



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-428

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Evaluación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para cartografiar la severidad del fuego en el incendio forestal de Ponte Caldelas (Pontevedra) de 2013.

ARELLANO PÉREZ, S.^{1,2}, VEGA HIDALGO, J. A.¹, RODRIGUEZ Y SILVA, F.³, FERNÁNDEZ FILGUEIRA, C. ¹, VEGA-NIEVA, D.⁴, RUIZ GONZÁLEZ, A.D.² y ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G. ².

¹ Departamento de Protección, Centro de Investigación Forestal de Lourizán (Pontevedra).

² Unidad de Gestión Forestal Sostenible, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela.

³ Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales (LABIF), Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba.

⁴ Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez de Durango (México).

Resumen

Evaluar y cartografiar la severidad del fuego son actividades capitales para determinar el impacto ecológico de los incendios forestales y planificar la gestión post-incendio. En este estudio se contrastó la idoneidad de los índices dNBR (differenced Normalized Burn Ratio) y RdNBR (relative differenced Normalized Burn Ratio), obtenidos de imágenes de Landsat 8, para estimar la severidad del fuego en un gran incendio ocurrido en Ponte Caldelas (Pontevedra) en el año 2013. Para ello se relacionaron ambos índices de teledetección con información de campo recogida de acuerdo al protocolo Composite Burn Index (CBI) y se obtuvieron modelos de estimación que explicaron más del 77% de la variabilidad observada. La precisión de conjunta de ambos modelos fue buena y muy similar (72% y 74%, respectivamente). No obstante, el mapa de severidad de dNBR mostró menos superficie afectada con alta severidad que el obtenido con RdNBR, mientras para la severidad moderada ocurrió lo contrario. Aunque estos datos deben considerarse preliminares, y necesitarán ser completados y validados con nueva información, pueden servir de una primera ayuda para conocer la distribución espacial de la severidad en incendios forestales de Galicia.

Palabras clave

Efectos del fuego, índices espectrales, Landsat 8, Composite Burn Index.

1. Introducción

La severidad del fuego determina el grado de cambio ecológico que causa el incendio (KEY & BENSON, 2006). Evaluarla resulta crítico para numerosos aspectos científicos y de gestión ligados a los incendios forestales (ROBICHAUD et al., 2000; KEELEY, 2009; PARSONS et al., 2010). Además, las proyecciones del cambio climático auguran un incremento de la severidad de los incendios forestales tanto en el ámbito ibérico mediterráneo (MORENO, 2005) como en el noroeste atlántico (ARELLANO, 2008; VEGA et al., 2009), estando esta última región especialmente castigada por el fuego.

Los índices espectrales satelitales constituyen una herramienta imprescindible para obtener información sobre la severidad del fuego (HUDAK et al., 2007; PARSONS et al., 2010), ayudando en numerosas tareas asociadas a la gestión post-incendio. No obstante, presentan diversas limitaciones que implican la necesidad de testarlos con información sobre el terreno (HUDAK et al., 2007; MENG & MEENTEMEYER, 2011; MILLER & THODE, 2007; SOVEREL et al., 2010).

Los índices dNBR y RdNBR, obtenidos a partir de imágenes de Landsat, tienen ya una larga tradición de uso como estimadores de la severidad del fuego desde que LÓPEZ-GARCÍA & CASELLES (1991) propusieran el Normalized Burn Ratio (NBR) y KEY & BENSON (2006) lo reformularan. Aunque desde entonces se han generado nuevos indicadores basados en sensores remotos, los arriba mencionados continúan utilizándose de forma asidua para obtener la distribución espacial de la severidad en los incendios y, a pesar de sus limitaciones, se consideran aceptablemente fiables en

comparación con los nuevos indicadores (VERAVERBEKE et al., 2012). Sin embargo, dado que los umbrales de separación de las diferentes clases de severidad obtenidos en distintos ecosistemas muestran bastante variabilidad, resulta fundamental la construcción y testado con datos de campo de modelos específicos, adaptados a diferentes tipos de bosque. En este contexto resulta de gran interés determinar y comparar la idoneidad de ambos índices para evaluar la severidad en incendios de Galicia así como su calibrado a las condiciones específicas de la región.

