



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Evaluación de la severidad del fuego en el suelo después de incendio en pinares del centro y sur de España

FERNÁNDEZ FILGUEIRA, C.¹, FERNÁNDEZ ALONSO, J.M.¹, SOBRINO RODRÍGUEZ, J.A.², LLORENS COMPANY, R.²

¹ Centro de Investigación Forestal de Lourizán. Xunta de Galicia. Carretera de Marín, km 4.36153. Pontevedra

² Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia.

Resumen

Los incendios forestales pueden causar además de la pérdida de vegetación, cambios en la respuesta hidrológica de los suelos, en particular en las zonas afectadas por alta severidad. Sin embargo, sigue siendo difícil establecer las relaciones entre la severidad del fuego y las propiedades del suelo que determinan la infiltración. La mayoría de las clasificaciones utilizadas para determinar la severidad del fuego tienen en cuenta los efectos combinados en la vegetación y el suelo. Sin embargo, investigaciones realizadas en el NW de España han indicado que ese análisis debe hacerse por separado para una mejor planificación de las tareas de rehabilitación y restauración. Este trabajo se ha llevado a cabo en tres zonas de pinar afectadas por incendio en 2018 y 2019: Nerva en Huelva, Gavilanes en Ávila y La Granja en Segovia. Se ha evaluado la severidad del fuego en el suelo en campo y se han recogido muestras de suelo en función de su nivel de severidad para analizar la conductividad hidráulica en laboratorio. Los resultados indican una respuesta significativa a la severidad que indica la factibilidad de uso de esos indicadores para la planificación de los trabajos de estabilización del suelo después de incendio.

Palabras clave

Índices espectrales, erosión, indicadores visuales, erodibilidad.

1. Introducción

Los incendios forestales son la principal perturbación que amenaza a los bosques en Europa (SAN MIGUEL et al., 2018). La cuantificación de los efectos de los incendios es fundamental para entender los impactos ecológicos del fuego, incluyendo la evaluación de las necesidades de rehabilitación de los ecosistemas o la planificación de acciones de mitigación para reducir el riesgo hidrológico-erosivo (MOODY et al., 2016). El aumento de la escorrentía y la erosión del suelo es una de las principales consecuencias de los incendios forestales y depende en gran medida de la severidad del fuego en el suelo (VEGA et al. 2005; FERNÁNDEZ y VEGA 2016; SCHMEER et al., 2018; FERNÁNDEZ et al., 2020). Sin embargo, la relación entre las alteraciones en las propiedades del suelo que controlan la infiltración y el grado de severidad del fuego en el suelo sigue no está totalmente resuelto (MOODY et al. 2013).

Los dos índices más extensamente usados para caracterizar la severidad son dNBR y su formarelativizada, RdNBR, a partir de imágenes Landsat. Ambos están basados en el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) (VAN WAGTENDONK et al., 2004; KEY y BENSON, 2006; LENTILE et al., 2006; HUDAK et al., 2007; HOLDEN et al., 2009; DE SANTIS y CHUVIECO, 2009; MILLER et al., 2009; HARRIS et al., 2011; VERAVERBEKE et al., 2012). En la mayor parte de esos trabajos el testado de los índices espectrales con mediciones de severidad del fuego en campo se hace siguiendo el protocolo de CBI (*Composite Burn Index*). El CBI es un índice cualitativo que computa el efecto del fuego en los estratos de suelo y vegetación de forma conjunta (KEY y BENSON, 2006). Sin embargo, su uso es controvertido y algunos autores han destacado la necesidad de evaluar por separado la severidad del fuego en la vegetación y en el suelo de manera independiente, ya que

