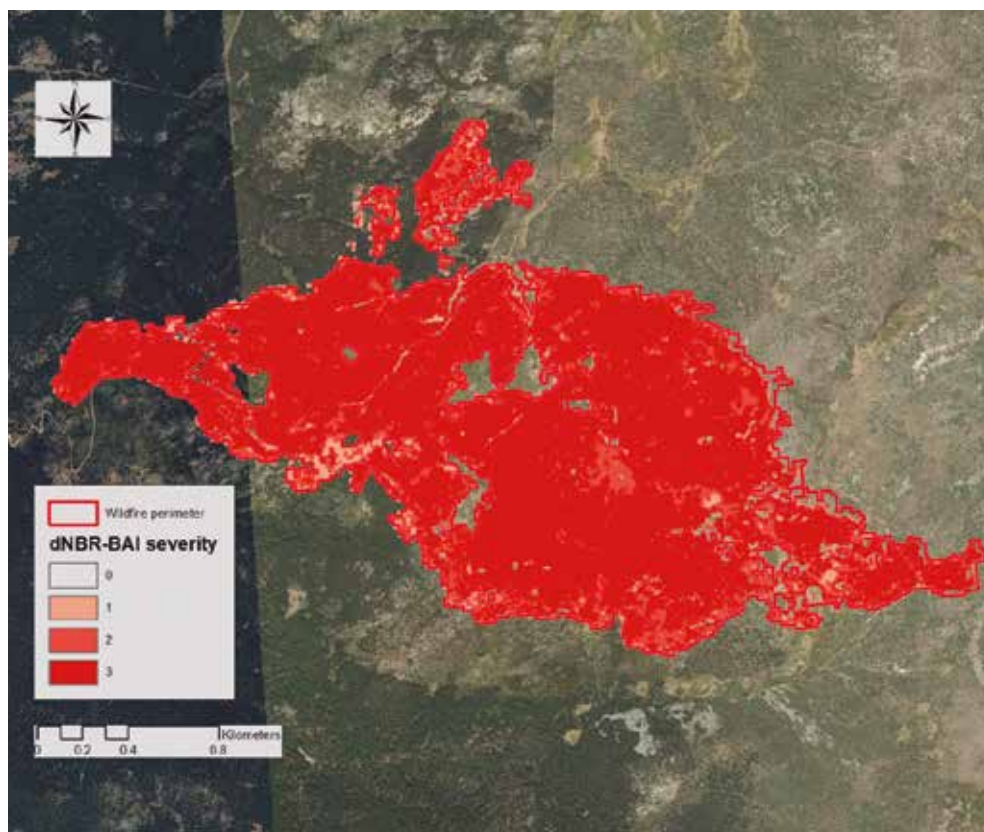


Figura 32. Severidad del fuego sobre la vegetación para el perímetro del incendio de Guadarrama.

La superposición de los factores pendiente y severidad (dNBR+BAI) permitió descartar áreas que no serían vulnerables a consecuencias post-incendio, debido a la baja pendiente, a la baja severidad o bien a ambos a la vez. Al mismo tiempo, las áreas prioritarias para la realización de una evaluación sobre el terreno fueron identificadas y demarcadas. El resultado de dicha superposición de factores se muestra en la figura siguiente, que indica las áreas que deben ser propuestas para la evaluación en campo de la severidad del fuego en el suelo.

La combinación de los factores pendiente y severidad generó dos categorías de área quemada en función de su prioridad para realizar evaluación sobre el terreno. La categoría número 2 corresponde a áreas donde se dan los valores máximos de los criterios de decisión al mismo tiempo, es decir, con alto nivel de severidad y pendientes mayores del 40%, mientras la categoría número 1 se corresponde con lugares que no presentan el valor máximo de alguno de ambos criterios (con pendientes entre el 20 y el 40% o severidades moderadas).

