

Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013

Arellano, S.^{*1,2}, Vega, J. A.¹, Rodríguez y Silva, F.³, Fernández, C.¹, Vega-Nieva, D.⁴, Álvarez-González, J. G.², Ruiz-González, A. D.²

¹Departamento de Protección, Centro de Investigación Forestal de Lourizán, Carretera de Marín km 3,5. 36153 Pontevedra (España).

²Unidade de Xestión Forestal Sostible (GI-1837-UXFS). Departamento de Enxeñería Agroforestal, Universidade de Santiago de Compostela, Escola Politécnica Superior, Campus Universitario s/n 27002. Lugo (España).

³Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales (LABIF). Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, Edificio Leonardo da Vinci. Campus de Rabanales 14071 Córdoba (España).

⁴Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez. Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n. Col. Valle del Sur C.P. 34120. (México).

Resumen: Evaluar y cartografiar la severidad del fuego después de incendios forestales se ha convertido en una tarea esencial para abordar la rehabilitación urgente de áreas quemadas y mejorar la planificación de la gestión post-incendio. Aunque en Galicia se produce el mayor número de incendios forestales en España, la información sobre la estimación de la severidad del fuego mediante índices de teledetección es escasa. En este estudio se comparan, por primera vez en esta región, las capacidades de dNBR (*differenced Normalized Burn Ratio*) y RdNBR (*Relative difference Normalized Burn Ratio*), obtenidos de imágenes Landsat 8, para el testado de dichos índices con mediciones de severidad del fuego en campo, siguiendo el protocolo de CBI (*Composite Burn Index*), en el incendio de Oia-O Rosal (Pontevedra) ocurrido en 2013. Los modelos desarrollados para estimar dNBR y RdNBR en función del CBI fueron similares, con un porcentaje de variabilidad explicada de un 69% y 73%, respectivamente. Estos modelos permitieron obtener unos nuevos intervalos de las clases de severidad de dNBR y RdNBR para el área incendiada. Aunque los dos índices tuvieron valores de precisión conjunta relativamente altos y semejantes (75% y 83%, respectivamente) para clasificar las áreas afectadas por diferentes niveles de severidad, RdNBR mostró una ligera ventaja sobre dNBR. Además, el mapa de severidad basado en dNBR presentó menos superficie quemada con alta severidad, en comparación con RdNBR, y lo contrario para moderada severidad. Con esta información se dispone de una primera herramienta para abordar la evaluación de las pautas espaciales de severidad en incendios de Galicia, aunque será necesario contar con nuevos datos antes de disponer de una herramienta operativa.

Palabras clave: severidad del fuego, índices espectrales, dNBR, RdNBR, Landsat 8, incendios forestales, Galicia 2013, CBI.

To cite this article: Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D. 2017. Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. *Revista de Teledetección*, 49, 49-61. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>

* Corresponding author: stefano.arellano@gmail.com

Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013

Abstract: Fire severity evaluation and mapping following wildfire is an essential task for post-fire rehabilitation activities and forest management planning. For that purpose, some spectral indexes are used to quantify the changes caused by fire, being Landsat satellite one of the most frequently used. Even though Galicia is the Spanish region with the highest number of fires in the country, the information on fire severity estimation through satellite imagery is scarce. In the present study, the capacity of dNBR (differenced Normalized Burn Ratio) and RdNBR (Relative difference Normalized Burn Ratio), through Landsat 8 imagery processing, are compared for the first time in Galicia to test both indexes with field data following the methodology from CBI (Composite Burn Index) in Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire occurred in the summer of 2013. The results indicate that the models for dNBR and RdNBR estimation according to CBI were similar, explaining a 69 and 73% of variability, respectively. These models allow to obtain a new fire severity thresholds for dNBR and RdNBR for the burned area. Although, both indexes showed a similar and quite high overall accuracy in the classification of the different fire severity classes (75% y 83% for dNBR and RdNBR, respectively), RdNBR was slightly more accurate than dNBR. Additionally, the dNBR-based fire severity map significantly underestimated the high fire severity area, compared with RdNBR. Those preliminary results can be useful to evaluate fire severity spatial distribution, in wildfires in Galicia although new data will be necessary before an operational tool to be available.

Key words: fire severity, spectral indexes, dNBR, RdNBR, Landsat 8, forest fires, Galicia 2013, CBI.

1. Introducción

No existe una única definición de la severidad del fuego unánimemente aceptada (Keeley, 2009). Sin embargo, usualmente este término se emplea para referirse al nivel de daño o perturbación causada por el fuego en el conjunto del ecosistema o en alguna de sus características (Key y Benson, 2006). Es considerada a su vez como un descriptor del impacto ambiental del fuego y un factor determinante para explicar la respuesta del ecosistema a aquel (Lentile *et al.*, 2006). Su cuantificación resulta también crítica para la rehabilitación de áreas quemadas, especialmente en el control del riesgo hidrológico y erosivo (Robichaud *et al.*, 2000). De ahí la importancia de contar con técnicas operativas que permitan estimar la severidad del fuego y posibiliten a los gestores forestales planificar mejor sus actuaciones post-incendio.

En Galicia tiene lugar aproximadamente el 30% de los incendios forestales que ocurren en España (Enríquez y Del Moral, 2012), a pesar de que su superficie forestal supone sólo el 10% de la de todo el país. Esto refleja la magnitud del problema de incendios en este territorio. Dado el agravamiento del problema de los incendios forestales que las proyecciones de cambio climático pronostican para el área atlántica de la Península Ibérica (Arellano, 2008; Vega *et al.*, 2009a,

2009b), resulta cada vez más crítico ampliar nuestro conocimiento sobre sistemas de evaluación de la severidad del fuego. La teledetección es una herramienta muy útil en la caracterización de la severidad de los incendios forestales, puesto que el proceso de combustión supone un descenso de la reflectividad en las regiones del visible y del infrarrojo cercano y un aumento en el infrarrojo medio de onda corta (Key y Benson, 2006; Montorio *et al.*, 2014).

