La integración de herramientas económicas y teledetección en la evaluación del impacto de los incendios forestales. Aplicación al incendio de “Alhama de Almería" (España)[1]

Juan Ramón Molina[9], Francisco Rodríguez y Silva[2], Laura Ruiz[9]

Resumen

La valoración de los recursos naturales requiere de una visión multifuncional, incorporando tanto los recursos tangibles como los servicios ambientales y los bienes paisajísticos. Aunque la teledetección ha sido ampliamente utilizada en materia de incendios forestales, ésta no ha sido aplicada desde el punto de vista de la valoración económica de los daños provocados por los incendios forestales. La incorporación de la teledetección a la evaluación económica de daños y perjuicios proporciona una herramienta de innumerables beneficios, permitiendo la delimitación y valoración de grandes incendios forestales a un coste bajo en relación al monitoreo del terreno y, disponiendo de información periódica acerca del comportamiento post-incendio de la vegetación.

Se incluye una propuesta para la evaluación económica de los daños ocasionados por el incendio de Alhama de Almería (3.260 ha), basada en las formulaciones económicas del Visual SEVEIF y en las imágenes de satélite Landsat 8. Las imágenes de satélite constituyen una importante fuente de información georreferenciada del "cambio en el valor neto del recurso" mediante la clasificación de los índices de la vegetación en ratios de depreciación del fuego, en base a la intensidad del fuego. El índice dNBR aporta una clasificación de la severidad más fidedigna que el RdNBR para el incendio de Alhama de Almería, debido al efecto impulsador ("boosting"” originado por los valores NBR pre-fuego, fruto de la escasa

[1] Una versión abreviada de este trabajo se presentó en el Quinto Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación, y Economía de los Incendios Forestales: Servicios ambientales e Incendios Forestales, 14-18 de noviembre de 2016, Tegucigalpa, Honduras.

[2] Departamento de Ingeniería Forestal. Laboratorio de Incendios Forestales (LABIF-UCO). Universidad de Córdoba, Edificio Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales, 14071, Córdoba, España

vegetación, baja precipitación y gran insolación de la zona. La valoración económica de los daños ocasionados por el incendio de Alhama ascendió a 656,981 € o 201.53 €/ha, siendo los recursos de mayor peso los bienes paisajísticos, dada la cercanía con la capital de la provincia. Destaca la importancia relativa de los servicios ambientales y bienes paisajísticos en la valoración, alcanzando más del 57% de las pérdidas totales.

Palabras claves: Daños económicos, índices de vegetación, servicios ambientales, valoración de recursos, valoración de intangibles.

Introducción

Los cambios socioeconómicos y la acentuación del cambio climático están modelando a una reestructuración de los paradigmas de la gestión forestal, adoptando una función multifuncional, con los servicios ambientales y bienes paisajísticos como protagonistas (Constanza y otros 1997). La valoración integral de los daños sobre los recursos naturales es fundamental para la planificación efectiva frente a perturbaciones, mitigando los impactos derivados de la ocurrencia de una perturbación sobre la población rural (Vélez 2009). En este sentido y en ámbito mediterráneo, un procedimiento metodológico, que permita la integración de herramientas económicas y variables de cambio del valor neto de los recursos en función del comportamiento del fuego, puede adquirir una gran utilidad práctica tanto desde el punto de vista preventivo como post-fuego. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) adoptan un papel esencial, tanto para el diseño de planes de defensa contra incendios forestales como para la optimización de los mismos (Chuvieco y otros 2010). Es por ello, que todo el procedimiento metodológico se ensambla en un SIG, facilitando la elaboración de cartografía de monitoreo espacio-temporal y el apoyo en la toma de decisiones de restauración y defensa contra incendios forestales.

La valoración económica de los daños ocasionados por un gran incendio forestal requiere de un intenso trabajo de campo, consumiendo gran cantidad de recursos humanos y económicos, los cuales en muchos casos carecen por su presencia. En este sentido, son muchos los estudios que han señalado el potencial de las imágenes de satélite para la identificación del área quemada y los distintos niveles de severidad y/o daño (Chuvieco y otros, 2005). Los beneficios de la teledetección se asocian a su capacidad de medición de grandes superficies, su bajo coste por unidad de superficie y la disponibilidad de información periódica. Sin embargo, también presenta limitaciones en el estrato inferior del dosel arbóreo o algunos tipos de bosque (Miller y Thode 2007, Soverel y otros 2010) y, en la valoración económica, dada la dificultad de estimar algunas variables (Rodríguez y Silva y otros 2013a), por lo que todo trabajo con imágenes de satélite requiere de un trabajo de campo, tanto para su calibración como para su validación.