estos dos componentes de los ecosistemas pueden verse afectados por los incendios forestales en distinto grado en función de la estructura de la masa, los combustibles y el comportamiento del fuego (JAIN et al. 2004; FERNÁNDEZ et al., 2020). Más aún, en masas arboladas el riesgo de erosión es mayor en áreas afectadas por fuego de copa en comparación con aquellas en las que las copas de los árboles sólo están soflamadas, ya que la caída de acículas en las semanas siguientes al incendio lo protegen de la acción de las lluvias, favoreciendo la infiltración de la lluvia y, por tanto, reduciendo la cantidad de suelo perdido por erosión post-incendio (CERDÁ y DOERR 2008; FERNÁNDEZ et al. 2020). Por lo tanto, las zonas en las que la evaluación de la severidad del fuego en el suelo es crítica para tomar medidas urgentes de mitigación de la erosión del suelo tras el incendio son aquellas en las que la vegetación se consume casi por completo durante el incendio. Sin embargo, su evaluación tras el incendio sigue dependiendo casi por completo de los muestreos de campo, ya que las relaciones entre los índices espectrales y la severidad del fuego en el suelo han sido escasamente exploradas hasta ahora (SOBRINO et al., 2019; LLORENS et al., 2022) y se han hecho pocos intentos de cuantificar la alteración de las propiedades del suelo por el fuego mediante índices espectrales (MOODY et al., 2016).

Los cambios posteriores al incendio en las propiedades físicas del suelo son importantes para controlar la magnitud de la respuesta hidrológica a las precipitaciones (WIETING et al., 2017). La severidad del fuego altera el grado y persistencia de la repelencia al agua del suelo (por ejemplo, DOERR et al., 2000; HUFFMAN et al., 2001; LEWIS et al., 2006), y la capacidad de infiltración del suelo suele disminuir en magnitud (por ejemplo, MOODY y EBEL, 2012; EBEL et al., 2016; MOODY et al., 2016). La alteración pronunciada de la estabilidad de los agregados del suelo se ha asociado con una alta severidad del fuego en el suelo (MATAIX-SOLERA et al., 2011) y con la reducción del contenido de carbono orgánico del suelo (VEGA et al., 2013) que es un factor clave que afecta al mantenimiento de la estructura del suelo en suelos de textura gruesa ricos en materia orgánica (BENITO y DÍAZ-FIERROS, 1992). Además, la disminución de la estabilidad de los agregados del suelo se ha relacionado con una mayor susceptibilidad a la erosión en suelos quemados (FERNÁNDEZ et al., 2016). La clasificación de severidad del fuego en el suelo propuesta por VEGA et al. (2013) y FERNÁNDEZ y VEGA (2016) refleja adecuadamente los cambios en un conjunto de parámetros del suelo, incluyendo la erosión del mismo (VEGA et al., 2013; FERNÁNDEZ y VEGA, 2016; VEGA et al., 2018; FERNÁNDEZ et al., 2019a, b; FERNÁNDEZ et al., 2020). Actualmente es utilizado operativamente por el Servicio Forestal de Galicia en la planificación de las medidas de mitigación del riesgo de erosión (FERNÁNDEZ et al., 2019 c) y merece la pena comprobar si puede ser utilizado también en otras regiones donde estas actuaciones no son habituales por ahora.

2. Objetivos

El presente estudio explora la relación entre una clasificación de un índice de severidad del fuego en el suelo basada en signos visuales utilizada operacionalmente en el noroeste de España y tres propiedades del suelo relacionadas con la susceptibilidad a la erosión del suelo después del fuego: la conductividad hidráulica saturada como una variable subrogada de la repelencia al agua del suelo, el contenido de carbono orgánico del suelo y el diámetro medio en peso de los agregados del suelo. La cuantificación de estas variables permite convertir el índice en una variable continua y explorar su correlación con un conjunto de índices espectrales para cuantificar el grado de alteración de las propiedades del suelo tras el incendio en tres masas de pinar afectadas por incendio en el centro y sur de España.

3. Metodología

El estudio se realizó en tres zonas forestales afectadas por incendios forestales en el sur y centro de España durante los veranos de 2018 y 2019.

- i) El incendio de Nerva (Huelva) de agosto de 2018. Las masas forestales afectadas estaban dominadas principalmente por *Pinus pinea* L. Los suelos son cambisoles eútricos desarrollados sobre pizarras con textura franco-arenosa.
- ii) El incendio de Gavilanes (Ávila) de junio de 2019 afectando a masas de *Pinus pinaster* Ait. Los suelos son cambisoles y leptosoles desarrollados sobre granito con textura franco-arenosa.
- y iii) La Granja (Segovia) que afectó a masas de *Pinus sylvestris* L. en julio de 2019. Los suelos son cambisoles y leptosoles desarrollados sobre gneis con textura franco-arenosa.

