



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-379

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Clasificación del estado de la vegetación tras incendio en el P.N. de Garajonay a partir de datos de intensidad LiDAR e imágenes satelitales

GUILLÉN CLIMENT, M.¹, MARINO DEL AMO, E. ¹, RANZ VEGA, P. ¹, TOMÉ MORÁN, J.L. ¹

¹ AGRESTA Sociedad Cooperativa.

Resumen

El incendio forestal ocurrido en La Gomera en 2012 afectó a más de 3.600 ha, incluyendo 743 ha del Parque Nacional de Garajonay, catalogado como el espacio protegido más alterado de las últimas décadas. El objetivo de este estudio es evaluar el grado de afectación de la vegetación para detectar problemas ambientales y planificar su manejo, utilizando información LiDAR y una imagen satelital de alta resolución espacial Pleiades. Se analizaron los datos de intensidad LiDAR para evaluar su potencial en el seguimiento de vegetación afectada por incendios diferenciando por estratos. Además se realizó una clasificación supervisada para identificar la biomasa viva/muerta y el rebrote en dos estratos de altura diferenciados mediante el algoritmo Random Forest. Las variables predictoras fueron bandas espectrales, índices de vegetación y niveles de intensidad LiDAR. El área incendiada se clasificó tanto en función del porcentaje de biomasa viva o muerta en las copas, como del estado del rebrote de cepa del monteverde, obteniendo diferentes mapas de variabilidad espacial. Los datos de intensidad LiDAR pre y post-incendio permitieron analizar la evolución temporal del estado de la vegetación. La combinación de estas dos fuentes de información presenta gran potencial para el seguimiento de las masas forestales quemadas.

Palabras clave

Incendios forestales, biomasa viva-muerta, índices de vegetación, Pleiades.

1. Introducción

Los incendios son uno de los principales elementos de perturbación en las masas forestales, cuyos efectos en la vegetación dependen tanto de la severidad del fuego como de la capacidad de regeneración de las especies (PAUSAS & KEELEY, 2009). Algunos ecosistemas son más resilientes, bien por tener especies más resistentes a los daños directos producidos por las llamas, bien por tener mecanismos de regeneración adaptados a determinados regímenes de fuego (PAUSAS et al., 2008). En el caso de la vegetación canaria, el origen volcánico de las islas predispone a la percepción de una buena adaptación de los ecosistemas forestales naturales a la presencia del fuego. Sin embargo, existen formaciones endémicas de alto valor ecológico, como la laurisilva o el fayal-brezal, que pueden ser muy vulnerables frente a los incendios a pesar de su potencial capacidad rebrotadora. Por tanto, disponer de información espacial continua del estado de la vegetación en las áreas quemadas es fundamental para evaluar los efectos producidos por el fuego y asegurar una adecuada planificación de los trabajos de restauración de los ecosistemas. Esta necesidad adquiere una especial relevancia cuando los incendios afectan a zonas protegidas y de alto valor natural, como es el caso del Parque Nacional de Garajonay.

En el ámbito de la agronomía y el sector forestal, el uso de imágenes provenientes sensores multiespectrales e hiperespectrales ha demostrado ser de gran utilidad para el análisis del estado hídrico y nutricional de la vegetación gracias a sus propiedades espectrales en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico principalmente (WHITE et al. 1996). Estudios destacados del uso de la teledetección en incendios forestales tratan la delimitación del perímetro del incendio, evaluación precisa de superficies afectadas por el fuego (RIANO et al., 2002; VIEDMA et al., 2012), así como la evolución temporal de la regeneración de la zona incendiada (MITRI & GITAS, 2013).

Junto con el uso de sensores multispectrales, la tecnología LIDAR (Light Detection And Ranging) ha supuesto un gran avance en la evaluación de las masas forestales. Además de la información geométrica de la nube de puntos proporcionada por el láser escáner, los datos de intensidad LiDAR proporcionan una fuente de información relativa a la cantidad de energía reflejada. Este valor se puede utilizar de forma similar a la reflectancia derivada de las imágenes multispectrales, permitiendo un análisis cualitativo de los datos LiDAR a partir de la calibración con datos de campo. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en los sensores pasivos, estos valores de intensidad LiDAR no tienen una equivalencia directa con la reflectancia. La ventaja de la intensidad LiDAR frente a los datos derivados de sensores ópticos es que incorpora la posición tridimensional asociadas a las coordenadas (x, y, z) de los retornos. Estudios previos demuestran que estos datos de intensidad LiDAR se puede utilizar tanto para la identificación de especies (HOLMGREN & PERSSON, 2004; DONOGHUE et al. 2007), como para la estimación de la cantidad o estado de la biomasa existente en áreas forestales (GARCÍA et al. 2011, KORPELA et al. 2010; KIM et al. 2009). La combinación de datos de intensidad LiDAR con información espectral también supone una potencial mejora para la identificación de especies forestales (HOLMGREN et al 2008; KORPELA et al. 2010). Sin embargo, el uso de la intensidad LiDAR para estudios sobre el estado de la vegetación es bastante limitado hasta la fecha, en gran parte debido a problemas relacionados con la calibración e interpretación de este tipo de datos.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio fue obtener una evaluación del estado de la vegetación afectada por el incendio ocurrido en el Parque Nacional de Garajonay en 2012 aprovechando toda la información disponible para diferentes periodos de tiempo. Esta evaluación está orientada especialmente a la vegetación prioritaria del Parque: las formaciones de monteverde. Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