La identificación de los diferentes niveles de daño o severidad de un incendio vendrán determinado por las diferencias espectrales existentes entre el momento previo al fuego y el posterior a su paso, empleando para ellos índices de la vegetación, como el "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI), el "Normalized Burn Ratio" (NBR) y el "Relative differenced Normalized Burn Ratio" (RdNBR) (Key y Benson 2006, Miller y Thode 2007). A pesar de las diferencias espectrales asociadas a la estacionalidad anual, la reflectancia de los diferentes suelos y el tiempo trascurrido desde la ocurrencia del incendio, estos trabajos han obtenido un alto ajuste para la determinación de niveles de afección. En la misma línea, se presenta el estudio de nuestro Laboratorio con imágenes MODIS (Rodríguez y Silva y otros 2013a), el cual obtuvo buen ajuste para grandes incendios en el sur de España. En este estudio, aunque el incendio dispone de una superficie considerable para el empleo de MODIS (de acuerdo a nuestros resultados preliminares), se ha optado por el empleo de imágenes Landsat 8. El cambio de sensor remoto se encuentra justificado en la mayor calidad de la resolución espacial, si bien este hecho implica la realización de una mejora de la cartografía de valoración de los recursos naturales.

El objetivo general de este estudio es la propuesta de un procedimiento metodológico para la evaluación económica georreferenciada de los impactos generados por un incendio forestal. La valoración de los daños requiere de una caracterización previa de los recursos, la identificación de los diferentes niveles de intensidad del fuego y la obtención de una relación fidedigna entre la reflectancia de cada píxel y el daño sobre la vegetación.

Material y métodos

Área de estudio

La aplicación metodológica se realiza en Almería (España), siendo ésta la provincia situada más al sureste de la Península Ibérica (Figura 1). La selección de este incendio responde a su tamaño (3.260 ha), su época de ocurrencia (en invierno fuera de la época de máximo peligro), la gran propiedad privada (dificultad para el inventario) y la diversidad paisajística, con presencia de zonas arboladas densas, arboladas ralas y desarboladas.

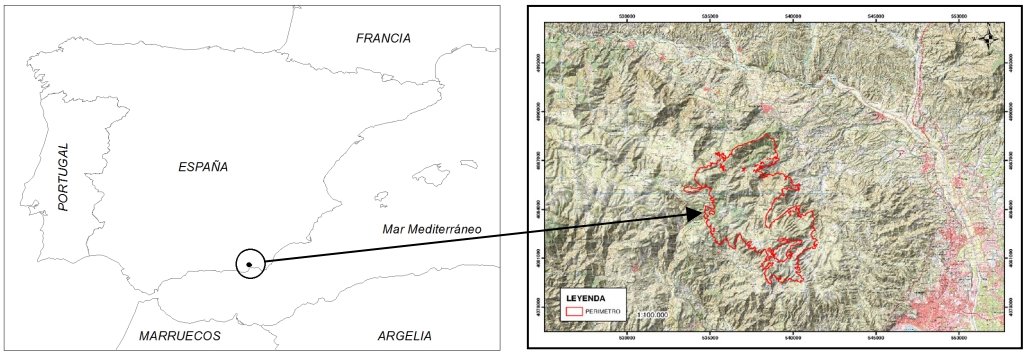


Figura 1- Localización del incendio de Alhama de Almería

Procedimiento metodológico

La valoración de los impactos económicos provocados por un incendio forestal, mediante la integración de herramientas económicas y de teledetección, requiere de cuatro fases (Ruíz, 2015), interrelacionados entre sí (Figura 2):

- Valoración económica de los recursos naturales
- Identificación espacial de los diferentes niveles de afectación
- Identificación y testado de los niveles de severidad
- Identificación del cambio neto en el valor de los recursos

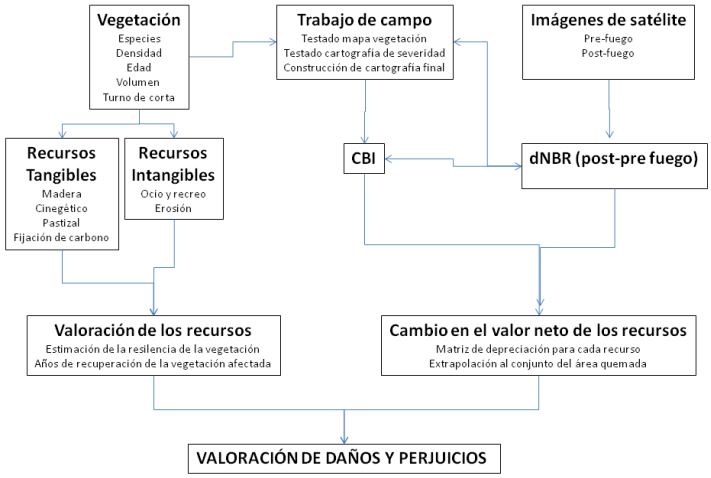


Figura 2- Marco metodológico para la evaluación económica (Ruíz 2015)