3.1 Muestreo de campo

En cada una de las zonas de estudio se localizaron parcelas en las zonas en las que la vegetación se había consumido por completo (considerando un tamaño mínimo equivalente a 3 x 3 píxeles) y en donde la pedregosidad era inferior al 50%. Una vez identificadas estas áreas de interés, se asignaron las coordenadas centrales de cada parcela de muestreo. Se muestrearon 25 parcelas en total distribuidas de la siguiente manera: 9 en Nerva; 4 en Gavilanes y 12 en La Granja.

La severidad del fuego en el suelo se evaluó en subparcelas de 20 metros de radio utilizando como centro las coordenadas centrales de las parcelas en cuarenta puntos seleccionados sistemáticamente a lo largo de dos transectos perpendiculares. El suelo se clasificó utilizando la clasificación de FERNANDEZ y VEGA (2016) y se asignó en cada caso el correspondiente valor numérico que va de 1 (nivel muy bajo) a 6 (nivel extremo). Los niveles de severidad del fuego en el suelo se describen como sigue: Nivel 1: severidad muy baja; hojarasca quemada pero consumo limitado del mantillo. Nivel 2: baja severidad de la quema: hojarasca eliminada y mantillo completamente carbonizado cubriendo el suelo mineral, posiblemente algo de ceniza; Nivel 3: severidad moderada: Cubierta orgánica del suelo completamente consumida. Suelo desnudo pero la materia orgánica del suelo no se ha consumido y el suelo superficial está intacto; Nivel 4: severidad alta cubierta orgánica del suelo consumida por completo, materia orgánica del suelo en el horizonte Ah consumida y estructura del suelo alterada en una profundidad inferior a 1 cm; Nivel 5: severidad muy alta: igual que en el nivel 4 pero en una profundidad del suelo igual o mayor 1 cm; y Nivel 6: severidad extrema igual que los niveles 4 y 5 y color alterado (rojizo). La proporción de cada transecto afectada por cada nivel de severidad del fuego en el suelo se utilizó para calcular un valor medio ponderado de severidad para cada parcela. En cada área quemada se recogieron cinco muestras de suelo (0- 2 cm) para cada nivel de severidad del fuego en el suelo identificada. Además, se seleccionaron parcelas no quemadas con características de suelo similares en las que se también se recogieron 5 muestras.

3.2 Determinaciones de laboratorio

La infiltración acumulada se estimó mediante el minidisco modelo S de Decagon según la fórmula de ZHANG (1997). A continuación, las muestras de suelo se secaron al aire. Los agregados del suelo se tamizaron en seco según el método de KEMPER y ROSENAU (1986) y se separaron en fracciones de tamaño de 10-5 mm, 5-2 mm, 2-1 mm, 1-0,25 mm, 0,25-0,05 mm y <0,05 mm. Se determinó el porcentaje en peso de agregados en cada fracción para calcular el diámetro medio en peso. El contenido orgánico del suelo de las muestras previamente tamizadas a 2 mm y molidas se determinó por combustión seca en un analizador elemental LECO. Los valores medios para cada parámetro (infiltración acumulada, diámetro medio en peso de los agregados del suelo y contenido en carbono orgánico del suelo) para cada parcela se obtuvieron multiplicando el valor correspondiente asociado a cada nivel de severidad del fuego en el suelo por la frecuencia de cada nivel de severidad en cada parcela.

3.3 Índices espectrales

Los índices espectrales se calcularon a partir de imágenes del satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las imágenes empleadas en este estudio fueron descargadas del sitio web de la ESA (Copernicus Open Acces Hub, 2019) y son imágenes de reflectancia de Nivel 2A (reflectividad en la superficie o BOA) derivadas de los productos asociados de Nivel 1C (KAUFMAN y SENDRA, 1988). Se descargaron en todos los casos las imágenes pre y post-fuego más cercanas a la fecha del incendio. A pesar de que las imágenes estaban libres de nubes en todas las zonas de estudio en ambos momentos, se realizó una corrección de nubes utilizando la Imagen de Clasificación de Escenas (SCL), disponible en Sentinel-2 Nivel 2A, cuya resolución espacial es de 20 m (GASCON et al., 2017; MULLER-WILM et al., 2013).

