



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

Nuevas metodologías basadas en Teledetección para estimar la severidad de afectación de un incendio

FERNÁNDEZ-MANSO, A.¹, QUINTANO, C.^{2,3}

¹ Departamento de Cie, Escuela Técnica y Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de León.

² Departamento de Tecnología Electrónica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

³ Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Valladolid.

Resumen

Los gestores forestales dependen de estimaciones precisas de severidad de afectación de la vegetación para evaluar los daños producidos por incendios forestales y establecer políticas de restauración de la vegetación. Cada vez más estas estimaciones de la severidad se basan en datos de reflectividad adquiridos por los sensores a bordo de satélites complementados con datos obtenidos en campo. Sin embargo, el fuego no sólo induce cambios en la radiación reflejada y emitida medida por el sensor, sino también en el balance energético. La evapotranspiración (ET), la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el albedo de la superficie terrestre (LSA) se ven muy afectados por los incendios forestales. En este trabajo, se examina la utilidad de estas variables del balance energético como indicadores de la severidad del daño producido por el incendio en la vegetación y se compara la fiabilidad de las estimaciones de la severidad del daño basadas en ellas con la fiabilidad obtenida mediante los enfoques más ampliamente utilizados, basados en índices espectrales. La zona de estudio es un mega-incendio (más de 450 km² quemados) en el centro de Portugal, ocurrido del 17 al 24 de junio de 2017. El mapa oficial de severidad de daño en la vegetación por incendio actuó como referencia-terreno. La fiabilidad de las estimaciones basadas en ET y LST fue adecuada ($\kappa = 0,63$ y $0,57$, respectivamente), similar a la fiabilidad de la estimación basada en la dNBR ($\kappa = 0,66$). Se concluye que las variables del balance energético derivadas de Landsat, en particular la ET y la LST, además de actuar como indicadores útiles de la severidad de daño por incendio en la vegetación en los ecosistemas mediterráneos, pueden proporcionar información crítica sobre cómo cambia el balance energético debido al fuego.

Palabras clave

Severidad de quemado, Cartografía de incendios, Balance energético superficial, Evapotranspiración (ET), Temperatura de la superficie terrestre (LST), Albedo de la superficie terrestre (LSA).

1. Introducción

El fuego es uno de los principales procesos de perturbación en muchos ecosistemas y es particularmente frecuente en los ecosistemas mediterráneos, donde tiene impacto en la biodiversidad (Scott et al., 2013) y en otras propiedades importantes del ecosistema. En estos ecosistemas, la frecuencia, severidad y tamaño de los incendios ha aumentado en las últimas décadas, debido principalmente al cambio climático y a las modificaciones en el uso del suelo (Leblon et al., 2016). Para evaluar los daños causados por los incendios, una de las métricas más utilizadas es la severidad del daño que ocasionan, o severidad de quemado (Meng y Zhao, 2017). La severidad de quemado agrupa los efectos del fuego a corto y largo plazo sobre la vegetación y el suelo (Jain et al., 2004). Key y Benson (2006) distinguen entre la evaluación inicial de la severidad de quemado, que tiene como objetivo cartografiar la severidad de los daños inmediatamente después del incendio, de una evaluación ampliada, cuyo objetivo es cartografiar la severidad del incendio cuando la supervivencia y la mortalidad son detectables. El aumento de la severidad de quemado debido a los cambios en el clima y la cobertura del suelo puede modificar las características de la vegetación (composición, resistencia, estructura) y los atributos del suelo, incluso en los ecosistemas mediterráneos que están bien adaptados al fuego (Marcos et al., 2009;).

Las técnicas basadas en datos de Teledetección proporcionan una alternativa ampliamente utilizada a la medición de daños por incendios en la vegetación/suelo medidos sobre el terreno (Fernández-Manso et al., 2019). Entre las técnicas más utilizadas para estimar la severidad de quemado a partir de datos satelitales, los índices espectrales destacan por su simplicidad (Fernández-Manso et al., 2016; Tanase et al., 2011). En particular, el uso de umbrales para clasificar el Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR, Key y Benson, 2006) se ha convertido en un estándar para estimar la severidad de quemado a partir de datos ópticos de teledetección, específicamente de datos Landsat (Quintano et al., 2018). Sin embargo, algunos estudios han señalado algunas limitaciones de los índices espectrales como base para estimar la severidad de quemado: su interpretación en términos de daño por incendio no es fácil debido a la ausencia de unidades estandarizadas (Harvey et al., 2019) y su relación no lineal con la severidad de quemado (Lentille et al., 2009).