Valoración económica de los recursos naturales

La valoración de los recursos naturales responde a las formulaciones matemáticas de la aplicación Visual SEVEIF, descritas en Rodríguez y Silva y otros (2013a, 2013b). En el caso del incendio de Alhama, se han incluidos cuatro recursos

tangibles: maderero (Rodríguez y Silva y otros 2012), aprovechamiento cinegético (Zamora y otros 2010), aprovechamiento pastoral (Molina y otros 2011), fijación de carbono (Molina y otros 2009); y cinco recursos intangibles: protección de la erosión, biodiversidad, paisaje, ocio y recreo y no uso (Molina y otros 2009). La valoración económica de todos ellos responde a las formulaciones matemáticas recopiladas en la Figura 3, utilizando la experiencia de los técnicos de la zona para la imposición de turnos de corta o madurez, la resiliencia de las agrupaciones vegetales y la edad de las masas afectadas. La cubicación de las masas arbóreas fue realizada a partir de los datos de los proyectos de ordenación de los montes públicos y de los datos suministrados por el Inventario Forestal Nacional. La renta cinegética y pastoral se obtuvo de acuerdo a los planes técnicos de caza y de aprovechamientos en vigor aprobados por la Administración Regional. La valoración de la biodiversidad se realizó en base al nivel de protección de las especies presentes, de acuerdo a un estudio regional realizado por la Universidad de Córdoba. Para la valoración indirecta de los bienes paisajísticos, y ante la ausencia de información para el área de estudio, se seleccionó un valor medio de un área similar a la quemada, con núcleos urbanos en las proximidades. El número de visitantes anual fue establecido en base a la experiencia de los agentes de medio ambiente de la zona.

Recurso	Fórmula	Estado del recurso	Fuente
Maderero	$V_{mad} = (1,7*E*B)/(E+0,85*B)$	Maduro e inmaduro	Rodríguez y Silva y otros 2012
	$E = C_0*p\,[i^e + g(i^e - 1)] + A*(i^e - 1)$	Inmaduro	
	$E = (C_{0/z}*t\,[i^e + g(i^e - 1)] + (C_0/z)*0,5*(i^e - 1)$	Latizal	
	$E = [P*V - P_1*V_1] + P*V\,[(i^{(T-e)} - 1)/(i^{(T-e)})]$	Fustal	
	$B = [(V*P*1,025^n)/1,04^n]*[1-(1,025/1,04)^e]*[1 + X*h*p]$	Inmaduro	
	$B = V*h*t[R*P + (1 - R)*P_1]$	Maduro	
Aprovechamiento de leñas	$V_{leñas} = P_x*R_x*[((1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n]$	Maduro	Martínez, 2000; Molina y otros 2011
Cinegético	$V_{cin} = P_x*R_x*[(1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n] + S$	Coto de caza	Zamora y otros 2010
Fijación de carbono	$V_{carb} = CF*PM + IF*PM*RC*[((1+i)^{T-e} - 1)/(i*(1+i)^{T-e}]$	Masa arbolada	Molina, 2008
Control de la erosión	$V_{eros} = R_1*P_1 + R_2*P_2\,[((1+i)^n - 1)/(i(1+i)^n)]$	-	Molinay otros 2009
Biodiversidad faunística; Recurso paisajístico; Recurso ocio y recreo; Recurso no uso	$V_{biod/pai/oci/nouso} = Rx*[((1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n]$	Presencia especies singulares	Molina, 2008

donde E es la valoración maderera en base al planteamiento tradicional español (€/ha), B es la valoración maderera adaptada del Modelo Americano (€/ha), Co es el coste de repoblación de una hectárea de terreno (€/ha), p es el porcentaje de la masa afectada por el fuego, i es el tanto por uno de interés anual, g es anualidad dependiente del turno de la especie, A es el valor de una hectárea de suelo sin arbolado (€/ha), e es la edad estimada de la masa en el momento del incendio, V es el volumen de madera expresado en m^3/ha, P es el precio del m^3 de madera apeada (€), n es el número de años que restan hasta el hipotético turno de corta, X es el coeficiente de mortalidad dependiente de la severidad de las llamas, h es el porcentaje de la especie en el dosel, z es la reducción del coste de repoblación por el fenómeno auto-regenerativo en función del turno, P_1 es el precio de la madera dañada con aprovechamiento comercial (€/m^3), V_1 es el volumen de madera dañada con aprovechamiento (m^3/ha), Px es el precio por unidad de medida del recurso (€), Rx es la renta anual por unidad de superficie, S es el stock reproductivo por unidad de superficie (€), CF es la cantidad de CO_2 retenida en el momento del incendio (t/ha), PM es el precio de la tonelada fijada (€/t), IF es el incremento anual de CO_2 retenido (t/ha), RC es la renta generada al fijar una tonelada de carbono en un año (€), R_1 es la cantidad de suelo media perdida el primer año (t/ha), P_1 es el precio estimado para la tonelada (€), R_2 es la cantidad de suelo media perdida hasta la recuperación de la cobertura original (t/ha).