Los índices calculados son los que se listan en la Tabla 1:

Tabla 1. Índices espectrales seleccionados.

| Índice | Referencia |
|---|-----------------------|
| $NBR = (NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR2)$ | KEY y BENSON (2005) |
| $dNBR = NBRPRE - NBRPOST$ | KEY y BENSON (2005) |
| $RdNBR = dNBR/(NBRPRE /1000)0.5$ | MILLER y THODE (2007) |
| $RBR = dNBR/(NBRPRE + 1.001)$ | PARKS et al. (2014) |
| $MIRBI = 10SWIR1 - 9rSWIR2 + 2.0$ | TRIGG y FLASSE (2001) |
| $dMIRBI = MIRBIPRE-FIRE - MIRBIPOST-FIRE$ | TRAN et al. (2018). |

3.4 Análisis estadístico

El efecto de la severidad de la quema del suelo sobre las propiedades del suelo se comprobó mediante un modelo lineal general mixto. Los valores se normalizaron obteniendo la diferencia relativa entre el valor de cada nivel de gravedad de la quema del suelo y la media correspondiente de las parcelas de control para comparar los niveles de severidad del fuego en el suelo entre los incendios. El lugar se consideró un factor aleatorio en los modelos. Se comprobó la autocorrelación, la normalidad y la homogeneidad de la varianza de los residuos. Se utilizó la regresión lineal para detectar posibles relaciones entre la severidad de la quema en el suelo y los índices espectrales. Los datos se transformaron en logaritmos para lograr la normalidad cuando fue necesario. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico R (CORE TEAM DEVELOPMENT, 2020).

4. Resultados

La capacidad de infiltración de los suelos no quemados fue de alrededor de 3 mm h⁻¹ en los tres sitios experimentales (Tabla 2). En los suelos afectados por niveles moderados de severidad del fuego (niveles 2 y 3), se observó un cambio mientras que en los suelos más severamente quemados (niveles 4, 5, 6), la infiltración aumentó progresiva y significativamente con la severidad. El diámetro medio de los agregados del suelo disminuyó con la severidad del fuego. No se observaron diferencias significativas entre los suelos más severamente quemados (niveles 5 y 6). Por su parte, el carbono orgánico del suelo disminuyó significativa y progresivamente con la severidad de la quema del suelo.

La severidad media del fuego en el suelo varió entre 2,8 en Nerva y 3,0 en Gavilanes. La Granja mostró la mayor variabilidad (2,0 a 3,8). Los niveles severidad del fuego en el suelo más frecuentes en las parcelas de campo fueron el 2 y el 3. La frecuencia del nivel 4 osciló entre el 6% en Nerva y La Granja (0,5 cm de profundidad) y el 14% en Gavilanes (con 0,5 cm de profundidad). Por su parte, el nivel 5 se identificó en el 6% de Nerva, el 8% en Gavilanes y el 13% en La Granja.

Sólo el 1% de las observaciones fueron clasificadas en el nivel 6 durante el muestreo en los tres sitios de estudio con una profundidad media de 1,5 cm.

Las correlaciones significativas entre los índices espectrales y los parámetros medios del suelo se enumeran en la Tabla 3. El RBR fue el mejor predictor de la infiltración acumulada media y del diámetro medio del peso de los agregados del suelo. Las relaciones entre los índices y el carbono orgánico del suelo fueron más débiles en la mayoría de los casos, pero el mejor predictor fue dMIRBI. El índice espectral NBR tuvo un comportamiento similar para las tres variables analizadas.