La mayoría de los índices satelitales proporcionan generalmente una mezcla de información de la magnitud del impacto inmediato del fuego en la vegetación y en el suelo (Morgan *et al.*, 2014). En zonas arboladas con copas soflamadas los índices satelitales pueden reflejar cambios en las copas debido al fuego; en lugares con copas totalmente consumidas (fuego de copas) y con matorral desarbolado los índices permiten estimar el nivel cambio en matorral o suelo, dependiendo del grado de consunción de la vegetación. Los índices satelitales posibilitan analizar pautas espaciales de severidad del fuego y comparar diferencias de severidad entre regiones. Además, permiten estimarla en lugares inaccesibles o con dificultades de movimiento y acortar los periodos de toma de datos de campo. La información obtenida mediante índices espectrales resulta de gran utilidad para el seguimiento post-incendio de numerosos

procesos ecológicos (Chuvieco, 2009), como la erosión del suelo (Pérez-Cabello *et al.*, 2006), la rehabilitación y restauración de áreas quemadas (Hudak *et al.*, 2007) o el régimen de fuego (Díaz-Delgado *et al.*, 2004), entre otros. Las principales limitaciones de los índices de teledetección son la disponibilidad de imágenes adecuadas de satélite con ausencia de nubosidad, la baja resolución espacial, la reducida fiabilidad para representar los estratos inferiores del dosel arbóreo y, particularmente, el suelo (Hudak *et al.*, 2007) y su menor fiabilidad en áreas de vegetación muy dispersa o en algunos tipos de bosque (Miller y Thode, 2007; Soverel *et al.*, 2010). Por ello resulta esencial el testado de esta información remota con parcelas de campo.

Los dos índices más extensamente usados para caracterizar la severidad son dNBR y su forma relativizada, RdNBR, a partir de imágenes Landsat. Ambos están basados en el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*), propuesto primero por Lopez y Caselles (1991) y posteriormente reformulado por Key y Benson (2005).

Muchos otros desarrollos recientes en teledetección están permitiendo avanzar en la estimación de la severidad del fuego, como el análisis hiperespectral (Lewis y Robichaud, 2007), el análisis de mezcla espectral (*Spectral Mixture Analysis*, SMA, Lentile *et al.*, 2009); el uso del láser scanner (*Airborne Laser Scanners*, ALS, Montealegre, 2014), los índices espectrales mejorados o la emisividad de la superficie terrestre (*Land Surface Emissivity*, LSE, Veraverbeke *et al.*, 2011; Fernández-Manso y Quintano, 2015) y el uso de otros satélites (Veraverbeke *et al.*, 2012). Muchas de estas técnicas son prometedoras en relación a conseguir métricas de la severidad del fuego más ligadas a sus efectos ecológicos. Sin embargo, no han demostrado ser claramente superiores que dNBR y RdNBR cuando se ligan con métricas de severidad obtenidas en campo (Veraverbeke *et al.*, 2012) y, aunque se han detectado limitaciones en estos índices para caracterizar la severidad del fuego en diferentes tipos de ecosistemas (Epting *et al.*, 2005; Lentile *et al.*, 2006; Picotte y Robertson, 2011), los índices dNBR y RdNBR basados en Landsat son, aún hoy en día, los indicadores más contrastados en comparación a técnicas emergentes debido a su amplia difusión, habiendo sido utilizados para caracterizar la

severidad de fuegos con muy diferentes tipos de combustibles y en distintos ecosistemas y áreas geográficas. Además, son particularmente útiles para el desarrollo de mapas de severidad del fuego centrados en los efectos en la vegetación y, más especialmente, en el arbolado.

Sin embargo, hay un activo debate respecto a cuál de los dos índices, dNBR o RdNBR, ofrece mejores capacidades para reflejar la severidad del fuego medida en campo y los resultados por ahora son contradictorios. Algunos estudios han encontrado que RdNBR es mejor que dNBR, sobre todo en paisajes heterogéneos y en áreas de vegetación dispersa (Miller y Thode, 2007; Cansler y McKenzie, 2012); mientras que otros han hallado lo contrario, tanto en términos de correspondencia con las medidas de campo de severidad como en la exactitud en la clasificación (Hudak *et al.*, 2007; Soverel *et al.*, 2010).

A pesar de que Galicia es una de las zonas de España más castigadas por el fuego, la información sobre la utilización de índices de teledetección para evaluar la severidad del fuego, es todavía limitada (Martín *et al.*, 2007; Álvarez *et al.*, 2007; García-Duro *et al.*, 2016). Por tanto, resulta necesario ampliarla para que sea operativa, siendo imprescindible obtener unos rangos de esos índices de cara a la evaluación y caracterización de la severidad de los incendios. Además, actualmente está en marcha un programa de rehabilitación de áreas quemadas en Galicia y resulta crítico contar con herramientas operativas que ayuden a una rápida priorización de las zonas objeto de tratamientos de minimización de los riesgos hidrológico-erosivos asociados a los incendios (Vega *et al.*, 2013, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: *i*) explorar la construcción de un modelo empírico relacionando una métrica de severidad basada en observaciones de campo en áreas incendiadas (CBI) con los índices dNBR y RdNBR en un gran incendio de Galicia; *ii*) determinar los rangos de los indicadores dNBR y RdNBR que ayuden a definir clases discretas de severidad del fuego; y *iii*) comparar las capacidades de esos indicadores para crear imágenes clasificadas de la severidad del fuego en incendios forestales de Galicia.

Tabla 1. Coordenadas UTM (m), fecha de inicio, superficie quemada (ha), altitud (m), pendiente ponderada y vegetación principal para el incendio.

UTM (m)	Fecha	Superficie (ha)	Altitud (m)	Pendiente (°)*	Vegetación dominante
514255,26 4646489,1	26-08-13	1838	240 -512	3,1	<i>P. pinaster</i> , <i>E. globulus</i> , <i>Ulex</i> sp. y <i>E. umbellata</i>

*Ponderada por la superficie ocupada de acuerdo a la siguiente escala: 0-5%=1; 5-20%=2; 20-30%=3; 30-45%=4; >45%=5.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

Para la realización de este trabajo se escogió el gran incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra, Figura1), que tuvo lugar en agosto del 2013 (Tabla 1). Este incendio fue el que afectó a mayor superficie arbolada de todos los acontecidos en el año 2013 en Galicia, afectando a pinares (*Pinus pinaster*) y bosques de eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) de alto índice de calidad.