Las nuevas metodologías basados en Teledetección pueden ayudar a superar las limitaciones de las técnicas de medición de la severidad que se utilizan en la actualidad. Entre estas nuevas técnicas novedosas que utilizan variables del balance energético como indicadores de la severidad del daño producido por el incendio en la vegetación. El fuego reduce la Evapotranspiración (ET) y aumenta la escorrentía superficial tras las lluvias (Atchley et al., 2018). Las modificaciones inducidas por el fuego en la estructura de la vegetación y la composición de las especies alteran el flujo de calor latente y otras variables de la ecuación del balance energético (Sánchez et al., 2015). Los cambios en la Temperatura de Superficie (LST), un importante parámetro de la ET, se han identificado recientemente como un indicador potencial de la severidad de quemado (Quintano et al., 2017). El Albedo de Superficie (LSA) determina la cantidad total de radiación solar que absorbe un ecosistema y está sujeta a la estacionalidad (Veraberbeke et al., 2012).

2. Objetivos

Faltan estudios que relacionen los tres elementos del balance energético (ET, LST y LSA) con la severidad de quemado, en particular en ecosistemas forestales mediterráneos. En este contexto, este trabajo de investigación pretende analizar la relación entre la severidad de la quemado y las variaciones de ET, LST y LSA tras grandes incendios en bosques mediterráneos a una alta resolución espacial y, verificar si pueden actuar como indicadores de la severidad de quemado (evaluación inicial) en este ecosistema. En particular, como principal objetivo nuestro trabajo pretende determinar la fiabilidad de las estimaciones de la severidad de quemado a partir de estas variables.

3. Metodología

El incendio de Pedrogão Grande quemó 458,93 km² entre el 17 de junio de 2017 y el 24 de junio de 2017 (ADAI/LAETA, 2017). El clima de la zona puede describirse como una mezcla de las clases Csa (Mediterráneo típico) y Csb (Mediterráneo húmedo) de Köppen-Geiger (Köppen, 1936). El área de Pedrogão Grande está integrada en la Zona Interior del Pinhal Norte, la mayor zona forestal de Europa antes del incendio. Está comprendida entre las cuencas de los ríos Zêzere y Unhais y las riberas de los ríos Pêra y Mega. En esta zona dominan las plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.), y pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) (Figura 1, arriba a la derecha).

Se descargaron las imágenes de reflectancia superficial USGS Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)/Thermal InfraRed Sensor (TIRS) (trayectoria/fila 204/32, producto de datos de nivel superior bajo demanda) adquiridas el 15 de junio de 2017, el 1 de julio de 2017, el 17 de julio de 2017, el 2 de agosto de 2017; el 18 de agosto de 2017; el 19 de septiembre de 2017, el 5 de agosto de 2018 y el 8 de octubre de 2018. A partir de ellos se calcularon los índices espectrales Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Normalized Burn Ratio (NBR), LST y LSA. Las imágenes de ET

diaria METRIC (ver figura 1) se obtuvieron utilizando el software desarrollado por la Universidad de Nebraska-Lincoln (Allen et al., 2015). El perímetro oficial del incendio y el mapa oficial de severidad de quemado (tres niveles de severidad) se utilizaron como referencia-terreno. Se basaron en los mapas de Copernicus - Servicio de Gestión de Emergencias y fueron verificados por el Centro Portugués de Estudios de Incendios Forestales (Portugal).