Tabla 2. Valores promedio de las variables edáficas seleccionadas en cada nivel de severidad del fuego en el suelo. Entre paréntesis, error estándar.

| Incendio | Nivel de severidad | Infiltración (mm h ⁻¹) | Diámetro medio de agregados suelo (mm) | Carbono orgánico del suelo (%) |
|-----------|--------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Nerva | Control no quemado | 3,2 (1,6) | 0,94 (0,01) | 7,3 (0,1) |
| | Nivel 2 | 1,5 (0,4) | 0,85 (0,04) | 4,9 (0,2) |
| | Nivel 3 | 1,0 (0,3) | 0,83 (0,10) | 3,8 (0,1) |
| | Nivel 4 | 6,1 (3,1) | 0,66 (0,03) | 1,9 (0,3) |
| | Nivel 5 | 13,5 (2,2) | 0,61 (0,02) | 1,8 (0,1) |
| | Nivel 6 | 31,1 (0,9) | 0,60 (0,01) | 1,8 (0,1) |
| Gavilanes | Control no quemado | 3,5 (0,1) | 1,04 (0,06) | 7,6 (0,7) |
| | Nivel 2 | 3,2 (0,3) | 1,10 (0,10) | 5,7 (0,1) |
| | Nivel 3 | 2,7 (0,2) | 0,76 (0,05) | 4,0 (0,4) |
| | Nivel 4 | 10,4 (1,3) | 0,64 (0,01) | 2,8 (0,3) |
| | Nivel 5 | 14,0 (1,4) | 0,61 (0,01) | 1,3 (0,1) |
| | Nivel 6 | 27,1 (6,2) | 0,57 (0,01) | 1,1 (0,1) |
| La Granja | Control no quemado | 2,8 (1,2) | 1,34 (0,07) | 10,8 (0,9) |
| | Nivel 2 | 1,8 (0,9) | 0,71 (0,09) | 8,3 (0,1) |
| | Nivel 3 | 1,7 (0,8) | 0,66 (0,01) | 7,9 (0,1) |
| | Nivel 4 | 27,5 (5,4) | 0,63 (0,01) | 4,2 (0,1) |
| | Nivel 5 | 51,1 (25,2) | 0,59 (0,01) | 3,0 (0,4) |
| | Nivel 6 | 58,9 (12,6) | 0,57 (0,03) | 1,4 (0,2) |

Tabla 3. Relaciones entre índices espectrales y propiedades del suelo (transformadas en logaritmos).

| Índice | Infiltración (mm h ⁻¹) | | Diámetro medio de agregados del suelo (mm) | | Carbono orgánico del suelo (%) | |
|--------|------------------------------------|----------------|--|----------------|--------------------------------|----------------|
| | RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² |
| MIRBI | 0,258 | 0,564 | 0,028 | 0,582 | 0,094 | 0,467 |
| dMIRBI | 0,280 | 0,486 | 0,029 | 0,563 | 0,087 | 0,548 |
| NBR | 0,264 | 0,544 | 0,028 | 0,588 | 0,090 | 0,511 |
| dNBR | 0,277 | 0,499 | 0,031 | 0,499 | 0,110 | 0,272 |
| RBR | 0,251 | 0,588 | 0,028 | 0,595 | 0,098 | 0,422 |
| RdNBR | 0,373 | 0,062 | 0,044 | 0,112 | 0,155 | 0,328 |

5. Discusión

Nuestros resultados muestran que el índice de severidad del fuego en el suelo propuesto refleja aceptablemente los cambios en tres variables relacionadas con la escorrentía y el riesgo de erosión. De los parámetros analizados, el índice de severidad reflejó mejor los cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo, tal como había observado VEGA et al. (2013) en el noroeste de España. Dado que la materia orgánica del suelo es el principal agente aglutinante en estos suelos graníticos de textura gruesa (BENITO y DÍAZ-FIERROS, 1989), es de esperar que los niveles de severidad del fuego en el suelo estén asociados a disminuciones en la estabilidad de los agregados del suelo como se ha encontrado en el presente estudio. En cuanto a la infiltración media, nuestros resultados son similares a las observaciones de WIETLING et al. (2017), quienes midieron que este parámetro era cerca de un factor de siete mayor en los suelos quemados con alta severidad en comparación con los valores medidos en los suelos quemados con baja severidad.