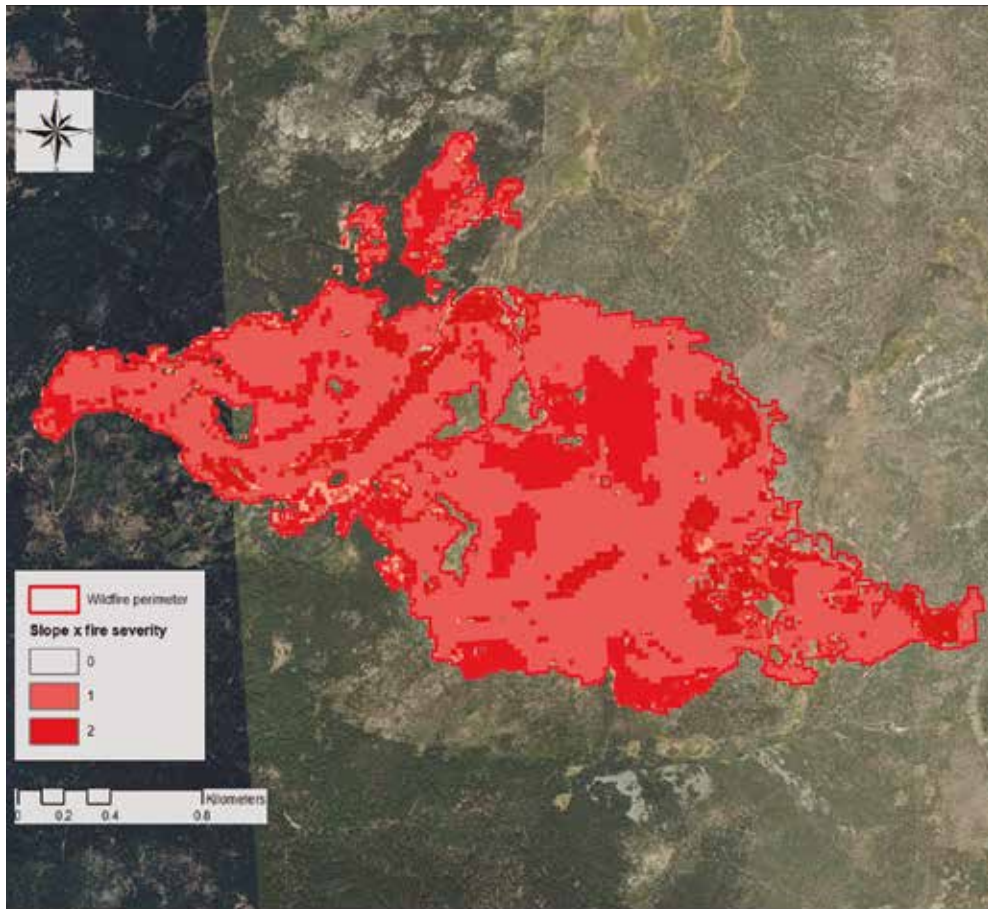


Figura 33.

Áreas identificadas para evaluación sobre el terreno, conforme a su prioridad media (1) y alta (2).

De acuerdo con las recomendaciones definidas en esta guía sobre la intensidad de muestreo sobre el terreno, se diseñó sobre las áreas prioritarias antes identificadas un muestreo aleatorio. Para ello se tuvo en cuenta el tamaño total del incendio y el nivel de prioridad de cada una de las zonas, para lo cual se ajustó el esfuerzo de muestreo en función de éste.

El diseño del muestreo figura en la siguiente imagen, abarcando las zonas del territorio con potencial erosión post-incendio. Un total de 45 parcelas fueron propuestas para la evaluación sobre el terreno.

Las parcelas de evaluación propuestas en el diseño del muestreo fueron realizadas sobre el terreno en la campaña de evaluación “in situ”.

Las parcelas fueron evaluadas de acuerdo con la metodología definida en la presente guía, y permitió la obtención de un valor medio de severidad sobre el suelo representativo del área donde éstas fueron instaladas. Además de ello, se pudo validar el mapa de severidad de la vegetación obtenido por teledetección.

Los valores puntuales de severidad media para cada parcela fueron introducidos en la base de datos de información geográfica y analizados de nuevo en un entorno SIG. El empleo de técnicas de interpolación espacial, en este caso interpolación spline, permitió extender los valores puntuales recogidos para cada parcela a la totalidad del área de interés. En la figura 35 se presenta el valor de severidad sobre el suelo para la extensión del área de interés afectada por el incendio.