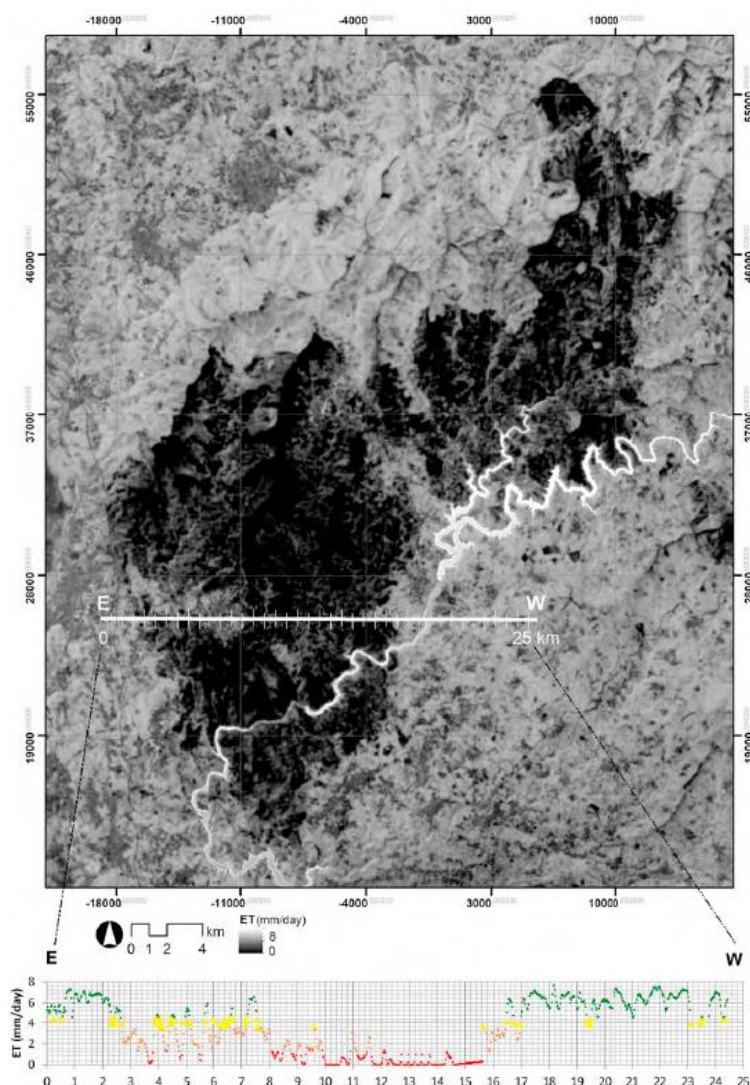


Fig. 4. Post-fire ET image with spatial profile.

Figura 1. Imagen de la ET posterior al incendio con el perfil espacial.

Como paso previo a la construcción de la base de datos de trabajo, se aplicó un filtro de media 3×3 a las imágenes obtenidas antes de extraer los valores digitales de los puntos de muestreo para minimizar los errores de posición (Key y Benson, 2006; Quintano et al., 2015). Como recomiendan Congalton y Green (2009), se adoptó un muestreo aleatorio estratificado. El número de muestras se relacionó con la superficie que ocupa cada nivel de severidad de quemado en el mapa utilizado como referencia-terreno: 2.532 muestras para el nivel de severidad alto, 1.638 para el nivel moderado y 721 para el nivel bajo. Además, la zona fuera del perímetro del incendio se muestreó para definir la clase “No quemado”. Se definieron 1.213 puntos de muestreo para la clase “No quemado”. Una prueba de normalidad de curtosis permitió comprobar su normalidad.

4. Resultados

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las medidas de fiabilidad de las estimaciones de la severidad de quemado a partir de cada una de las variables consideradas (perspectiva uni-temporal y multi-temporal). Desde una perspectiva uni-temporal, todas las estimaciones de la severidad de quemado, excepto la basada en LSA, mostraron una fiabilidad adecuada.

La estimación basada en la ET después del incendio alcanza el estadístico Kappa más alto ($\kappa = 0,63$), seguida por la estimación basada en la NBR después del incendio ($\kappa = 0,61$). Cuando se adoptó una perspectiva multitemporal, ambas estimaciones de severidad de quemado basadas en dET y dLST disminuyeron ligeramente la fiabilidad, mientras que las estimaciones de la severidad de quemado basadas en dNDVI y dNBR la aumentaron ligeramente. En consecuencia, se observaron algunas diferencias en la fiabilidad en este caso: el estadístico Kappa fue de 0,55 en la estimación basada en dET, y de 0,51 en la basada en dLST, en comparación con 0,65 y 0,66 en las basadas en dNDVI y dNBR, respectivamente. La estimación de la severidad de quemado basada en dLSA mostró aproximadamente la misma fiabilidad que la basada en LSA en la perspectiva uni-temporal (demasiado baja para ser aceptable).