Hay poca información disponible para comparar las correlaciones obtenidas entre los índices espectrales y los parámetros del suelo. MOODY et al. (2016) encontraron correlaciones significativas y positivas entre el dNBR y algunas propiedades físicas del suelo en una zona quemada de Colorado aunque al contrario de lo observado en el presente estudio la capacidad de infiltración del agua en el suelo disminuía del suelo con la severidad del fuego. En el presente estudio, el RBR mostró mejores ajustes para las variables seleccionadas que el dNBR tal y como también encontraron PARKS et al. (2014) utilizando el CBI como indicador de la severidad del fuego. Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que dMIRBI podría ser también una buena alternativa para cuantificar los cambios en las propiedades del suelo después del fuego, aunque se necesita más investigación para confirmarlo. Como afirman PARKS et al. (2014), los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que las métricas relativizadas son mejores para detectar efectos de alta severidad.

6. Conclusiones

El estudio demostró que la clasificación de niveles de severidad del fuego en el suelo propuesta, basadas en signos visuales, es útil para reflejar los cambios graduales en algunas

variables del suelo que desempeñan un papel crítico en la susceptibilidad a la erosión del suelo después del incendio.

La buena relación entre el índice RBR y la infiltración acumulada y el diámetro del medio de los agregados del suelo y entre el dMIRBI y el contenido de carbono orgánico del suelo parece ser una consecuencia de la información proporcionada por el SWIR.

Los resultados obtenidos muestran la capacidad de los índices espectrales para reflejar la alteración de algunas propiedades relacionadas con la susceptibilidad a la erosión del suelo, pero se necesitarán más datos en diferentes ecosistemas para confirmarlo.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto de investigación EPyRIS (SOE2/P5/E0811), del programa Interreg SUDOE de la Unión Europea. Agradecemos a todas las personas que han colaborado en el trabajo de campo y en los análisis de laboratorio, especialmente a José Gómez, Elías Blanco, Jesús Pardo y Marina Peleteiro.

8. Bibliografía

BENITO, E.; DÍAZ-FIERROS, F.; 1989. Estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 48: 229-253.

BENITO, E.; DIAZ-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.

CERDÀ, A.; DOERR, S.H.; 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena* 74: 256-263.

CORE TEAM DEVELOPMENT, R., 2019. R: A language and environment for statistical computing.. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

DE SANTIS, A.; CHUVIECO, E.; 2009. GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 113: 554-562.

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.

EBEL, B.A.; MOODY, J.A.; MARTIN, D.A.; 2012. Hydrologic conditions controlling runoff generation immediately after wildfire. *Water Resources Research* 48.

EBEL, B.A., RENGERS, F.K., TUCKER, G.E.; 2016. Observed and simulated hydrologic response for a first-order catchment during extreme rainfall 3 years after wildfire disturbance. *Water Resources Research* 52: 9367-9389.

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.; 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.; ARBONES, P.; FONTÚRBEL, T.; 2019c. Eficacia de los tratamientos de estabilización del suelo después de incendio en Galicia, Santiago de Compostela.

FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J.A.; FONTÚRBEL, T.; 2020. Comparison of the effectiveness of needle cast and straw helimulching for reducing soil erosion after wildfire in NW Spain. *J Soils Sediments* 20: 535-541.

GASCON, F.; BOUZINAC, C.; THÉPAUT, O.; JUNG, M.; FRANCESCONI, B.; LOUIS, J.; LONJOU, V.; LAFRANCE, B.; MASSERA, S.; GAUDEL-VACARESSE, A.; LANGUILLE, F.; ALHAMMOUD, B.; VIALLEFONT, F.; PFLUG, B.; BIENIARZ, J.; CLERC, S.; PESSIOT, L.; TRÉMAS, T.; CADAU, E.; DE BONIS, R.; ISOLA, C.; MARTIMORT, P.; FERNANDEZ, V.; 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing* 9: 584.

HARRIS, S.; VERAVERBEKE, S.; HOOK, S., 2011. Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. *Remote Sensing* 3: 2403-2419.

HOLDEN, Z.A.; MORGAN, P.; EVANS, J.S.; 2009. A predictive model of burn severity based on 20-year satellite-inferred burn severity data in a large southwestern US wilderness area. *Forest Ecology and Management* 258: 2399-2406.

HUDAK, A.T.; MORGAN, P.; BOBBITT, M.J.; SMITH, A.M.S.; LEWIS, S.A.; LENTILE, L.B.; ROBICHAUD, P.R.; CLARK, J.T.; MCKINLEY, R.A.; 2007. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects. *Fire Ecology* 3: 64-90.