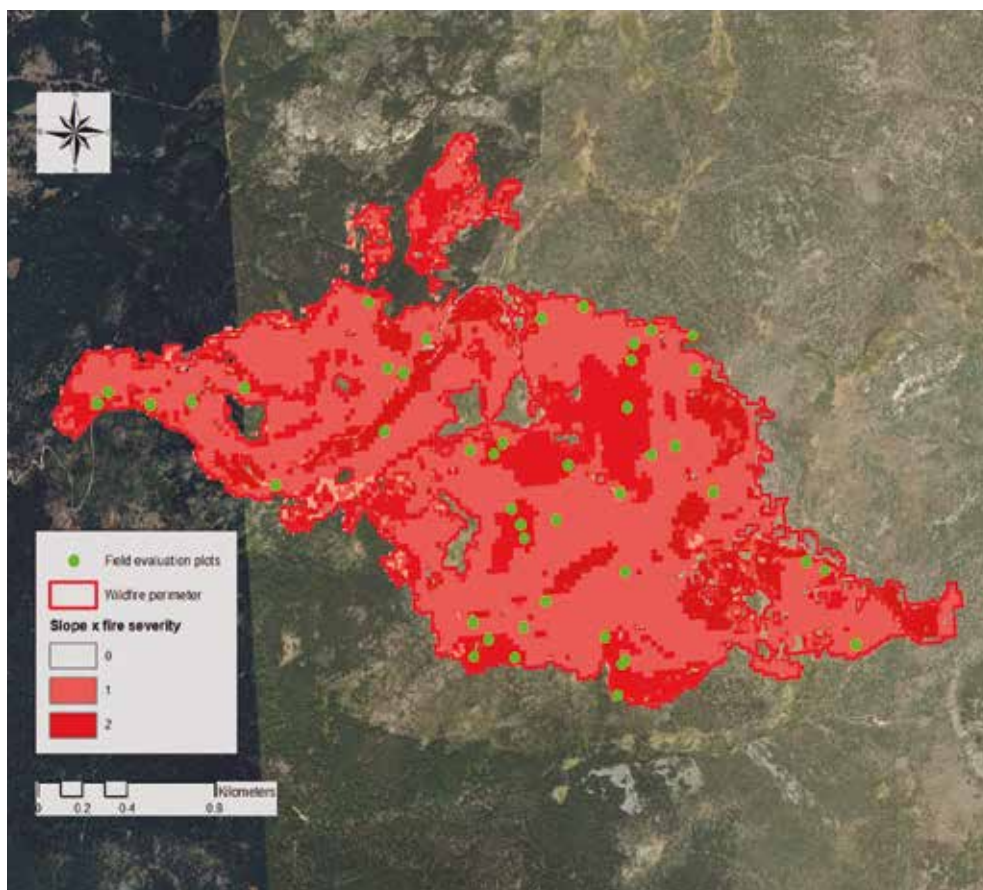


Figura 34.

Distribución de las parcelas de evaluación sobre el terreno dentro del área afectada.