Tabla 1. Resumen de la fiabilidad de las estimaciones de la severidad de quemado a partir de ET, LST, LSA, NDVI y NBR (perspectiva uni-temporal y multi-temporal).

	Perspectiva uni-temporal (07/01/2017)					Perspectiva multi-temporal (06/15/17 - 07/01/2017)				
	ET	LST	LSA	NDVI	NBR	dET	dLST	dLSA	dNDVI	dNBR
κ	0,63	0,57	0,44	0,59	0,61	0,55	0,52	0,45	0,65	0,66
PA	0,69	0,65	0,49	0,67	0,70	0,66	0,63	0,58	0,70	0,71
UA	0,68	0,66	0,51	0,70	0,69	0,62	0,60	0,55	0,72	0,70
OA	0,73	0,69	0,61	0,72	0,72	0,67	0,64	0,60	0,75	0,76

κ : estadístico Kappa; PA: fiabilidad de productor; UA: fiabilidad de usuario; OA: fiabilidad global

La figura 2 ofrece una comparación visual de los mapas de severidad de quemado (evaluación inicial) basados en la ET inmediatamente posterior al incendio y el dNBR (utilizado como referencia). A partir de ella, es posible comprobar el alto nivel de similitud entre los dos mapas de severidad de quemado. En la esquina superior derecha del mapa basado en la ET se puede observar una pequeña variación en el nivel de severidad de quemado realmente asociada a los cambios de aspecto.

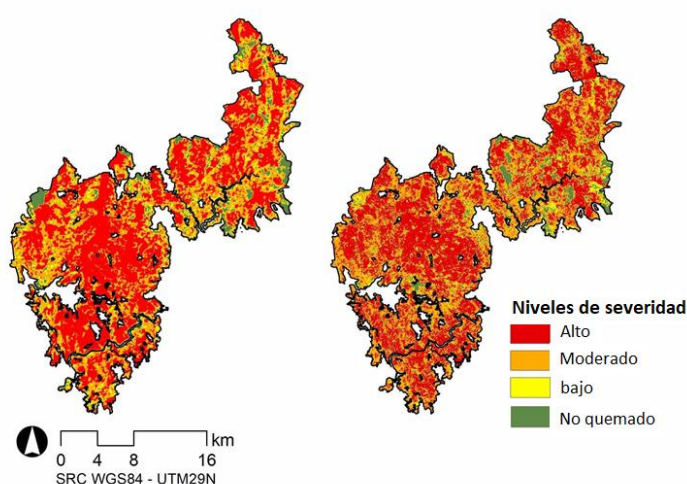


Figura 2. Mapas de severidad de quemado. Evaluación inicial. Izquierda: basado en ET (perspectiva uni-temporal); derecha: basado en dNBR (perspectiva multi-temporal).

5. Discusión

Desde una perspectiva uni-temporal, las estimaciones de severidad de quemado basadas en ET alcanzaron la mayor fiabilidad ($\kappa = 0,63$), siendo la fiabilidad de las estimaciones basadas en LST aceptable ($\kappa = 0,57$). Desde una perspectiva multitemporal, tanto las estimaciones basadas en dET como en dLST mostraron una fiabilidad menor que las basadas en dNDVI y dNBR (enfoque multitemporal). Los valores de fiabilidad obtenidos estaban en consonancia con los valores de fiabilidad encontrados en estudios anteriores. En la misma área de estudio, Venâncio (2017) alcanzó una fiabilidad global (OA) igual al 64,90% mediante la umbralización de dNBR. En los bosques de coníferas de Norteamérica, el estadístico Kappa de los mapas de severidad de quemado considerando tres niveles a partir de dNBR y RdNBR osciló entre 0,62 y 0,37, como incluyeron Cansler y McKenzie (2012) en su revisión. En el bosque mediterráneo de *Pinus pinaster*, Quintano et al. (2017), combinando las fracciones MESMA de Landsat y la imagen LST desde una perspectiva uni-temporal alcanzaron el estadístico Kappa igual a 0,66 frente a un estadístico Kappa igual a 0,45 cuando se utilizó NBR. También en los bosques de *Pinus pinaster*, el trabajo de Amos et al. (2019) basado en los índices espectrales de Sentinel-2 dio como resultado un estadístico Kappa de 0,65, mientras que el estudio de Quintano et al. (2019) basado en las fracciones MESMA de Sentinel-2 y la imagen LST desde una perspectiva multitemporal alcanzó un valor relativamente alto del estadístico Kappa (0,81). En el bosque de eucaliptos australiano, Tran et al. (2018) basándose en los índices espectrales de Landsat mejorados con LST alcanzaron valores del estadístico Kappa que oscilaban entre 0,37 y 0,77.