HUFFMAN, E.L.; MACDONALD, L.H.; STEDNICK, J.D.; 2001. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes* 15: 2877-2892.

JAIN, T.B.; GRAHAM, R.T.; PILLIOD, D.S.; 2004. Tongue-tied: Confused meanings for common fire terminology can lead to fuels mismanagement. *Wildfire* July/August 22-26.

KEMPER, W.D., ROSENAU, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin USA, pp. 425-442.

KEY, C. H.; BENSON, N. C.; 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, 2004.

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.

LEWIS, S.A.; WU, J.Q.; ROBICHAUD, P.R.; 2006. Assessing burn severity and comparing soil water repellency, Hayman Fire, Colorado. *Hydrological Processes* 20: 1-16.

LLORENS, R.; SOBRINO, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; 2022. Análisis de la severidad en el suelo provocada por los incendios forestales de Galicia en 2020 mediante el uso de la Teledetección. 8º Congreso Forestal Español.

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.

MILLER, J. D.; THODE, A. E.; 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109(1): 66-80.

MILLER, J.D.; KNAPP, E.E.; KEY, C.H.; SKINNER, C.N.; ISBELL, C.J.; CREASY, R.M.; SHERLOCK, J.W.; 2009. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment* 113: 645-656.

Moody, J.A.; Ebel, B.A.; 2012. Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena* 93: 58-63.

MOODY, J.A.; EBEL, B.A.; NYMAN, P.; MARTIN, D.A.; STOOFF, C.; MCKINLEY, R.; 2016. Relations between soil hydraulic properties and burn severity. *International Journal of Wildland Fire* 25: 279-293.

MOODY, J.A.; SHAKESBY, R.A.; ROBICHAUD, P.R.; CANNON, S.H.; MARTIN, D.A.; 2013. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews* 122: 10-37.

MULLER-WILM, U.; LOUIS, J.; RICHTER, R.; GASCON, F.; NIEZETTE, M.; 2013. Sentinel-2 level 2A prototype processor: Architecture, algorithms and first results. In *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, Edinburgh, UK* (pp. 9-13).

PARKS, S.; DILLON, G.; MILLER, C.; 2014. A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing* 6: 1827-1844.

SAN MIGUEL, J. et al. 2018. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017. Joint Research Center Technical Report. 141 pp. ISBN 978-92-79-92831-4

SCHMEER, S.R.; KAMPF, S.K.; MACDONALD, L.H.; HEWITT, J.; WILSON, C.; 2018. Empirical models of annual post-fire erosion on mulched and unmulched hillslopes. *Catena* 163: 276-287.

SOBRINO, J.A.; LLORENS, R.; FERNÁNDEZ, C.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA, J.A.; 2019. Relationship between forest fires severity measured in situ and through remotely sensed spectral indices. *Forests* 10: 457.

TRAN, B.N.; TANASE, M.A.; BENNETT, L.T.; APONTE, C.; 2018. Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote Sensing* 10: 1680.

TRIGG, S.; FLASSE, S.; 2001. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing* 22: 2641-2647.

VAN WAGTENDONK, J.W.; ROOT, R.R.; KEY, C.H.; 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment* 92: 397-408.

VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; FONTURBEL, T.; 2005. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain). *Land Degradation and Development* 15: 1-15.

VEGA, J.A.; FONTÚRBEL, M.T.; MERINO, A.; FERNÁNDEZ, C.; FERREIRO, A.; JIMÉNEZ, E.; 2013. 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 Soil* 369: 73-91.

VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; FONTÚRBEL, M.T.; 2018. Medidas de atenuación de los daños post-incendio en Galicia. In: Díaz-Fierros, F. (Ed.), Incendios Forestales. Reflexiones desde Galicia. Hercules de Ediciones, Santiago de Compostela, pp. 136-174.

VERAVERBEKE, S.; HOOK, S.; HULLEY, G.; 2012. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sensing of Environment* 123: 72-80.

WIETING, C.; EBEL, B.A.; SINGHA, K.; 2017. Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone Observatory. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 13: 43-57.

ZHANG, R.; 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1024-1030.