2. Objetivos

Los objetivos que se proponen, centrados en el estudio de un gran incendio de la provincia de Pontevedra, son: i) construir y testar modelos empíricos, basados en las relaciones entre estimaciones de severidad del fuego en campo (CBI) y los índices derivados de sensores remotos dNBR y RdNBR; ii) establecer los umbrales de los mencionados índices que permitan determinar diferentes clases de severidad del fuego en la vegetación y; iii) contrastar las capacidades de ambos índices para clasificar los niveles de severidad del fuego en el incendio, especialmente en las áreas afectadas por fuego de copas.

3. Metodología

El estudio se basa en el gran incendio forestal de Ponte Caldelas (Pontevedra), ocurrido en septiembre del año 2013 (Tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas UTM, fecha de inicio, y características del incendio

UTM (m)	Fecha	Superficie (ha)	Altitud (m)	Pendiente ponderada (°)	Especies vegetales principales
541183,26 4690318,6	04-09-13	747	284 -547	2,8	<i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Pinus pinaster</i> , <i>Ulex sp.</i> y <i>Erica umbellata</i>

Los índices dNBR y RdNBR se determinaron a partir de imágenes de satélite Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission), descargadas del USGS (United States Geological Survey) EROS Center (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Se escogieron dos imágenes libres de nubes y lo más cercanas posibles a la fecha del incendio: una pre-fuego (14/08/2013) y otra post-fuego (15/09/2013). De esta forma se trató de reducir las diferencias fenológicas y de ángulo solar. La referencia espacial (path/row) del incendio es 205/30.

Los valores digitales de todas las imágenes se transformaron en reflectancias aparentes TOA, con corrección para el ángulo solar (corrección radiométrica). Se asumió que la dispersión atmosférica es insignificante en bandas infrarrojas (AVERY & BERLIN, 1992) y por ello no se realizó ninguna corrección atmosférica, al igual que otros autores (e.g. ESCUIN et al., 2002; MILLER & THODE, 2007). Tampoco fue necesaria la corrección geométrica puesto que las imágenes ya estaban orto-georreferenciadas.

Los valores de NBR para cada pixel se calcularon según la ecuación de KEY & BENSON (2006), mientras que los valores de dNBR se obtuvieron como la diferencia de los respectivos valores de NBR pre y post-fuego y los de RdNBR se determinaron siguiendo a MILLER & THODE (2007).

Para testar los dos índices remotos con datos de campo se instalaron 83 parcelas en el otoño siguiente al incendio. En las parcelas se tomó la información necesaria para la determinación del índice CBI de acuerdo con el protocolo de KEY & BENSON (2006). Para determinar la ubicación de las parcelas se estratificó el área quemada en niveles de dNBR de acuerdo con los rangos establecidos

por dichos autores y con una ventana de 3x3 píxeles. A continuación, y dentro de cada rango, se seleccionaron aleatoriamente las zonas para ubicar las parcelas y también las posiciones de sus centros, materializados con GPS de alta precisión (*Trimble Geo 7X*).

Las parcelas se clasificaron según el porcentaje de su superficie afectado por los diferentes niveles de daño en el arbolado: 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, lo que indicaría la ocurrencia de fuego de copas.

Se emplearon modelos de regresión potenciales para explorar relaciones entre los índices obtenidos de los sensores remotos y los valores de CBI tomados en campo, usándose estos últimos como predictores de aquellos (e.g. MILLER & THODE, 2007; CANSLER & MCKENZIE, 2012).

$$y = a + b \cdot CBI^c$$

Donde y es el valor del índice que se pretende predecir (dNBR y RdNBR), y a , b y c son parámetros a estimar.

Una vez ajustados los modelos, los umbrales de los índices dNBR y RdNBR para cada rango de severidad se estimaron entrando en cada modelo con los siguientes valores umbrales de CBI por rango de severidad (KEY & BENSON, 2006): 0-0,25 (Sin quemar); 0,25-1,25 (Severidad Baja); 1,25-2,25 (Severidad alta) y 2,25-3 (Severidad Alta), del mismo modo que PICOTTE & ROBERTSON (2011).