2.2. Imágenes de satélite y su procesamiento

Las imágenes usadas en este estudio proceden de Landsat 8 LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*), provisto de los sensores OLI (*Operational Land Imagen*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), y fueron obtenidas del USGS (*United States Geological Survey*) EROS Center (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Las dos imágenes adquiridas se escogieron de forma que las fechas pre- y post-incendio fueran lo más cercanas posibles a la de la ocurrencia del incendio para minimizar las diferencias fenológicas y de ángulo solar. La referencia espacial (*path/row*) fue la 205/31 y las fechas de imagen pre-incendio y post-incendio fueron el 14/08/2013 y el 30/08/2013, respectivamente. El perímetro digitalizado del incendio fue facilitado por la Consellería do Medio Rural (Xunta de Galicia).

Los valores de los niveles digitales de las imágenes se transformaron en reflectancias aparentes TOA (*Top of Atmosphere*) con corrección para el ángulo solar (corrección radiométrica, Fernández-Manso and Quintano, 2012). Al igual que otros autores (e.g. Miller y Thode, 2007), no se efectuó ninguna corrección atmosférica, asumiendo que la dispersión atmosférica es insignificante en bandas infrarrojas en ausencia de nubes. La corrección geométrica no fue necesario realizarla puesto que las imágenes ya estaban ortogeoreferenciadas.

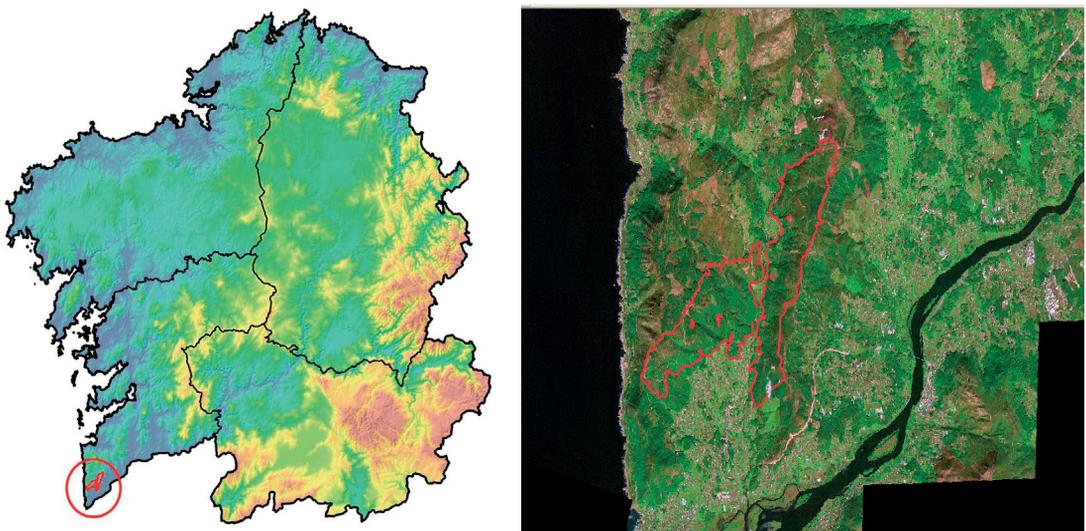


Figura 1. Localización del incendio (izquierda). Ortofoto del incendio (derecha).

2.3. Cálculo de los índices espectrales para evaluar la severidad del fuego

Los valores de NBR para cada píxel se obtuvieron mediante la Ecuación 1.

$$NBR = [R5 - R7] / [R5 + R7] \quad (1)$$

Donde: R5 es la reflectancia en la banda 5 del infrarrojo cercano (*Near-Infrared*, NIR, 0,85-0,88 μm) y R7 es la reflectancia en la banda 7 del infrarrojo de onda corta (*Short Wave Infrared*, SWIR, 2,11-2,29 μm), tanto para la imagen pre-fuego como para la post-fuego. Los valores de dNBR están basados en el cambio temporal entre las imágenes pre- y post-fuego y fueron calculados utilizando la Ecuación 2.

$$dNBR = (NBR \text{ pre} - NBR \text{ post}) \quad (2)$$

Se calculó el índice RdNBR (Miller y Thode, 2007), según la Ecuación 3.

$$RdNBR = dNBR / \sqrt{|NBR \text{ pre} / 1000|} \quad (3)$$

Los valores de los píxeles de dNBR y RdNBR en las parcelas fueron extraídos usando interpolación bilineal.

2.4. Datos de campo

En el otoño siguiente al incendio se recogió información de campo sobre la severidad del fuego mediante la instalación de parcelas de muestreo. En ellas se obtuvo el valor del índice CBI (*Composite*

Burning Index) siguiendo el protocolo de Key y Benson (2006). Aunque este índice tiene limitaciones importantes para reflejar la severidad del fuego en alguno de los componentes del ecosistema (De Santis, 2009), continua siendo un indicador de referencia que trata de integrar el efecto del fuego en diferentes estratos de vegetación y suelo (Fernández *et al.*, 2008). Las parcelas se instalaron a partir de un muestreo estratificado aleatorio. Inicialmente se estratificó el área quemada en las 4 clases de severidad de dNBR propuestas por Key y Besson (2006) y se identificaron en cada estrato zonas de severidad homogéneas, de un tamaño mínimo de 3x3 píxeles. Posteriormente se seleccionaron aleatoriamente algunas de estas zonas para instalar en ellas parcelas circulares, cuidando que entre sus centros hubiera una distancia superior a 90 m y de modo que el número de parcelas por estrato fuese proporcional a su superficie. Los centros se materializaron en campo con ayuda de GPS de alta precisión. Finalmente, se instalaron un total de 64 parcelas de muestreo (Figura 2).