En este estudio, las estimaciones de la severidad de quemado basadas en variables relacionadas con el balance energético alcanzaron precisiones similares a las estimaciones basadas en los índices espectrales comúnmente utilizados. Sin embargo, de acuerdo con Parks et al. (2018), estas variables deberían incluirse para modelar la severidad de quemado en amplias regiones, debido a la dificultad de interpretar los modelos basados en índices espectrales (Harvey et al., 2019). Además, estas variables proporcionan información crítica sobre las alteraciones del balance energético causadas por el fuego y, en particular, sobre el balance hídrico. Los incendios forestales alteran de forma importante los procesos hidrológicos, lo que puede tener impacto en el crecimiento del bosque y en el clima a escala regional (Cai et al., 2019).

6. Conclusiones

Los incendios forestales no sólo modifican la reflectancia de la superficie, sino que principalmente inducen cambios en el balance energético. Este estudio demostró la utilidad de las variables derivadas del satélite Landsat relacionadas con el balance energético para estimar la severidad de quemado con una fiabilidad similar a la de otros métodos bien establecidos basados en satélites, con la ventaja añadida de una mejor comprensión de los cambios inducidos por el fuego en el balance energético. Aunque la relación entre estas variables y la severidad de quemado ha sido reconocida previamente, este es el primer estudio que sugiere su potencial como indicadores de la severidad de quemado y que las utiliza para estimar con fiabilidad la severidad de quemado.

7. Agradecimientos

Este estudio ha contado con el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad, y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), en el marco del proyecto FIRESEVES (AGL2017-514 86075-C2-1-R); de la Junta de Castilla y León en el marco del marco de los proyectos SEFIRECYL (LE001P17) y WUIFIRECYL (LE005P20).

8. Bibliografía

ADAI/LAETA, 2017. O complexo de incêndios de Pedrógão grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017. *Universidade de Coimbra Official report*. República portuguesa (in portuguese).

ALLEN, R., MORTON, C., KAMBLE, B., KILIC, A., HUNTINGTON, J., THAU, D., GORELICK, N., ERICKSON, T., MOORE, R., TREZZA, R., RATCLIFFE, I., ROBISON, C., 2015. EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. 2015 *ASABE Irrigation Symposium*. Paper Number: 152143511. Technologies for Sustainable Irrigation Proceedings of the 10-12 November 2015 Symposium, Long Beach, California USA. Published by ASABE (Publication No. 701P0415).

AMOS, C., PETROPOULOS G.P., FERENTINOS, K.P., 2019. Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection, *Int. J. Remote Sens.* 40:3, 905-930.

ATCHLEY, A.L., KINOSHITA, A.M., LOPEZ, S.R., TRADER, L., MIDDLETON, R., 2018. Simulating surface and subsurface water balance changes due to burn severity. *Vadose Zone J.* 17:180099.

CAI, X., RILEY, W. J., ZHU, Q., TANG, J., ZENG, Z., BISHT, G., RANDERSON, J.T., 2019. Improving Representation of Deforestation Effects on Evapotranspiration in the E3SM Land Model. *J. Adv. Model. Earth Sy.*

CANSLER, C.A., MCKENZIE, D., 2012. How robust are burn severity indices when applied in a new region? Evaluation of alternate field-based and remote-sensing methods. *Remote Sens.* 2012, 4, 456–483.

CONGALTON, R. G., GREEN, K., 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices (2 edition). Boca Ratón: CRC Press. Taylor & Francis.