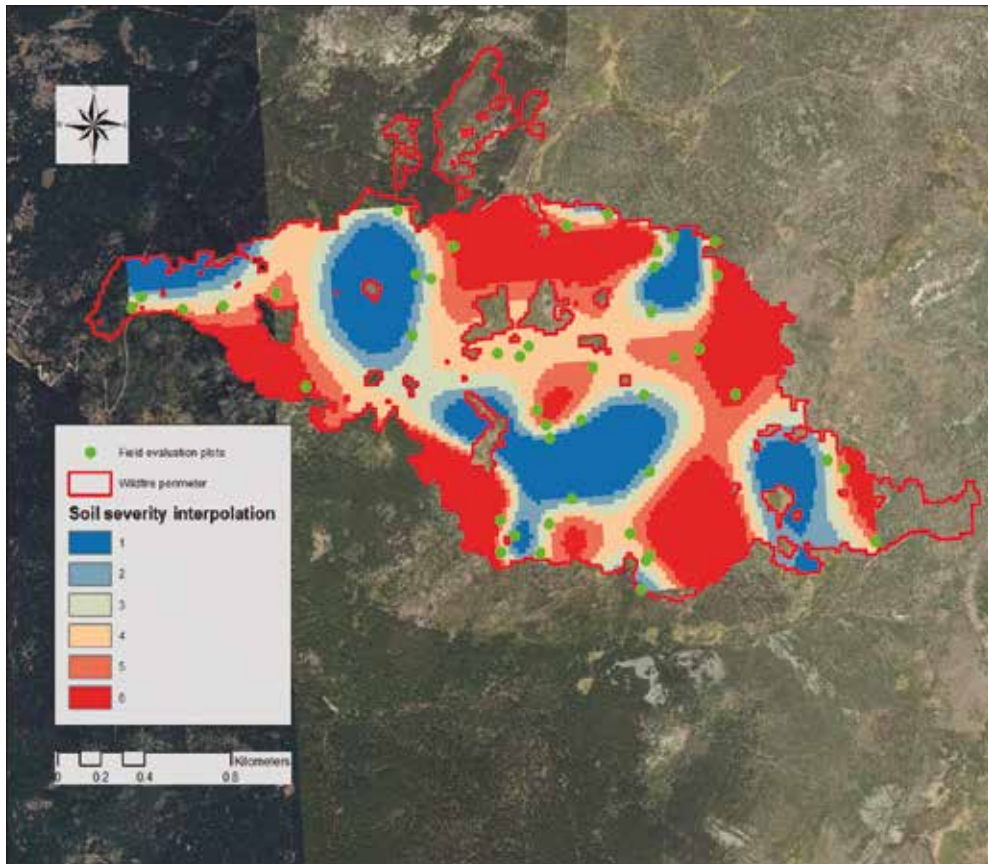


Figura 35.

Severidad del fuego sobre el suelo estimada para la superficie del incendio.

El resultado final de la aplicación de la metodología de evaluación en este caso de estudio es la obtención de un plano de recomendaciones de aplicación de medidas de estabilización.

El plano de severidad sobre el suelo fue empleado para diferenciar las áreas que presentan erosión potencial (severidad mayor de 3,5) de aquellas áreas que no suponen un riesgo alto.

Esta capa de información fue confrontada con el plano de los criterios de severidad sobre la vegetación y pendiente, de modo que finalmente se obtuvieron 3 posibles categorías: áreas no propuestas para actuaciones de estabilización (por ausencia de severidad sobre el suelo, vegetación o porcentaje mínimo de pendiente), áreas propuestas para actividad de

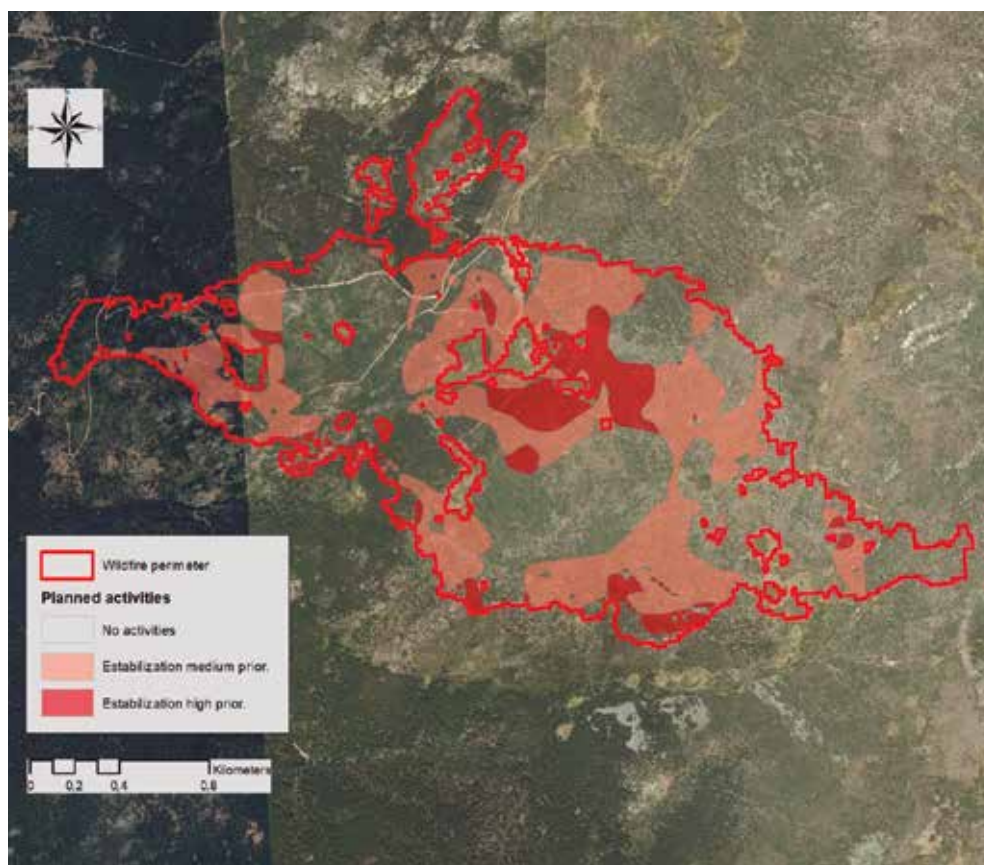


Figura 36.