Teniendo en cuenta las características de los combustibles del sotobosque y de las masas forestales del incendio analizado, al igual que otros autores (Epting *et al.*, 2005; Holden *et al.*, 2009) no se consideraron en la determinación de CBI los estratos de herbazales y el de árboles intermedios, debido a su muy escasa presencia en las áreas quemadas. Para el sustrato no se tuvieron en cuenta ni los combustibles medios (*Medium Fuel*, 3-8 in) ni los pesados (*Heavy Fuel* > 8 in) debido a su ausencia en las áreas afectadas. Aprovechando las



Figura 2. Detalles de algunas mediciones en las parcelas de campo del incendio siguiendo el protocolo CBI.

estimaciones *de visu* del porcentaje de ocupación de los diferentes niveles de daño del fuego a las copas (verdes, soflamadas, consumidas), obtenidos mediante el protocolo CBI, y con ayuda de numerosas fotos del incendio tomadas desde el helicóptero, las parcelas de arbolado se clasificaron de acuerdo con el nivel de afectación observado en el arbolado, según el siguiente criterio: a) >50% de la superficie con el arbolado con copas verdes, b) 50-90% de la superficie con el arbolado con copas soflamadas y el resto con arbolado con copas verdes, c) 50-100% de la superficie con el arbolado con las copas soflamadas y el resto con arbolado con copas consumidas por el fuego, d) >50% de la superficie con el arbolado con las copas consumidas por el fuego.

2.5. Análisis estadístico

Las relaciones entre los valores de severidad del fuego obtenidos en las parcelas de campo (CBI) y las medidas recogidas a través de los sensores remotos se estimaron mediante modelos de regresión. Se usaron los valores CBI como predictores, debido a su significación ecológica, y los de dNBR y RdNBR como variables dependientes. Además, el uso de umbrales de CBI para separar niveles de severidad del fuego permite obtener puntos de corte o umbrales para diferenciar rangos de dNBR y RdNBR, a través de las ecuaciones de regresión obtenidas, ligando CBI y las variables espectrales (Picotte y Robertson, 2011). Con estos rangos es posible clasificar los píxeles del área incendiada y obtener una cartografía de la severidad del fuego.

Un análisis exploratorio de los datos indicó que las relaciones entre CBI y las señales espectrales no eran lineales. Se testaron modelos polinómicos, exponenciales y potenciales, ajustados por mínimos cuadrados, seleccionándose el mejor en función del mayor coeficiente de determinación R^2 y menor RMSE (raíz cuadrada del residuo medio cuadrático). Según lo anterior se eligió un modelo potencial de la forma:

$$y = a + b \cdot CBI^c \quad (4)$$

Siendo y las métricas derivadas de satélite y a , b y c los coeficientes del modelo. Se testaron también la normalidad y la homocedasticidad de los residuos del modelo.

Los umbrales de niveles de severidad de CBI empleados en este estudio fueron: a) Sin quemar=0-0,25, b) Baja=0,25-1,25, c) Moderada=1,25-2,25, d) Alta=2,25-3. Los límites de 1,25 y 2,25 son comúnmente usados (e.g. Soverel *et al.*, 2010; Cansler y McKenzie, 2012), mientras que no existe un consenso para el límite que separa las zonas sin quemar de las afectadas por baja severidad. Por ejemplo, Miller y Thode (2007) utilizan 0,1 y Picotte y Robertson (2011) utilizan 0,75. En este caso se usaron las marcas de clase de los rangos no quemado y bajo de la clasificación de Key y Benson (2005). Esos umbrales de CBI permitieron determinar los de dNBR y RdNBR, estableciendo así las respectivas clases de severidad del fuego.

La comparación entre dNBR y RdNBR se efectuó en función de los valores del coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE) del modelo y la precisión con la que se clasificaron las parcelas y el valor de reflectancia de los píxeles asociados a ellas. La precisión de la clasificación desarrollada se obtuvo a través de una matriz de confusión que sirvió para calcular cuatro tipos de precisión: a) la del productor (definida como el porcentaje de parcelas CBI correctamente clasificadas en cada clase de severidad), b) la del usuario (porcentaje de valores de píxeles clasificados correctamente en cada clase de severidad), c) la precisión conjunta (porcentaje de clasificaciones correctas para el conjunto de las clases de severidad) y d) los valores del estadístico Kappa (Congalton and Green, 1999). Por último, se exploró, tanto para dNBR y como para RdNBR, por separado, si los niveles de afectación a la copa del arbolado por el fuego, distinguidos en las parcelas de campo, diferían entre sí de manera significativa. Para ello se utilizó el test de Kruskal-Wallis y en su caso el test de Mann-Whitney.

3. Resultados

El valor promedio de la severidad del fuego para el incendio de Oia-O Rosal (Tabla 2), obtenido a través del CBI de las 64 parcelas, fue de 2, correspondiéndose con una severidad del fuego moderada-alta (Key y Benson, 2006) y presentando un rango amplio. La media de los valores de la totalidad de píxeles incluidos en el incendio (Tabla 2) fue de dNBR (522) y RdNBR (668), que se corresponden con una clase de severidad

moderada y alta, respectivamente, según los intervalos obtenidos en este estudio (Tabla 4) y moderado-alto y alto, respectivamente, según la clasificación de Key y Benson (2006), con un rango también amplio en los dos casos.

Tabla 2. Valores medios y rango (entre paréntesis) de CBI, dNBR, RdNBR para el incendio.

Nº parcelas	CBI	dNBR	RdNBR
64	2,0 (0,9-2,7)	522,1 (56,6-874,5)	667,9 (65,4-1099,6)

Los modelos de regresión de dNBR y RdNBR con CBI presentaron valores del coeficiente de determinación de 0,69 y de 0,72, respectivamente (Tabla 3 y Figura 3).

Tabla 3. Modelos de regresión, coeficiente de determinación (R^2), y la raíz cuadrada del residuo medio cuadrático (RMSE) de dNBR y RdNBR para el incendio.

	N	Ecuaciones	R^2	RMSE
dNBR	64	$-388,7+438,1(CBI^{1,015})$	0,692	132,8
RdNBR	64	$-471,7+517,3(CBI^{1,093})$	0,727	162,4

Introduciendo los umbrales de CBI correspondientes a los distintos niveles de severidad en los modelos se obtuvieron los intervalos para las correspondientes clases de severidad de dNBR y RdNBR para el incendio (Tabla 4).