Figura 3- Formulaciones matemáticas de la aproximación SEVEIF para la valoración de los recursos naturales (Rodríguez y Silva 2013a, 2013b)

Identificación espacial de los diferentes niveles de afectación

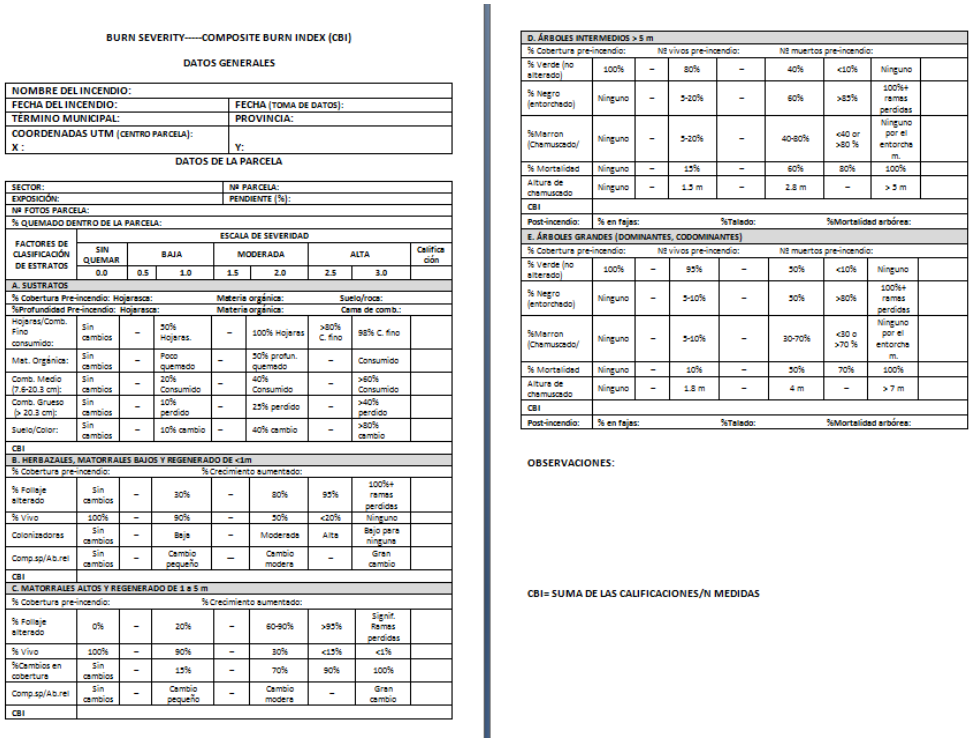
Las imágenes pre y post-incendio utilizadas son imágenes Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). La identificación espacial de los diferentes niveles de severidad fue testada mediante tres índices de la vegetación (Cuadro 1), seleccionando aquel de mayor bondad estadística para el área de estudio en base a las características de reflectancia locales.

Cuadro 1- *Índices de vegetación testados para la identificación de los niveles de severidad*

Índice vegetación	Ecuación	Rango
NBR	$NBR = \frac{(R5 - R7)}{(R5 + R7)} * 1000$	-1000 a 1000
dNBR	$dNBR = (NBRpre - NBRpost)$	-2000 a 2000
RdNBR	$RdNBR = \frac{dNBR}{\sqrt{Abs(NBRpre)}/1000}$	-2000 a 2000

Identificación y testado de los niveles de severidad

La información proporcionada por los índices de vegetación fue testada en campo durante el otoño posterior al incendio. La evaluación de severidad se fundamenta en el protocolo "Composite Burned Index" (CBI) (Key y Benson, 2005), el cual cuantifica los niveles de daño mediante variables fácilmente identificadas por inventarios de campo (color suelo, presencia de materia orgánica, pérdida de hojas, cambio en el color de la vegetación y mortalidad de la vegetación) para cada uno de los componentes del ecosistema: suelo, pastizal, matorrales y regenerado, árboles menores de cinco metros y árboles mayores de cinco metros (Figura 4).



BURN SEVERITY----COMPOSITE BURN INDEX (CBI)

DATOS GENERALES

NOMBRE DEL INCENDIO:	
FECHA DEL INCENDIO:	FECHA (TOMA DE DATOS):
TÉRMINO MUNICIPAL:	PROVINCIA:
COORDENADAS UTM (CENTRO PARCELA): X :	Y:

DATOS DE LA PARCELA

SECTOR:	Nº PARCELA:
EXPOSICIÓN:	PENDIENTE (%):
Nº FOTOS PARCELA:	
% QUEMADO DENTRO DE LA PARCELA:	