La bondad del ajuste de los modelos se analizó mediante los valores del coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE). Por otro lado, para comparar la capacidad discriminante de cada modelo, es decir, la fiabilidad con la que se asignaron clases de severidad a las parcelas de campo, se construyó una matriz de confusión, en la que se calculó la precisión del productor (ratio del número de coincidencias entre observado y clasificado por el modelo y el número de registros observados para cada clase de severidad), la precisión del usuario (ratio del número de coincidencias entre observado y clasificado por el modelo y el número de registros clasificados para cada clase de severidad), la precisión conjunta (relación entre los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados), así como el valor del estadístico Kappa (CONGALTON & GREEN, 1999), interpretado según los rangos propuestos por LANDIS & KOCH (1977).

La capacidad de los modelos ajustados de dNBR y RdNBR, por separado, para diferenciar los grados de afectación a la copa del arbolado por el fuego, evaluados en campo, se testó mediante las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Mann-Whitney.

4. Resultados

La severidad media del fuego en el incendio (Tabla 2) según las mediciones de campo (CBI) fue 1,9, considerada como moderadamente alta según la clasificación de KEY & BENSON (2006). Además, su rango de variación fue bastante amplio, indicando una buena representación de situaciones de severidad potencialmente diferentes.

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

Nº parcelas	CBI	dNBR	RdNBR
-------------	-----	------	-------

83	1,9 (0,2-2,8)	455,4 (30,6-851,9)	566,2 (42,1-1029,2)
----	---------------	--------------------	---------------------

Los modelos potenciales ajustados para cada uno de los dos índices así como los estimadores de bondad del ajuste se muestran en la Tabla 3. Los modelos explicaron más del 77% de la variabilidad observada, siendo algo más elevada en el caso del índice dNBR.

Tabla 3. Modelos de regresión ajustados, coeficiente de determinación (R^2), y raíz del error medio cuadrático (RMSE)

	n	Ecuaciones	R^2	RMSE
dNBR	83	$61,3+134,3 \cdot \text{CBI}^{1,633}$	0,792	97,0
RdNBR	83	$40,7+196,4 \cdot \text{CBI}^{1,507}$	0,779	126,8

Los umbrales de las clases de severidad de dNBR y RdNBR para el incendio obtenidos a partir de los umbrales de CBI de cada clase previamente establecidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Umbrales de dNBR y RdNBR estimados a partir de los umbrales de severidad para cada clase definidos como: CBI=0,25 (sin quemar/baja); CBI=1,25 (baja/moderada) y; CBI=2,25 (moderada/alta)

	Sin quemar /Baja	Baja /moderada	Moderada/Alta
dNBR	75,3	254,6	566,2
RdNBR	65,0	315,6	707,3

La precisión conjunta de la clasificación de niveles de severidad del fuego fue del 72% y del 74%, para dNBR y RdNBR, respectivamente (Tabla 5). Por su parte, el estadístico kappa indicó en los dos casos un moderado acuerdo entre las clasificaciones comparadas.

Tabla 5. Valores de la precisión (%) de la clasificación obtenida por el modelo, desde el punto de vista del productor, del usuario y conjunta así como, valor del estadístico kappa.

	Productor			Usuario			Precisión conjunta	Kappa
	Baja	Mod.	Alta	Baja	Mod.	Alta		
dNBR	69,2	67,4	79,2	56,3	77,5	70,4	71,8	0,520
RdNBR	76,9	65,2	87,5	55,6	83,3	72,4	73,6	0,580

Los mapas de severidad obtenidos a partir de las clasificaciones derivadas de los modelos ajustados para dNBR y RdNBR se muestran en la Figura 1.