La precisión conjunta de la clasificación de niveles de severidad del fuego obtenida fue de 75 y de

Tabla 4. Intervalos de dNBR y RdNBR para los umbrales de CBI=0,25 (sin quemar/baja), 1,25 (baja/moderada) y 2,25 (moderada/alta) para el incendio.

	Sin quemar/Baja	Baja/moderada	Moderada/Alta
dNBR	-281,4	160,8	609,1
RdNBR	-358,0	188,5	783,4

82,8 para el dNBR y RdNBR respectivamente (Tabla 5). Por su parte el estadístico kappa fue de 0,560 para el dNBR (moderado acuerdo entre las clasificaciones) y de 0,699 para el RdNBR (sustancial acuerdo entre clasificaciones) (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de la precisión (%) de la clasificación obtenida por el modelo, desde el punto de vista del productor y del usuario, valores de precisión conjunta (PC, %) y kappa para el incendio.

	Productor			Usuario			P.C.	Kappa
	Baja	Mod.	Alta	Baja	Mod.	Alta		
dNBR	80,0	70,6	80,0	80,0	80,0	69,1	75,0	0,560
RdNBR	80,0	76,5	92,0	80,0	89,7	76,7	82,8	0,699

Los mapas de severidad de los índices dNBR y RdNBR del incendio (Figura 4) permiten visualizar las pautas espaciales de las clases de severidad en el área quemada. Se aprecia que los mapas dNBR y RdNBR ofrecen, en este incendio, una distribución de áreas afectadas por los distintos niveles de severidad del fuego algo distinta.

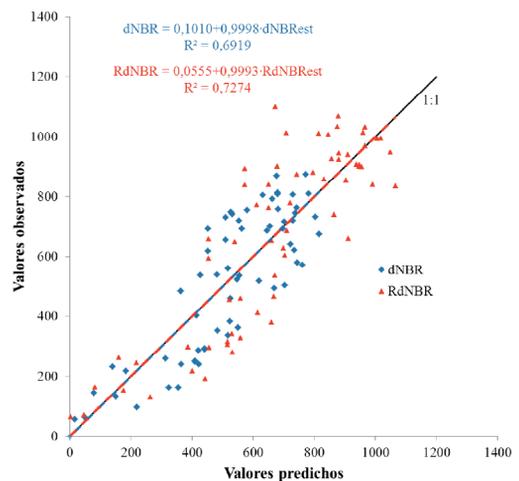
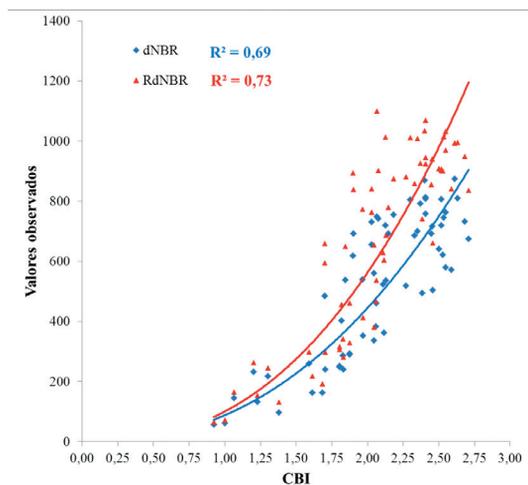


Figura 3. Diagrama de dispersión de los índices dNBR y RdNBR en función del CBI para el incendio (izquierda). Valores observados frente a valores predichos de los dos índices. La línea 1:1 es la diagonal (derecha).

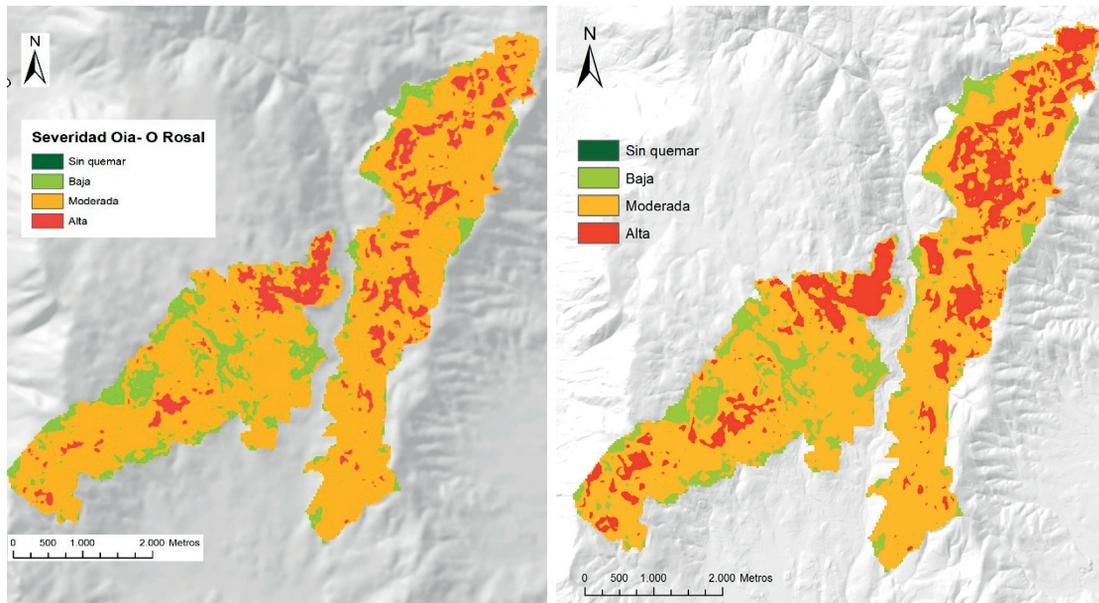


Figura 4. Mapas de severidad del fuego, según los índices dNBR (izquierda) y RdNBR (derecha), para el incendio.