FACTORES DE CLASIFICACIÓN DE ESTRATOS	ESCALA DE SEVERIDAD							Calificación
	SIN QUEMAR	BAJA		MODERADA		ALTA		
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
A. SUSTRATOS								
% Cobertura Pre-incendio: Hojarasca:				Materia orgánica:		Suelo/roca:		
%Profundidad Pre-incendio: Hojarasca:				Materia orgánica:		Cama de comb.:		
Hojaras/Comb. Fino consumida:	Sin cambios	–	50% Hojaras.	–	100% Hojaras	>80% C. fino	98% C. fino	
Mat. Orgánica:	Sin cambios	–	Poco quemado	–	50% profun. quemado	–	Consumido	
Comb. Medio (7.6-20.3 cm):	Sin cambios	–	20% Consumido	–	40% Consumido	–	>60% Consumido	
Comb. Grueso (> 20.3 cm):	Sin cambios	–	10% perdido	–	25% perdido	–	>40% perdido	
Suelo/Color:	Sin cambios	–	10% cambio	–	40% cambio	–	>80% cambio	
CBI								
B. HERBAZALES, MATORRALES BAJOS Y REGENERADO DE <1m								
% Cobertura pre-incendio:			% Crecimiento sumentado:					
% Follaje alterado	Sin cambios	–	30%	–	80%	95%	100%+ ramas perdidas	
% Vivo	100%	–	90%	–	50%	<20%	Ninguno	
Colonizadores	Sin cambios	–	Baja	–	Moderada	Alta	Bajo para ninguna	
Comp.sp/Ab.rel	Sin cambios	–	Cambio pequeño	–	Cambio modera	–	Gran cambio	
CBI								
C. MATORRALES ALTOS Y REGENERADO DE 1 a 5 m								
% Cobertura pre-incendio:			% Crecimiento sumentado:					
% Follaje alterado	0%	–	20%	–	60-90%	>95%	Signif. Ramas perdidas	
% Vivo	100%	–	90%	–	30%	<15%	<1%	
%Cambios en cobertura	Sin cambios	–	15%	–	70%	90%	100%	
Comp.sp/Ab.rel	Sin cambios	–	Cambio pequeño	–	Cambio modera	–	Gran cambio	
CBI								

D. ÁRBOLES INTERMEDIOS > 5 m								
% Cobertura pre-incendio:	Nº vivos pre-incendio:				Nº muertos pre-incendio:			
% Verde (no alterado)	100%	–	80%	–	40%	<10%	Ninguno	
% Negro (entorchado)	Ninguno	–	5-20%	–	60%	>85%	100%+ ramas perdidas	
%Marron (Chamuscado/	Ninguno	–	5-20%	–	40-80%	<40 or >80 %	Ninguno por el entorcha m.	
% Mortalidad	Ninguno	–	15%	–	60%	80%	100%	
Altura de chamuscado	Ninguno	–	1.5 m	–	2.8 m	–	> 5 m	
CBI								
Post-incendio:	% en fajas:			%Talado:			%Mortalidad arbórea:	
E. ÁRBOLES GRANDES (DOMINANTES, CODOMINANTES)								
% Cobertura pre-incendio:	Nº vivos pre-incendio:				Nº muertos pre-incendio:			
% Verde (no alterado)	100%	–	95%	–	50%	<10%	Ninguno	
% Negro (entorchado)	Ninguno	–	5-10%	–	50%	>80%	100%+ ramas perdidas	
%Marron (Chamuscado/	Ninguno	–	5-10%	–	30-70%	<30 o >70 %	Ninguno por el entorcha m.	
% Mortalidad	Ninguno	–	10%	–	50%	70%	100%	
Altura de chamuscado	Ninguno	–	1.8 m	–	4 m	–	> 7 m	
CBI								
Post-incendio:	% en fajas:			%Talado:			%Mortalidad arbórea:	

OBSERVACIONES:

CBI= SUMA DE LAS CALIFICACIONES/N MEDIDAS

Figura 4- Estadillos de campo para la evaluación del "Composite Burn Index"

Las parcelas de evaluación del CBI (de 30 m de radio y espaciadas al menos 90 m entre ellas) se estratificaron en base a la representatividad de cada nivel de severidad. Una vez completado el inventario, se realizó un análisis estadístico utilizando el CBI como variable independiente, y el valor de los índices de la

vegetación como variable dependiente. El software SPSS(C) permitió el cálculo de la matriz de confusión y el estadístico Kappa identificando el mejor índice de la vegetación para la zona de estudio.

Identificación del cambio neto en el valor de los recursos

La identificación previa de los niveles de severidad del fuego, con ayuda de las imágenes de satélite y apoyada en el inventario de campo, permitió asignar un cambio neto en el valor de los recursos (Rodríguez y Silva y González-Cabán 2010) en base al grado de afección del fuego. Este cambio no será homogéneo para todos los recursos, sino que se establecerá de forma individual, en base a algún parámetro identificable en el inventario de campo. Dada su sencillez de identificación in-situ, se utilizó la longitud de llama como variable para la identificación del grado de deterioro de cada recurso, de forma análoga a otros estudios (Zamora y otros 2010, Molina y otros 2011, Rodríguez y Silva y otros 2012).

Se consideraron en un primer momento los ratios de depreciación obtenidos en estos trabajos y en los proyectos de investigación FIREMAP, SINAMI e INFOCOPAS, a partir del análisis medio de gran cantidad de incendios en Andalucía, si bien el trabajo de campo permitirá ajustar y validar dicho intervalos para las condiciones locales del área de estudio.