Plano de actuaciones propuestas para el área de interés de este caso de estudio, por nivel de prioridad.

estabilización con prioridad media (nivel de severidad sobre el suelo mayor de 3,5 y pendiente o severidad sobre la vegetación moderada) y áreas propuestas para actividad de estabilización con prioridad alta (los tres criterios evaluados coinciden en valores altos).

ANEXO 2.

Medición de la repelencia al agua del suelo

La repelencia al agua es una propiedad de los suelos que reduce su capacidad de infiltración y que tiene importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas. La repelencia al agua en los suelos es de fácil determinación. Se resume a continuación uno de los métodos más simples.

Figura 37.

Ejemplo de suelo repelente al agua (Fotografía Martinho Martins).



Test del tiempo de penetración de la gota de agua

El test del tiempo de penetración de la gota de agua (Water Drop Penetration Time, WDPT) consiste en colocar una gota de agua sobre la superficie del suelo, registrando el tiempo que necesita el agua para penetrar en el suelo.

De esa manera el WDPT relaciona la hidrofobicidad con las propiedades hidrológicas del suelo, ya que el tiempo requerido por la infiltración de las gotas de lluvia afecta de manera importante a la generación de escorrentía superficial.

Si la repelencia al agua del suelo se mantuviese constante, independientemente de la duración del contacto entre la gota de agua y la superficie del suelo, la gota se infiltraría instantáneamente, en el caso de un suelo hidrofílico, o permanecería en la superficie hasta su evaporación, en el caso de un suelo repelente al agua.

La medida puede realizarse sobre la superficie inalterada del suelo in situ, lo que permite llevar a cabo comparaciones bajo condiciones naturales variables. En este caso, es necesario retirar cuidadosamente los restos orgánicos y residuos que puedan interferir en la medida, dejando expuesta la superficie mineral del suelo.



Figura 38.

Medición de repelencia al agua del suelo en campo. Ejemplo de suelo hidrofóbico e hidrofílico. (Fotografías Martinho Martins y Oscar García-Pelayo).

Posteriormente, se registrará el tiempo que necesita cada gota para su infiltración, y se tomará como representativo de cada suelo el promedio del tiempo requerido por el número de gotas depositadas. Cuando el tiempo de penetración es largo, las gotas de agua sufren evaporación y pueden empezar a deformarse, lo que ocasiona que el WDPT no pueda utilizarse de manera absoluta, sino que es necesario utilizar un sistema de clasificación.

Tabla 1.

Grado de repelencia de los suelos según los tiempos requeridos para la determinación WDPT.

Grado de persistencia	Valores de WDPT(s)	Nivel de persistencia de Repelencia al agua
0	<5	No repelente al agua
1	5-60	Ligeramente repelente al agua
2	60-600	Fuertemente repelente al agua
3	600-3600	Severamente repelente al agua
4	>3600	Extremadamente repelente al agua

Bibliografía

- Atanassova, I., Doerr, S., 2010. Organic compounds of different extractability in total solvent extracts from soils of contrasting water repellency. *European Journal of Soil Science*, 61, 298-313.
- Benito, E., Díaz-Fierros, F., 1992. Estudio de las sustancias estabilizantes de la agregación en suelos ricos en materia orgánica. I. Composición de los agregados estables. *Agrochimica*, 36, 324-339.
- Calvo de Anta, R., Luis, E., Casas, F., Galiñanes, J.M., Matilla, N., Macias, F., Camps, M., Vázquez N. 2015. Soil organic carbon in northern Spain (Galicia, Asturias, Cantabria and País Vasco). *Spanish Journal of Soil Science* 5, 41-53.
- De Bano L.F. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, 231-232, 195-206.
- Dekker, L.W. , Doerr, S.H., Oostindie, K. Ziogas, A.K., Ritsema, C.J. 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Science Society of America Journal*. 65, 1667-1674.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33-65.
- Fernández, C., Fernández-Alonso, J.M., Vega, J.A., Fontúrbel, T., Llorens, R., Sobrino, J.A., 2021. Exploring the use of spectral indices to assess alterations in soil properties in pine stands affected by crown fire in Spain. *Fire Ecology*, 17, 2.