En la Tabla 6 se incluye la superficie y porcentajes del área quemada respectiva para cada clase de severidad (sin quemar, baja, moderada y alta) obtenida de los mapas de severidad desarrollados (dNBR y RdNBR). Se observa que el porcentaje de superficie quemada por el incendio en las clases de severidad moderada y alta fue distinto en los respectivos mapas, con un claro aumento en la categoría de severidad alta para RdNBR (68% de incremento relativo al valor de dNBR), así como un descenso en las categorías moderada (9% de variación relativa a dNBR) y baja (12%).

Tabla 6. Área (ha) y porcentaje de superficie quemada (entre paréntesis) (%) para cada clase de severidad de dNBR y RdNBR en el incendio.

	Sin quemar	Baja	Moderada	Alta	Total
dNBR	0,1 (0,0)	256,2 (13,9)	1356,8 (73,8)	225,0 (12,2)	1838
RdNBR	0,1 (0,0)	224,4 (12,2)	1237,3 (67,3)	376,2 (20,5)	1838

Los niveles de afectación a la copa producidos por el fuego y distinguidos en el campo fueron también correctamente diferenciados por los índices dNBR y RdNBR, respectivamente, para el conjunto de todas las parcelas con arbolado en el incendio (Figura 5).

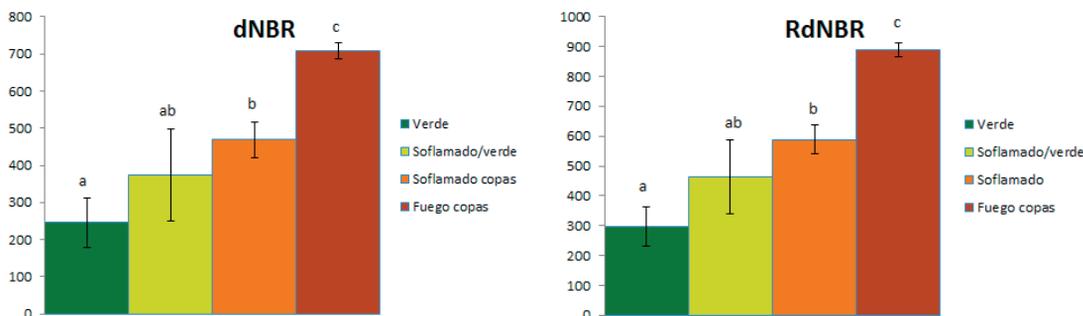


Figura 5. Valores medios de los índices dNBR (izquierda) y RdNBR (derecha) para las parcelas arboladas que muestran niveles de severidad de daño a la copa diferentes (verde, sofamado verde, sofamado de copas y fuego de copas) en el incendio. Barras, error estándar. Letras minúsculas iguales indican que los valores de dNBR y RdNBR para esos niveles de severidad no difieren significativamente.

4. Discusión y conclusiones

La ausencia de linealidad entre los índices espectrales y CBI es concordante con lo encontrado por varios autores previamente (e.g. Van Wagtenonk *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2009). Esta respuesta se ha atribuido a una saturación de la banda 7 de Landsat (SWIR) junto a un decrecimiento de la banda NIR cuando se incrementa la severidad (Chuvieco *et al.*, 2006), suponiendo en principio una disminución de la sensibilidad de los índices para las altas severidades.

El valor del coeficiente de determinación de la relación entre dNBR y CBI ($R^2=0,69$) fue muy similar a los encontrados por Epting *et al.* (2005), Soverel *et al.* (2010), Picotte y Robertson (2011) o Parks *et al.* (2014), ligeramente inferiores a los de Van Wagtenonk *et al.* (2004) o Hall *et al.* (2008) y superiores a los de Miller y Thode (2007) y Cansler y McKenzie (2012). En cuanto al índice relativo RdNBR, nuestro valor ($R^2=0,73$) fue también similar a los hallados por Miller y Thode (2007), Miller *et al.* (2009), Soverel *et al.* (2010), y Parks *et al.* (2014) y superiores al encontrado por Cansler y McKenzie (2012). Todos estos estudios se refieren a bosques de Norteamérica y al no disponerse de datos correspondientes a bosques de Galicia, no es posible establecer comparación con nuestros datos.

Por otra parte, nuestras precisiones globales (dNBR= 75%, RdNBR=83%) y estadístico kappa (dNBR= 0,56 y RdNBR= 0,70) están dentro de los rangos encontrados en los estudios citados en áreas forestales muy diferentes a las de Galicia, quedando por encima de la media de ese rango para kappa en RdNBR, un poco por encima de la media para la precisión conjunta en RdNBR y en dNBR y muy parecido a la media para kappa en dNBR.

La mayor precisión obtenida en la clase de alta severidad en comparación con el de moderada severidad, encontrado para el productor, en los índices dNBR y RdNBR es consistente con lo hallado por Cocke *et al.* (2005), Miller y Thode (2007) y Cansler y McKenzie (2012). Sin embargo, esto no ocurrió para el usuario, donde la precisión fue mayor para la severidad moderada en ambos índices. Esto significa una ligera pérdida de eficacia desde el punto de vista del gestor. En conjunto, puede decirse que el índice RdNBR

permite estimaciones más precisas para este incendio que el dNBR.

En relación a los intervalos de dNBR, el valor del umbral que separa las clases moderada y alta obtenido en nuestro estudio (609) es ligeramente superior al encontrado por Cocke *et al.* (2005) y Soverel *et al.* (2010) y superior al de otros estudios (Key and Benson, 2006; Miller and Thode, 2007; Hall *et al.*, 2008; Cansler and McKenzie, 2012).

Para el umbral de dNBR que separa las clases de severidad baja y moderada, nuestro valor (161) es muy similar al indicado por Miller y Thode (2007), Cansler y McKenzie (2012) y Parks *et al.* (2014) y está por debajo de los valores encontrados por Cocke *et al.* (2005), Key y Benson (2006), Hall *et al.* (2008) y Soverel *et al.* (2010). Por último, el umbral que separa las zonas sin quemar de las afectadas por baja severidad del fuego (-281) fue notablemente inferior al de los estudios citados.