Resultados

Valoración económica de los recursos naturales

La valoración de los recursos del área quemada ascendió a 1.074.798 €, lo que representa en términos de afectación económica por unidad de superficie un valor de 329,69 €/ha. Los recursos tangibles (recurso maderero, cinegético y pasto) y los bienes paisajísticos (recurso paisaje, ocio y recreo y no uso) supusieron un 40,95% y 40,85% respectivamente, alcanzando valores porcentuales muy similares. Dado que la principal actividad económica de los montes afectados por el incendio es la cinegética, este recurso también alcanzó una valoración importante dentro de la tasación (298.601 €).

Identificación espacial de los niveles de afectación

La identificación de los niveles de severidad arrojó resultados dispares en base al índice de vegetación utilizado, independientemente del uso de una clasificación continua o categorizada. El NDVI fue el que presentó peor ajuste, siendo mejorado por los índices dNBR y RdNBR, si bien también se presentaron diferencias entre ellos (Figura 5). Mientras un 66.92% de la superficie quemada se categorizó como

"severidad moderada" bajo el índice dNBR, la cifra baja a un 17.84% bajo el índice RdNBR. Este hecho se debe a un resultado más desfavorable del RdNBR, que asciende a gran cantidad de la superficie a "severidad alta".

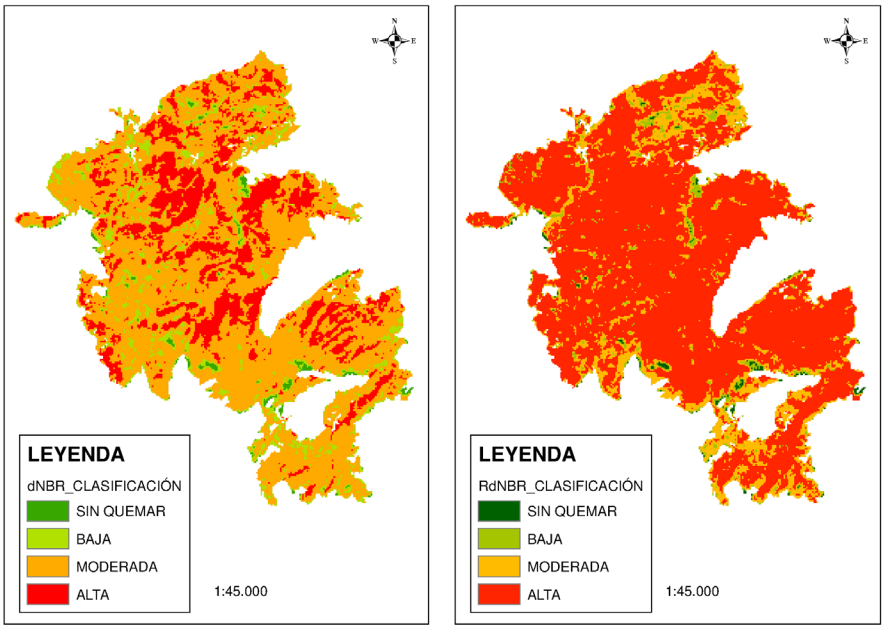


Figura 5- Identificación de la severidad mediante dNBR y RdNBR (Ruíz 2016)

Identificación y testado de los niveles de severidad

El testado estadístico del trabajo de campo de severidad con la información facilitada por las imágenes de satélite observó una tendencia general hacia modelos potenciales de relación entre CBI y el nivel de reflectancia. El índice de vegetación dNBR proporcionó una información más fidedigna que el índice RdNBR, de acuerdo al coeficiente de determinación (0,706 frente a 0,604). El ajuste se incrementó considerablemente para las zonas arboladas (0,827).

De forma análoga, la matriz de confusión arrojó mejores ajustes para el dNBR que para el RdNBR (más del 82% de ajuste para el primero de ellos en comparación con menos del 50% del segundo). Los principales errores en la clasificación de los niveles de severidad del fuego se produjeron en las clases inferiores (severidad baja y moderada), siendo la primera la que acumula un mayor porcentaje de clasificaciones incorrectas, tanto para CBI-dNBR como para CBI-RdNBR. El estadístico Kappa presentó un valor para dNBR de 0.751.

Identificación del cambio neto en el valor de los recursos

Del análisis de la severidad del fuego (relación entre índices de la vegetación y CBI), se obtuvo una única representación categórica (severidad baja, severidad moderada y severidad alta). Sin embargo, la presencia de áreas matorralizadas, masas arboladas en estado latizal y en masas en estado fustal, llevo a la premisa de la insuficiencia de tres niveles para la representación del "cambio en el valor neto" de los recursos para toda el área quemada. Por tanto, se atendió a una nueva reclasificación en seis niveles de intensidad del fuego (NIF), en base a la longitud de llama media identificada por los inventarios de campo (Cuadro 2).