FERNÁNDEZ-MANSO, A., FERNANDEZ-MANSO, O., QUINTANO, C., 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 50, 170-175.

FERNÁNDEZ-MANSO, A., QUINTANO, C., ROBERTS, D.A., 2019. Burn severity analysis in Mediterranean forests using maximum entropy model trained with EO-1 Hyperion and LiDAR data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 155, 102-118.

HARVEY, B.J., ANDRUS, R.A., ANDERSON, S.C., 2019. Incorporating biophysical gradients and uncertainty into burn severity maps in a temperate fire-prone forested region. *Ecosphere* 10:2, e02600.

JAIN, T.B., PILLIOD, D., GRAHAM, R.T., 2004. Tongue-tied. Confused meanings for common fire terminology can lead to fuels mismanagement. A new framework is needed to clarify and communicate the concepts. *Wildfire* 4, 22–26.

KEY, C.H., BENSON, N.C., 2006. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. *USDA Forest Service General Technical Reports RMRS-GTR-164-CD*.

KÖPPEN, W. 1936. Das geographische System der Klimate, 1–44 (Gebrüder Borntraeger: Berlin, Germany, 1936.

LEBLON, B., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., BOURGEAU-CHAVEZ, L., KONG, M., 2016. Remote Sensing of Wildfires. In. *Land Surface Remote Sensing: Environment and Risks*, ISTE Press Ltd & Elsevier Ltd. UK. ISBN 978-1-78548-105-5pp. 55-95.

LENTILLE, L. B., SMITH, A. M. S., HUDAK, A. T., MORGAN, P., BOBBITT, M. J., LEWIS, S. A., ROBICHAUD, P.R., 2009. Remote sensing for prediction of 1-year post-fire ecosystem condition. *Int. J. Wildland Fire*, 18, 594–608.

MARCOS, E., VILLALÓN, C., CALVO, L., LUIS-CALABUIG, E., 2009. Short-term effects of experimental burning on the soil nutrient in the Cantabrian heathlands. *Ecol. Eng.* 35, 820–828.

MENG, R., ZHAO, F., 2017. A review for recent advances in burned area and burn severity mapping. In: Petropoulos, G.P., Islam, T. (Eds.), *Remote Sensing of Hydrometeorological Hazards*. Taylor & Francis.

PARKS, S.A., HOLSINGER, L.M., PANUNTO, M.H., JOLLY, W.M., DOBROWSKI, S.Z., DILLON, G.K., 2018. High-severity fire: evaluating its key drivers and mapping its probability across western US forests. *Environ. Res. Lett* 13, 044037.

QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, A., CALVO, L., MARCOS, E., VALBUENA, L., 2015. Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 36, 1-12

QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, A., ROBERTS, D.A., 2017. Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and Land Surface Temperature. *Remote Sens. Environ.* 190, 83–95.

QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, A., FERNÁNDEZ-MANSO, O., 2018. Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 64, 221–225.

QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, A., CALVO, L., ROBERTS, D.A., 2019. Vegetation and Soil Fire Damage Analysis Based on Species Distribution Modeling Trained with Multispectral Satellite Data. *Remote Sens.*, 11, 1832.

SCOTT, A.C., BOWMAN, D.M., BOND, W.J., PYNE, S.J., ALEXANDER, M.E., 2013. *Fire on Earth: An Introduction*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

TANASE, M., DE LA RIVA, J., PÉREZ-CABELLO, F., 2011. Estimating burn severity in Aragón pine forest using optical based indices. *Can. J. Forest Res.* 41, 863–872.

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 Sens.* 2018, 10, 1680.

VENÂNCIO, P., 2017. Open Source, Open Data e Citizen Science contributos para a Avaliação da Catástrofe de Pedrógão Grande e Góis. SASIG 2017.- *Encontro Nacional de Software Aberto para Sistemas de Informação Geográfica*. Porto, Portugal.

VERAVERBEKE, S., VERSTRAETEN, W.W., LHERMITTE, S., VAN DE KERCHOVE, R., GOOSSENS, R., 2012. Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fire-burn severity using multi-temporal MODIS imagery. *Int. J. Wildland Fire* 21, 243–256.