1. Discriminar la biomasa viva existente en el dosel arbóreo (copas con follaje vivo) de la biomasa muerta en pie (copas sin actividad fotosintética).
2. Discriminar el rebrote de cepa del arbolado frente a la existencia de otro tipo de especies de matorral o herbáceas colonizadoras en el estrato inferior de vegetación.

Para cumplir estos objetivos se utilizó información proveniente de imagen satelitales, índices espectrales y datos de intensidad LIDAR.

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

El Parque Nacional de Garajonay está situado en la isla de La Gomera (Islas Canarias, España), comprendiendo 3.986 ha, de las cuales 743 ha fueron afectadas tras el incendio ocurrido en agosto 2012. La figura 1 representa la zona afectada dentro del perímetro del Parque Nacional, así como la cartografía de los sistemas naturales de vegetación, elaborada por el Organismo Autónomo Parque Nacionales entre mayo y octubre de 2012.

Los bosques de fayal-brezal y laurisilva son predominantes en este área que presenta unas condiciones idóneas de temperatura y pluviometría para su crecimiento (FERNÁNDEZ y PÉREZ, 2009). De acuerdo con NOTARIO et al. (2015), es el bosque de laurisilva mejor conservado de Canarias, tratándose por tanto de un área protegida de alto valor ecológico.

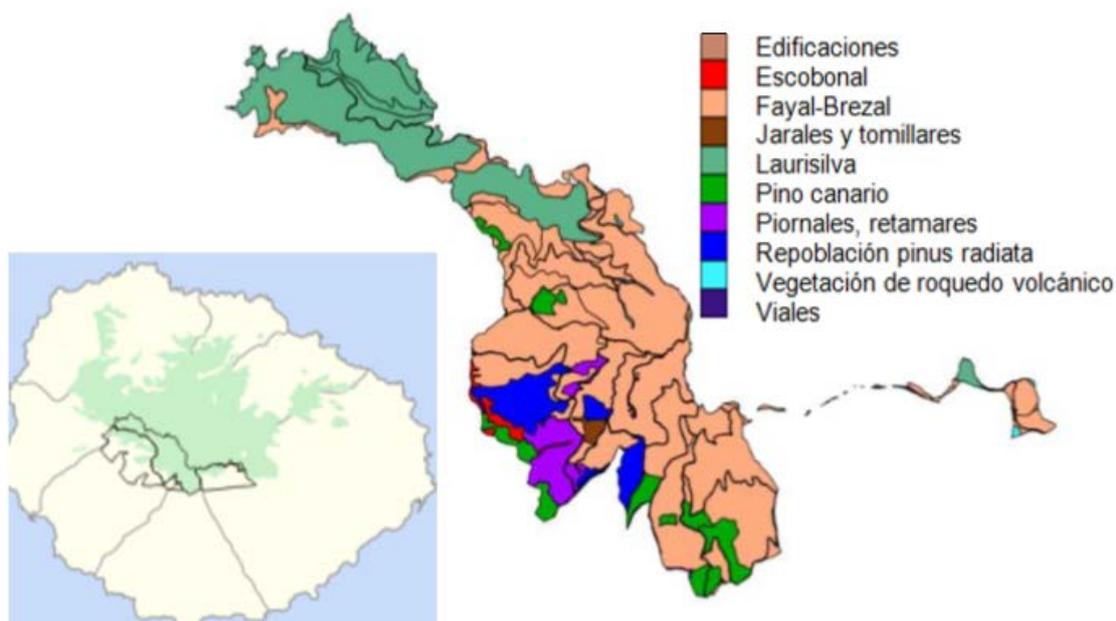


Figura 1. Mapa de vegetación del área afectada por el incendio dentro del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera).