Cuadro 2-*Índices de vegetación testados para la identificación de los niveles de severidad*

Vegetación	Categorización	Longitud llama (m)	NIF
Áreas desarboladas Masas en estado latizal	Severidad baja	< 2	I
	Severidad media	3-6	III
	Severidad alta	6-9	IV
Masas en estado fustal	Severidad baja	2-3	II
	Severidad media	9-12	V
	Severidad alta	>12	VI

Valoración del impacto del fuego

La valoración económica de daños y perjuicios del incendio de Alhama ascendió a 656,981 €, lo que se corresponde con un valor unitario en relación con la superficie afectada de 201.53 €/ha. De esta cantidad, el impacto de las llamas sobre los bienes tangibles (maderero, cinegético y pastizal aprovechado por el ganado) constituyó el 42.32% del total de los perjuicios provocados por el incendio. Por su parte, el impacto sobre los bienes paisajísticos (paisaje, ocio y recreo y no uso) representó un 39.11% del total de los daños económicos (Cuadro 3).

Cuadro 3-*Valoración económica por recursos del incendio de Alhama de Almería*

Recurso	Pérdida (€)	Representatividad (%)
Recurso maderero	99,558.78	10.52
Recurso cinegético	205,979.48	31.35
Recurso pastoral	2,944.61	0.45
Fijación de carbono	55,192.18	8.40
Control de la erosión	40,516.88	6.17
Biodiversidad	26,273.04	3.99
Paisaje	57,419.42	8.74
Ocio y recreo	20,004.11	3.04
No uso	179,545.54	27.33
TOTAL	656,981.04	

Discusión

La valoración económica del incendio de Alhama refleja la realidad multifuncional de los bosques mediterráneos. Los recursos tangibles sólo suponen una pequeña cantidad (42.32% del total), a semejanza de en otros estudios (Rodríguez y Silva y otros 2013b). Aunque la zona de estudio no se encuentra dentro de ningún espacio natural protegido, dispone de una gran presión humana debido a la actividad cinegética y a su situación estratégica junto a la capital de la provincia.

Dadas las restricciones presupuestarias actuales, el empleo de imágenes de satélite resulta fundamental para la evaluación de áreas quemadas (Chuvieco y otros 2005). En grandes incendios forestales, la identificación de niveles de severidad mediante teledetección (Key y Benson 2006, Miller y Thode, 2007, Soverel y otros 2010) constituye una herramienta de apoyo para la priorización de actuaciones de restauración. Además, las imágenes de satélite permiten un monitoreo espacio-temporal de la recuperación de los recursos naturales, a coste prácticamente cero. A pesar de la gran utilidad de las imágenes de satélite, no se debe obviar que todo trabajo de teledetección requiere de un inventario de campo, principalmente para la identificación de los niveles de severidad (Key y Benson 2005).

La clasificación supervisada de los niveles de severidad mediante dNBR presentó mejores resultados que mediante RdNBR, rebatiendo el estudio de Miller y Thode (2007). Este hecho puede relacionarse con los pequeños valores del NBR pre-fuego dando lugar a valores excepcionalmente grandes de RdNBR. El análisis estadístico ha obtenido una mejor relación entre CBI y dNBR, y no entre CBI y RdNBR como era de esperar, debido al “boosting” fruto de los bajos valores de reflectancia pre-fuego. Mientras el coeficiente de determinación y el estadístico Kappa presentan valores semejantes, la precisión global del dNBR es superior a la de

otros estudios (Miller y Thode, 2007, Soverel y otros 2010). La bondad del ajuste se incrementa en terrenos arbolados futo de los valores de reflectancia pre-fuego.

La valoración económica del fuego en el incendio de Alhama de Almería revela un mayor impacto sobre recursos intangibles (servicios ambientales y bienes paisajísticos) que sobre recursos tangibles (madera, cinegético y pasto) (Cuadro 3). Esta apreciación coincide con lo observado en valoraciones realizadas para otros incendios (Rodríguez y Silva y otros 2013a). En este sentido, y tal y como recomiendan otros autores (Vélez 2009, Rodríguez y Silva y González-Cabán 2010), la valoración de daños y perjuicios no debe obviar la multifuncionalidad de los montes mediterráneos y reducirla únicamente a las pérdidas sobre el recurso maderero o los recursos tangibles.

La incorporación de imágenes satélite en la evaluación económica de daños y perjuicios provocados por incendios forestales, de forma combinada con la intensidad energética emitida por las llamas, proporciona una herramienta de gran utilidad para las administraciones con responsabilidades en gestión del territorio forestal (Rodríguez y Silva y otros 2013a). La disponibilidad de información georreferenciada sobre el valor económico por hectárea resultado de la afectación por incendio forestal, tanto a nivel de recurso individual como a nivel de la vulnerabilidad integral del ecosistema, resulta de gran interés para la toma de decisiones y la asignación presupuestaria (Molina y otros 2009). La mayor ventaja de las herramientas y productos basados en teledetección y sistemas de información geográfica (cartografía temática) es la sencillez de incorporación de necesidades o novedades, convirtiendo a la información digital en una herramienta de trabajo indispensable en los programas de defensa contra incendios forestales (Chuvieco y otros 2010). Además, no se debe obviar que el procedimiento metodológico sustentado bajo este trabajo se basa en imágenes gratuitas y disponibles cada 16 días (imágenes Landsat 8). Por tanto, y a pesar de que se haya seleccionado un único incendio para el establecimiento del procedimiento metodológico, la metodología puede ser extrapolada a cualquier incendio y a cualquier escala de trabajo, siempre bajo las consideraciones previas del conocimiento de los recursos afectados y, los ajustes en base a los inventarios de campo, necesarios e imprescindibles para todos los trabajos con imágenes de satélite.