- Fernández, C., Fontúrbel, T., Vega, J.A., 2019a. Effects of pre-fire site preparation and post-fire erosion barriers on soil erosion after a wildfire in NW Spain. *Catena*, 172, 691-698.
- Fernández, C., Fontúrbel, T., Vega, J.A., 2019b. Wildfire burned soil organic horizon contribution to runoff and infiltration in a *Pinus pinaster* forest soil. *Journal of Forest Research*, 24, 86-92.
- Fernández, C., Vega, J.A., 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, 928-935.
- Fernández, C., Vega, J.A., Fontúrbel, T., 2016. Reducing post-fire soil erosion from the air: Performance of heli-mulching in a mountainous area on the coast of NW Spain. *Catena*, 147, 489-495.
- Fernández, C., Vega, J.A., Fontúrbel, T., 2020. Comparison of the effectiveness of needle cast and straw helmulching for reducing soil erosion after wildfire in NW Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 535-541.
- García-Corona, R., Benito, E., de Blas, E., Varela, M.E., 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire.*, 13, 195-199.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. *Soil Science* 136, 231-236.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* 146, 255-262.
- Girona-García, A., Ortiz-Perpiñá, O., Badía-Villas, D., Martí-Dalmau, C. 2018. Effects of prescribed burning on soil organic C, aggregate stability and water repellency in a subalpine shrubland: variations among sieve fractions and depth. *Catena* 166, 68-77.
- González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G., Knicker, H., 2004. The effect of fire on soil organic matter – a review. *Environment Internacional* 30, 855-870.
- Jain, T.B., Pilliod, D.S., Graham, R.T., Lentile, L.B., Sandquist, J.E., 2012. Index for Characterizing Post-Fire Soil Environments in Temperate Coniferous Forests. *Forests*, 3.
- Keeley, J.E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 116-126.
- Knicker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85, 91-118.
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M.S., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morgan, P., Lewis, S.A., Gessler, P.E., Benson, N.C., 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15, 319-345.
- Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in south-eastern Spain. *Geoderma* 118, 77-88.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Jordán, M.M., Dlapa, P., Tessler, N., Wittenberg, L., 2008. Can terra rossa become water repellent by burning? A laboratory approach. *Geoderma*, 147, 178-184.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M., 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109, 44-60.
- Merino, A., Ferreira, A., Salgado, J., Fontúrbel, T., Barros, N., Fernández, C., Vega J.A., 2014. Use of thermal analysis and solid-state ¹³C CP-MAS NMR spectroscopy to diagnose organic matter quality in relation to burn severity in Atlantic soils. *Geoderma* 226-227, 376-386.
- Merino, A., Fontúrbel, M.T., Fernández, C., Chávez-Vergara, B., García-Oliva, F., Vega, J.A. 2018. Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate. *Science of the Total Environment* 627, 622-632.
- Morgan, P., Keane, R.E., Dillon, G.K., Jain, T.B., Hudak, A.T., Karau, E.C., Sikkink, P.G., Holden, Z.A., Strand, E.K., 2014. Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 23, 1045-1060.

Neary, D.G., Ryan, K.C., De Bano, L.F., 2005. Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79, 7-31.

Vega, J.A., Fontúrbel, T., Fernández, C., Arellano, A., Díaz-Raviña, M., Carballas, T., Martín, A., González-Prieto, S., Merino, A., Benito, E., 2013a. Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas: Guía para su planificación en Galicia Santiago de Compostela.

Vega, J.A., Fontúrbel, M.T., Merino, A., Fernández, C., Ferreiro, A., Jiménez, E., 2013b. Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. *Plant and Soil*, 369, 73-91.

Zavala, L.M., González, F.A., Jordán, A., 2009. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*, 152, 361-374.



Trabajo realizado en el marco del proyecto EPyRIS (SOE2/P5/E0811)
del programa INTERREG Vb Sudoe.