En cuanto a los umbrales para el índice RdNBR, el valor de separación de las clases moderada y alta (783) fue ligeramente superior al de Cansler y McKenzie (2012) y Parks *et al.* (2014) y mayor al de Miller y Thode (2007) y Holden *et al.* (2009). Por su parte, el umbral que separa las severidades baja y moderada (189) es inferior al encontrado por Miller y Thode (2007), Parks *et al.* (2014) o Cansler y McKenzie (2012). Finalmente, el umbral entre zonas no ardidadas y las afectadas por baja severidad (-358) fue muy inferior al de Miller y Thode (2007), Cansler y McKenzie (2012) y Parks *et al.* (2014).

Las diferencias de valores de umbrales separando las severidades altas y moderadas en los estudios precedentes sugieren que esos límites pueden ser muy dependientes de características no muy bien conocidas de los respectivos ecosistemas y de otros factores y que, por lo tanto, su extrapolación a otros ecosistemas resulta problemática.

Los bajos umbrales de separación para la baja severidad y zonas no quemadas en dNBR y RdNBR observados en nuestro estudio podrían deberse a que los fuegos de baja severidad en Galicia presentan un nivel de daños por el fuego al ecosistema inferior al que ocurre en otras áreas forestales de clima más mediterráneo, debido a las condiciones meteorológicas y a la humedad de los combustibles, menos desfavorables en Galicia.

Habitualmente se considera que los intervalos de RdNBR son más consistentes para su extrapolación a otros incendios distintos a donde fueron calibrados (Miller *et al.*, 2009; Cansler and McKenzie, 2012; Parks *et al.* 2014), especialmente para el umbral que separa las clases de moderada y alta severidad, y se aduce como argumento la falta de relación entre RdNBR y NBR pre. En nuestro caso, esa ausencia de relación se dio entre dNBR y NBR pre y entre RdNBR y NBR pre, ya que estos últimos presentaron una débil correlación ($R^2=0,205$). Por lo tanto, no queda clara la ventaja del uso de unos u otros umbrales en nuestro caso. De cualquier forma, la población utilizada para la fijación de esos umbrales, aunque proceda de unos rangos de severidad amplios, parece demasiado limitada para poder afirmar de manera general lo anterior y ese punto necesita ser confirmado con nuevos muestreos.

Finalmente, los índices dNBR y RdNBR permitieron diferenciar entre cuatro niveles de afectación a la copa del arbolado. Escuín y Navarro (2008) también encontraron que fue posible distinguir las áreas afectadas por fuego de copas de otras donde las copas estaban soflamadas. Esto resulta especialmente interesante desde el punto de vista de su aplicabilidad para detectar fuegos de copas, ya que son lugares donde el impacto ecológico del fuego es previsiblemente mayor.

Podemos concluir resaltando alguno de los resultados hallados en nuestro estudio: *i*) los modelos de regresión no lineales, desarrollados para estimar dNBR y RdNBR en función del CBI, han permitido determinar umbrales de separación de clases de severidad del fuego en las condiciones de Galicia. No obstante, estos valores deben considerarse como provisionales y nuevas mediciones de campo ligadas a observaciones satelitales de incendios serán necesarios para confirmar esos umbrales; *ii*) aunque los dos índices satelitales presentaron buenas precisiones respecto a la clasificación de la severidad del fuego de las áreas afectadas, RdNBR mostró ventaja en relación a dNBR; *iii*) la mayor precisión de los dos índices en el nivel de severidad moderado, en relación al usuario, respecto a la alta severidad no representa una fuerte limitación a su uso, dado el razonablemente alto nivel de precisión obtenido en la severidad alta.; *iv*) los mapas de severidad obtenidos con dNBR mostraron menos superficie quemada con alta severidad, en comparación con

RdNBR y lo contrario para la moderada severidad, respectivamente. Esto afecta a la gestión de la priorización de acciones de mitigación post-incendio, como es el caso de la aplicación de los tratamientos de control de la erosión. Aunque se necesitará ampliar esta investigación en el futuro para valorar adecuadamente esa respuesta, lo anterior sugiere que los gestores confirmen sobre el terreno la adecuación de las dos estimaciones; *v*) ambos índices satelitales mostraron una capacidad similar para separar diferentes niveles de afectación por el fuego en el dosel arbóreo; *vi*) nuestro estudio aporta nuevos datos sobre la comparación de dos índices de teledetección para evaluar la severidad de incendios forestales en Galicia que pueden ser de utilidad a la gestión post-incendio si bien necesitarán ser completados en el futuro con nueva información de otros incendios.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a E. Pérez, J.R. Currás, E. Jiménez, J. M^a Fernández, J. L. Pardo, E. Puga, N. Méndez, M. Martínez, C. Eimil, M. Lopez, D. García, F. Martínez, T. Fernández, B. Domínguez, S. Castiñeiras por su colaboración. Asimismo a la Dirección Xeral de Montes de la Consellería de Medio Rural de la Xunta de Galicia y a la empresa pública SEAGA e INDITEX, por su apoyo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto INIA-RTA 2011- 00065 -C02-00: “Rehabilitación y restauración post-incendio: Efectos en el tiempo sobre la recuperación de la vegetación afectada, su inflamabilidad y en la calidad del suelo” y el proyecto GEPRIF. INIA-RTA2014-00011-C06-00: “Reducción de la Severidad del Fuego Mediante Nuevas Herramientas y Tecnologías para la Gestión Integrada de la Protección contra los Incendios Forestales”, ambos con financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciados por FEDER.

Referencias

Álvarez, M.T., Rodríguez-Pérez, J.R., Castedo-Dorado, F., Vega, D. 2007. An operational protocol for post-fire evaluation at landscape scale in an object-oriented environment. In: Gitas & Carmona. *Proceedings of the 6th International Workshop of the EARSEL FFSIG*. European Commission, JRC, Ispra (Italy), 202-207.