Conclusiones

La valoración de los recursos naturales, de acuerdo a los nuevos paradigmas de la sociedad, exige la incorporación de las externalidades del medio forestal (servicios ambientales y bienes paisajísticos), dado que en muchas ocasiones pueden suponer una gran proporción de su valor total. La integración de herramientas económicas e

imágenes de satélite disminuye la necesidad de recursos humanos y económicos, y facilita el monitoreo espacio-temporal de un área quemada. Además, el empleo de los índices de vegetación permite la incorporación del cambio neto en el valor de los recursos, señalando un mejor ajuste a la realidad y optimizando la asignación presupuestaria. El índice dNBR aporta una clasificación de la severidad más fidedigna que el RdNBR para el área de estudio, debido al efecto "boosting" originado por los valores NBR pre-fuego, fruto de la escasa vegetación, baja precipitación y gran insolación.

Agradecimientos

Los autores han realizado el trabajo, gracias a la financiación de un proyecto público del Ministerio de Ciencia e Innovación, denominado Proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06-01).

Referencias

Chuvieco, E., Ventura M., Martín, P. Gómez, I. 2005. Assesment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for Burneo land mapping. Remote Sensing of Environment 94, 450-462.

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, P., Villar L., Martínez J., Martín S., Ibarra P., De La Riva J., Baeza J., Rodríguez y Silva, F., Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R. 2010. Development a framework for risk assessment using remote sensing and geographic information system. Ecological Modeling 221, 46-58.

Constanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, G.R., Sutton, P., Van Der Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253-260.

Key, C.H., Benson, N.C. 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index. In D. C. Lutes (Ed.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report, RMRSGTR- 164-CD: LA1-LA51. (pp.) Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Key, C.H., Benson, N.C. 2006. Landscape assessment: Ground measure of severity the Composite burn index, and remote sensing of severity, the Normalized Burn Index. In: Lutes, C.D., 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. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: LA1 – 51 (Ogden, UT).

Miller, J.D., Thode, A.E. 2007. Quantifying burn severity in an heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Remote Sensing of Environment 109, 66 – 80.

Molina, J.R., Rodríguez y Silva, F., Herrera M.A., Zamora R. 2009. A Simulation Tool for Socio-Economic Planning on Forest Fire Suppression Management. In: Columbus, F. (Ed.). Forest Fires: Detection, Suppression, and Prevention. Nova Science Publishers; 33-88.

Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R., Rodríguez y Silva, F., González-Cabán, A. 2011. Economic losses to Iberian swine production from forest fires. Forest Policy Econ 13, 614-621.

Rodríguez y Silva, F., González-Cabán, A. 2010. "SINAMI": a tool for the economic evaluation of forest FIRE management programs in Mediterranean ecosystems. International Journal of Wildland Fire 19, 927-936.

Rodríguez y Silva, F., Molina, J.R., González-Cabán, A., Herrera, M.A. 2012. Economic vulnerability of timber resources to forest fires. Journal of Environmental Management 100, 16-21.

Rodríguez y Silva, F., Molina, J.R., Castillo, M. 2013a. Aproximación Metodológica Para la Evaluación del Impacto Económico de los Incendios Forestales, Mediante el Uso de Teledetección Espacial, Aplicación Mediante el Uso de Imágenes Modis. General Technical Report PSW-GTR 245, 305-319.

Rodríguez y Silva, F., Molina, J.R., Herrera, M.A., Leal, J. 2013b. Visual SEVEIF a tool foor integrating fire behavior simulation and economic evaluation of the impact of wildfires. General Technical Report PSW-GTR 245, 163-178.

Ruiz, L. 2015. Evaluación del impacto económico del incendio de Alhama de Almería, mediante el uso de teledetección. Trabajo Final del Máster de Incendios Forestales: Ciencia y Gestión Integral. Córdoba, España, 53 pp.

Soverel, N.O., Perrakis, D.B., Coops, N.C. 2010. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR index across western Canada. Remote Sensing of Environment 114, 1896 – 1909.

Vélez, R. (Coord.), 2009. La Defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw-Hill, Madrid.

Zamora, R., Molina-Martínez, J.R., Herrera, M.A., Rodríguez y Silva, F. 2010. A model for wildfire prevention planning in game resources. Ecological Modelling 221, 19-26.