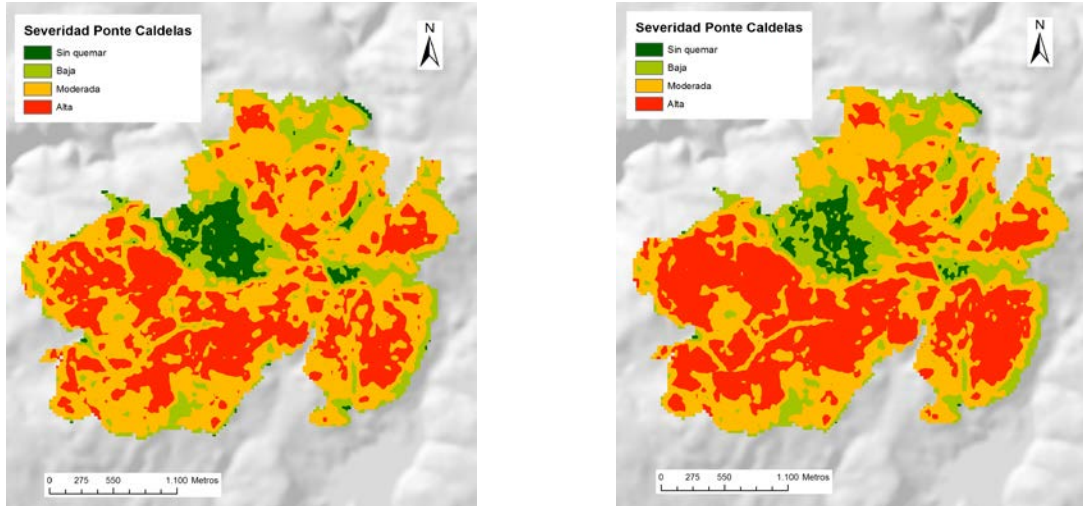


Figura 1. Mapas de severidad del fuego estimados con los modelos ajustados para dNBR (izquierda) y RdNBR (derecha).

Se observa que ambos mapas guardan bastante similitud, si bien resalta la mayor superficie clasificada como de severidad alta en el caso del RdNBR a consta de la reducción de la superficie clasificada como de severidad moderada. Esta diferencia queda recogida en la Tabla 6 en la que se muestra la superficie (en valor absoluto, y en porcentaje) clasificada en las distintas categorías de severidad.

Tabla 6. Área (ha) y porcentaje (paréntesis) por clase de severidad de dNBR y RdNBR en el incendio de Ponte Caldelas

	Sin quemar	Baja	Moderada	Alta	Total
dNBR	42,0 (5,6)	111,0 (14,9)	368,8 (49,4)	225,3 (30,2)	747
RdNBR	29,0 (3,9)	120,4 (16,1)	306,4 (41,0)	291,2 (39,0)	747

Los índices dNBR y RdNBR se comportaron de manera similar respecto a su capacidad para discriminar los niveles de severidad de daño a la copa (Figura 2). Los dos índices separaron bien los niveles extremos de daño, pero no distinguieron las situaciones intermedias de sofiamado de la copa.

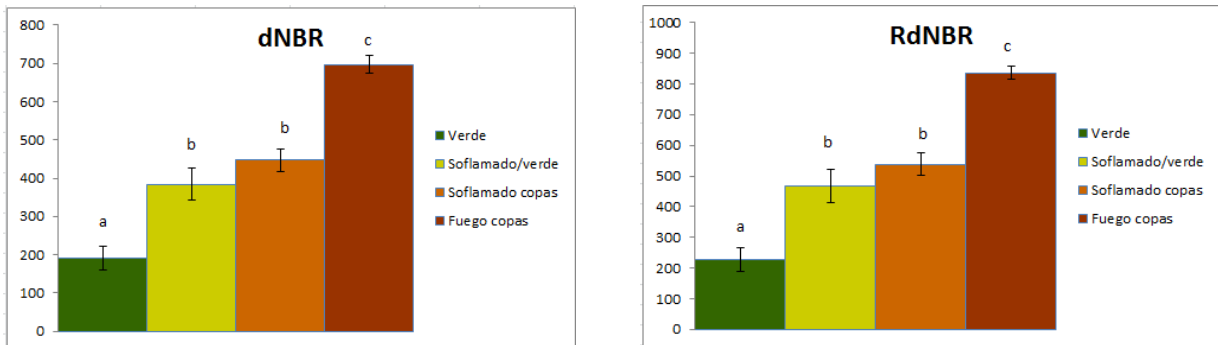


Figura 2 Valores medios de los índices dNBR (izquierda) y RdNBR (derecha) en parcelas arboladas del incendio para distintos niveles de daño en la copa. La longitud de las barras indica la magnitud del error estándar. Letras distintas indican valores significativamente diferentes (95%) para esos niveles de severidad.