3.2 Datos de campo

Para evaluar el estado de la vegetación actual se seleccionaron 23 parcelas levantadas en el año 2015 distribuidas por las zonas de vegetación prioritaria del Parque afectadas por el incendio. De ellas, 10 parcelas son datos de seguimiento propias del Parque, que fueron usadas para validación de las clasificaciones. Para calibración y entrenamiento se levantaron con GPS submétrico 13 parcelas circulares, de 12 m de radio, donde se identificó la fracción de cobertura vegetal viva en el estrato del sotobosque/matorral (altura < 4 m) y en el estrato arbóreo (altura > 4 m), así como el porcentaje de rebrote de vegetación prioritaria en ambos estratos (datos publicados en GUILLEN-CLIMENT et al., 2016). El umbral de 4 m utilizado para discriminar entre los estratos de sotobosque y dosel de copas fue elegido en función de las características particulares de la vegetación de monteverde, en la que aparecen frecuentemente formaciones de porte arbustivo de esa altura. La tabla 1 presenta un resumen de los datos tomados en campo.

Tabla 1. Porcentajes de cobertura (FCC) de la vegetación en las parcelas de campo (n=23).

Valor	Estrato superior (> 4 m)		Estrato inferior (< 4 m)	
	FCC _{copas-total}	FCC _{copas-vivas}	FCC _{total}	FCC _{rebrote}
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	90	60	100	60
Media	43,4	8,5	46,2	14,8

3.3 Adquisición y procesamiento de datos LIDAR

Los datos LIDAR utilizados corresponden a 3 vuelos realizados por la empresa GRAFCAN con una densidad de 1 pulso/m² en distintas fechas: octubre 2011 (pre-incendio), octubre 2012 (post-incendio) y septiembre 2014 (más reciente disponible). La información almacenada por estos sensores son datos correspondientes a los retornos del pulso emitido una vez es recibido de vuelta por el sensor, registrando entre 1 y 4 retornos por cada pulso emitido en función de la presencia o ausencia de vegetación en la superficie interceptada.

Para el procesado de la información LIDAR se utilizaron algoritmos incorporados en el software FUSION (MACGAUGHEY, 2014), que AGRESTA ha implementado en QGIS (QGIS Development Team, 2014), permitiendo abordar el análisis de grandes superficies.

Los datos de intensidad registrados para cada retorno, tras ser reflejado el pulso laser por la superficie interceptada, se corresponden con un valor digital. El sensor utilizado por GRAFCAN es Leica ALS60, que recoge la intensidad en 8 bits (256 valores). Este sensor utiliza un sistema dinámico que va ajustando la ganancia de forma automática (AGC), que incluye los efectos de parámetros como la altura de vuelo, el ángulo de escaneo o la topografía en el registro de la energía reflejada. Con el fin de poder comparar datos de distintos vuelos, algunos autores recomiendan normalizar los datos de intensidad LiDAR en función de la trayectoria del pulso (*range*) y el valor AGC (KORPELA et al., 2010). Sin embargo en la mayoría de estudios precedentes en los que se incluyen datos de intensidad no se aplican estas correcciones (KIM et al. 2009; MORSDORF et al., 2010). En el presente estudio se utilizaron los datos brutos directamente proporcionados por GRAFCAN al no disponer de la información necesaria para realizar dichos ajustes. No obstante, los datos LiDAR utilizados para el área de estudio fueron registrados con el mismo sistema de captura, y en vuelos realizados siguiendo patrones similares.

El procesado de los datos LiDAR se realizó con un tamaño de pixel de 20 m. Esta resolución permitió tener un nivel de detalle adecuado para no comprometer el cálculo de estadísticos de la nube de puntos (métricas LiDAR). Para cada fecha de vuelo, se obtuvo una cartografía continua con la información de los valores de intensidad LiDAR y fracción de cabida cubierta (FCC) separada para dos estratos de alturas diferenciadas: i) estrato inferior de 0,4 a 4 m para el matorral/sotobosque, y ii) estrato superior de 4 a 40 m para las copas del dosel arbóreo. Los valores de intensidad en las parcelas de campo fueron analizados para la fecha más reciente disponible (2014) con el fin de detectar los valores representativos para cada estrato de vegetación (estrato superior y estrato inferior) en las zonas quemadas. También se analizaron 15 puntos de referencia adicionales fuera del perímetro del incendio con el fin de evaluar los valores de intensidad correspondientes a la vegetación no quemada, es decir, valores asociados a copas vivas. Para esos puntos se utilizó la fracción de cabida cubierta (FCC) derivada de los datos LiDAR dado que no se disponía de datos sobre el terreno en zonas no afectadas por el fuego. Estos valores sirvieron de base para definir una serie de umbrales de interés para cada una de las variables, que permitieron reclasificar los valores de intensidad de las capas raster de las distintas fechas en función de los valores observados en el terreno.