- Arellano, S. 2008. *Índices meteorológicos de peligro de incendios forestales en Galicia: Evidencias de cambio climático y su relación con la frecuencia de fuegos y superficie afectada*. Proyecto fin de carrera. Escuela Técnica de Ingeniería Forestal. Universidad de Vigo, 409 pp.
- 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 Sensing*, 4, 456-483. <https://doi.org/10.3390/rs4020456>
- Chuvieco, E. 2009. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Alcalá de Henares, Spain: Springer. 257 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4>
- Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F.M., Martín, M.P. 2006. Use of radiative transfer model to simulate the post-fire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research*, 111, G04S09. <https://doi.org/10.1029/2005JG000143>
- Congalton, R.G., Green, K. 1999. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. New York: Lewis Publishers, 137 pp.
- 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(3), 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. 2004 Statistical analysis of fire frequency models for Catalonia (NE Spain, 1975-1998) based on fire scar maps from Landsat MSS data. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 89-99. <https://doi.org/10.1071/WF02051>
- Enriquez, E., Del Moral, L. 2012. *Los Incendios Forestales en España. Decenio 2001-2010*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: Madrid.
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B. 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>
- Escuin, S., Fernández, P., Navarro, R.M., 2002. Aplicación de escenas Landsat a la asignación de grados de afectación producidos por incendios forestales. *Revista de Teledetección*, 17, 77-87. Último acceso: noviembre de 2017. <http://www.aet.org.es/revistas/revista17/AET17-09.pdf>
- Fernández, C., Vega J.A., Fonturbel, M.T., Jiménez, E., Pérez-Gorostiaga, P. 2008. Wildfire, salvage logging and slash manipulation effects on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (N.W. of Spain). *For. Ecol. Manage.*, 255, 1294-1304. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.034>
- Fernández-Manso, A., Quintano, C. 2015. Evaluating Landsat ETM+ emissivity-enhanced spectral indices for burn severity discrimination in Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sensing Letters*, 6(4), 302-310. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1029093>
- García-Duro, J., Manso, A., Cruz, O., Basanta, M., Casal M., Reyes, O. 2016. Regeneración post-fuego en relación con la severidad del incendio en un área atlántica de Galicia. Bases para la restauración. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 42, 129-140.
- Hall, R.J., Freeburn, J.T., Groot, W.J.G., Pritchard, J.M., Lynham, T.J., Landry, R. 2008. Remote sensing of burn severity: Experience from western Canada boreal fires. *International Journal of Wildland Fire*, 17, 476-489. <https://doi.org/10.1071/WF08013>
- 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 U.S. wilderness area. *For. Ecol. Manage.*, 258(11), 2399-2406. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.08.017>
- 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. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301064>
- Keeley, J. E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Key, C.H., Benson, N.C. 2006. Landscape Assessment (LA). In: Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., & Gangi, L.J. (eds.), *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, 1-55.
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M.S., Falkowki, 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. *Int. J. Wildland Fire*, 15, 319-345. <https://doi.org/10.1071/WF05097>

- Lentile, 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. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 594-608. <https://doi.org/10.1071/WF07091>
- Martín, M.P., Chuvieco, E., Oliva, P., Rodríguez-Verdú, F., Nieto, H., Padrón, D. 2007. Un ejemplo práctico de aplicación operativa de la teledetección a la gestión de riesgos naturales: Cartografía y evaluación urgente de áreas quemadas en Galicia. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 33, 19-37. <https://doi.org/10.18172/cig.1187>
- 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, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- 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*, 113, 645-656. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009>
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Tanase, M. A., de la Riva, J. 2014. Forest fire severity assessment using ALS data in a Mediterranean environment. *Remote Sensing*, 6(5), 4240-4265. <https://doi.org/10.3390/rs6054240>
- Montorio Llovería, R., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova, L., de la Riva Fernández, J. 2014. La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: Arnáez Vadillo, J., González Sampérez, P., Lasanta Martínez, T., Valero Garcés, B.L. (ed.) *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Instituto Pirenaico de Ecología: Universidad de La Rioja.
- Morgan, P., Keane, R. E., Dillon, G. K., Jain, T. B., Hudak, A. T., Karau, E. C., Strand, E. K. 2014. Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 23(8), 1045-1060. <https://doi.org/10.1071/WF13058>
- Parks, S.A., Dillon, G.K., Miller, C. 2014. A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing*, 6, 1827-1844. <https://doi.org/10.3390/rs6031827>
- Pérez-Cabello, F., de la Riva Fernández, J., Montorio Llovería, R., García-Martín, A. 2006. Mapping erosion-sensitive areas after wildfires using fieldwork, remote sensing, and geographic information systems techniques on a regional scale. *J. Geophys. Res.*, 111. <https://doi.org/10.1029/2005JG000148>
- Picotte, J.J., Robertson K.M. 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>
- Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G. 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. *USDA Forest Service. General Technical Report. RMRS-GTR.-63*.
- Soverel N.O., Perrakis, D.D.B., Coops N.C. 2010. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1896-1909. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.013>
- Van Wagtenok, J.V., Roo, R.R., Key, C.H. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92, 397-408. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.015>
- Vega, J.A., Fernández, C., Jiménez, E., Ruiz, A.D. 2009a. Evidencias de cambio climático en Galicia a través de la tendencia de los índices de peligro de incendios forestales. En: *Análisis de Evidencias e Impactos del Cambio Climático en Galicia*. Santiago de Compostela. Xunta de Galicia. 173-194.
- Vega, J.A., Fernández, C., Jiménez, E., Ruiz, A.D. 2009b. Impacto de un escenario de cambio climático sobre el peligro de incendios en Galicia. En: *Análisis de Evidencias e Impactos del Cambio Climático en Galicia*. Santiago de Compostela. Xunta de Galicia. 583-607.
- Vega, J.A., Fonturbel, T., Fernández, C., Arellano, A., Díaz-Raviña, M., Carballas, M.T., Martín, A., González-Prieto, S., Merino A., Benito, E. 2013. *Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas. Guía para su planificación en Galicia*. Xunta de Galicia. pp. 139.
- Vega, J.A., Fernández, C., Fonturbel, T. 2015. Comparing the effectiveness of seeding and mulching + seeding in reducing soil erosion after a high severity fire in Galicia (NW Spain). *Ecological Engineering*, 74, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.019>

Veraverbeke, S., Harris, S., Hook, S. 2011. Evaluating Spectral Indices for Burned Area Discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) Airborne Simulator Data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2702–2709. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.010>

Veraverbeke, S., Hook, S., Hulley, G. 2012. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sens. Environ.*, 123, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.025>