5. Discusión

Los valores del coeficiente de determinación de los modelos ajustados fueron buenos y están dentro del rango de la mayoría de estudios similares en bosques de Norteamérica (e.g. MILLER &

THODE, 2007; HOLDEN & EVANS, 2010; PICOTTE & ROBERTSON, 2011; CANSLER & MCKENZIE, 2012), y ligeramente inferiores a los obtenidos por TANASE et al. (2011) en incendios de Aragón.

Las precisiones conjuntas de ambos índices fueron buenas y junto al estadístico kappa ligeramente superiores a la media de los valores observados en los estudios de bosques norteamericanos. La precisión estimada para el productor para los dos índices fue mayor en la clase de severidad alta que en la moderada; sin embargo, en el caso de la estimación de la precisión del usuario el resultado fue el contrario, lo que conlleva una menor eficiencia para el gestor post-incendio, puesto que va a cometer un mayor error en la asignación de la clase de severidad alta. En cualquier caso el porcentaje de coincidencia en esta clase supera el 70% para los dos modelos.

Los umbrales de severidad obtenidos resultaron en algunos casos muy similares a los hallados en estudios de bosques norteamericanos (e.g. COCKE et al., 2005; HALL et al., 2008; HOLDEN & EVANS, 2010), difiriendo en otros casos (e.g. MILLER & THODE, 2007; PARKS et al., 2014), sin que, aparentemente, se encontrara en esa respuesta una conexión clara con el tipo de bosque.

La similitud de comportamiento de los dos índices estudiados coincide con lo observado en otros estudios (e.g. HUDAK et al., 2007, SOVEREL et al., 2010; CANSLER & MCKENZIE, 2012). Es posible que la elevada fracción de cabida cubierta de la vegetación antes del incendio, típica en áreas forestales de Galicia, haya contribuido a esa respuesta, como han indicado los autores antes mencionados para bosques norteamericanos de alta cobertura. Sin embargo la misma respuesta ha sido también observada en vegetación más abierta (PARKS et al., 2014).

La buena capacidad de los índices dNBR y RdNBR para discriminar el fuego de copa es importante desde el punto de vista operativo, especialmente para la rehabilitación urgente post-fuego de acuerdo con las metodologías existentes (e.g. VEGA et al., 2013). Es además consistente con lo hallado por ESCUÍN et al. (2002) en Andalucía. Sin embargo, no está clara la razón por la que no fue posible diferenciar entre los grados intermedios de sofamado de las copas.

6. Conclusiones

Este estudio compara, por primera vez en Galicia, dos índices de teledetección para evaluar la severidad de un incendio, testándolos con datos de campo. Las buenas relaciones encontradas entre los índices dNBR y RdNBR y el índice CBI, posibilitaron fijar umbrales de clases de severidad del fuego en ese incendio así como una precisa clasificación del mismo por niveles de severidad.

La capacidad de los dos índices para separar bien las áreas afectadas por fuegos de copa supone una ayuda valiosa en las tareas de rehabilitación urgente tras incendio, particularmente en los de gran tamaño, al presentar esas zonas una alta prioridad en las actuaciones de mitigación del impacto del incendio.

Sin embargo, la predicción según dNBR de menor superficie quemada con alta severidad, en comparación con la de RdNBR, sugiere cierta limitación de ambos índices para la gestión, aconsejando confirmación en terreno de esas áreas. Esto evidencia que los resultados son preliminares y resalta la necesidad de seguir trabajando en la definición de mejores umbrales de severidad, repitiendo el estudio con nuevos incendios con el fin de que los resultados puedan generalizarse en la gestión post-incendio de Galicia.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto: "INIA-RTA2014-00011-C06-00: "GEPRIF:", cofinanciado por FEDER. Los autores agradecen también el apoyo de INDITEX.

8. Bibliografía

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. E. T. de Ingeniería Forestal. Universidad de Vigo. 409 pp.

AVERY, T.E.; BERLIN, G.L.; 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. Prencite Hall. 472 pp. Upper Saddle River, NJ

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.* 4: 456-483

COCKE, A.E.; FULE, P.Z.; CROUSE, J.E.; 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *Int. J. Wildland Fire* 3: 22-31

CONGALTON, R.G.; GREEN, K.; 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Lewis Publishers. 137pp. New York

ESCUIN, S.; FERNÁNDEZ, P.; NAVARRO, R.M.; 2002. Aplicación de escenas Landsat a la asignación de grados de afectación producidos por incendios forestales. *Rev. Teledetección* 17:77-87

HALL, R.J.; FREEBURN, J.T.; de GROOT, W.J.; PRITCHARD, J.M.; LYNHAM, T.J.; LANDRY, R.; 2008. Remote sensing of burn severity: Experience from western Canada boreal fires, *Int. J. Wildland Fire* 17: 476-489

HOLDEN, Z.A.; EVANS, J.S.; 2010. Using fuzzy C-means and local autocorrelation to cluster satellite-inferred burn severity classes. *Int. J. Wildland Fire* 19: 853-860

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

KEELEY, J.E.; 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *Int. J. Wildland Fire.* 18: 116-126

KEY, C. H.; BENSON, N.C.; 2006. Landscape assessment (LA)-Sampling and analysis methods. En: LUTES, D. (Ed), FIREMON: Fire effects and Inventory Monitoring System. LA1-LA51. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-164-CD. Ogden, UT.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G.; 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 45:255-268

LÓPEZ-GARCÍA, M.J.; CASELLES, V.; 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International* 6: 31-37

MENG, Q.; MEENTEMEYER, R.K.; 2011. Modeling of multi-strata forest fire severity using Landsat TM Data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 13:120-126

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 Sens. Environ.* 109: 66-80

MORENO, J.M.; 2005. Riesgos de Origen Climático: Impactos sobre los Incendios Forestales. En: MORENO, J.M. (Ed). Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. 581-615. Ministerio de Medio Ambiente.

PARKS, S.A.; DILLON, G.K.; MILLER, C.; 2014. A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sens.* 6:1827-1844

PARSONS, A.; ROBICHAUD, P.R.; LEWIS, S.A.; NAPPER, C.; CLARK, J.T.; 2010. Field Guide for Mapping Post-Fire Soil Burn Severity. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. RMRS-GTR-243. 56 pp. Fort Collins, CO

PICOTTE, J.J.; ROBERTSON K.M.; 2011. Validation of remote sensing of burn severity in southeastern US ecosystems. *Int. J. Wildland Fire* 20 (3): 453-464

ROBICHAUD, P.R.; BEYERS, J.L.; NEARY, D.G.; 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-63. 85 pp. Fort Collins, CO.

SOVEREL N.O.; PERRAKIS, D.D.B.; COOPS N.C.; 2010. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sens. Environ.* 114: 1896-1909

TANASE, M.A.; De la RIVA, J.; PÉREZ-CABELLO, F.; 2011. Estimating burn severity at the regional level using optically based índices. *Can. J. For. Res.* 41(4):865-872

VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; JIMÉNEZ, E.; RUIZ, A.D.; 2009. Impacto de un escenario de cambio climático sobre el peligro de incendios en Galicia. En: PEREZ, V.; FERNÁNDEZ, M.; GÓMEZ, J.L (Coor), Evidencias e Impactos del Cambio Climático en Galicia. Cap. 29, 583-607. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.

VEGA, J. A.; FONTURBEL, T.; FERNÁNDEZ, C.; ARELLANO, A.; DIAZ-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. 139 pp.

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