3.4 Adquisición y procesamiento de imagen multiespectral Pleiades

Para el estudio de la situación actual de la regeneración se utilizó una imagen satélite de alta resolución del sensor espacial Pleiades, cuya resolución espacial es de 2 m. La fecha de adquisición de la imagen es 4 de julio de 2015, totalmente libre de nubes. Esta fecha incluye el periodo de crecimiento de 2015, por lo que se corresponde de forma adecuado con los datos de regeneración del arbolado tomados en campo. En cuanto a la resolución espectral, contamos aquí con bandas en visible (RGB) e Infrarrojo cercano.

Se realizó una corrección geométrica de la imagen mediante identificación de 20 puntos de control sobre ortofotografía. El modelo elegido fue de tipo polinomial de segundo orden, y para el remuestreo de los valores se empleó el método del vecino más próximo. El procedimiento aplicado para calibración atmosférica fue el método ideado por Chávez (CHAVEZ 1988). El método se basa en el hecho de que áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas de sombra) deben presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. Esto no se suele producir, debido precisamente a la dispersión atmosférica y se presentan valores superiores a cero. Por lo tanto, y siguiendo estas premisas, se procede a restar los valores digitales mínimos a todos los valores digitales de cada banda.

Una vez realizadas las correcciones geométricas y atmosféricas se llevó a cabo el remuestreo de las imágenes. Dado que la información LiDAR fue procesada con una resolución espacial de 20 m, la imagen Pleiades se remuestreó a este tamaño de píxel. A partir de las bandas roja e infrarroja se obtuvo el índice espectral NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual caracteriza la estructura de la vegetación y por tanto su potencial fotosintético.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Para el procesado de imágenes y cálculo de índices espectrales se usó GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) operado desde QGIS. Para la aplicación del algoritmo RANDOM FOREST se utilizó el software R. La totalidad de las aplicaciones informáticas utilizadas para este trabajo están basadas en software libre.

3.5 Clasificación supervisada utilizando Random Forest

Los datos de campo de las parcelas antes descritas se utilizaron como entrenamiento para clasificar el área de estudio en niveles de rebrote de cepa del arbolado (en el estrato inferior) y presencia de copas vivas/muertas (en el estrato superior). Se ha utilizado información de los años 2015 para la información espectral (imagen Pleiades de Julio 2015) e información LiDAR de Septiembre de 2014. Para la clasificación de las imágenes se ha utilizado la metodología Random Forest, una técnica de aprendizaje automática agrupada (BREIMAN 2001) que se ha convertido en una de las más usadas en la clasificación de coberturas de la tierra. Son técnicas de aprendizaje automático que consisten en el ensamblaje (o agrupación) de algoritmos de aprendizaje. El ajuste de estos modelos no paramétricos requiere de buenas localizaciones de las parcelas, que permitan relacionar exactamente las mediciones realizadas en campo con la información espectral correspondiente. Este tipo de técnicas, combinadas con información LiDAR, son una alternativa interesante para la generación de mapas continuos de alta resolución de parámetros relacionados con el estado de la vegetación. Así, la imagen a clasificar presenta información espectral, índices de vegetación e información proveniente de LiDAR. Para la clasificación referente a copas de los árboles se utilizó la intensidad LiDAR entre 4 y 40 m, y para la del sotobosque/matorral la intensidad LiDAR entre 0,4 y 4 m de altura (Tabla 2).

Tabla 2. Covariables predictoras usadas en la clasificación Random Forest

Grupos de variables	Número de banda	Variable
Espectrales	1	Azul
	2	Verde
	3	Rojo
	4	Infrarrojo cercano (NIR)
Índices de vegetación	5	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
Información LiDAR	6	Intensidad 0,4-4 m / Intensidad 4-40m

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de la intensidad de los datos LiDAR

Los valores de intensidad LiDAR en el estrato superior (> 4 m) mostraron una alta correlación ($r^2 = 0.92$, $n = 36$) con los datos de cobertura de las copas vivas del arbolado (Figura 2). Nuestros resultados coinciden con estudios previos, en los que se observaron valores de intensidad LiDAR

significativamente inferiores en árboles muertos respecto a vivos (KIM et al. 2009; KORPELA et al. 2010). En base a estas observaciones se estableció la siguiente clasificación:

- Clase 1 - Predominio de copas muertas (intensidad < 30)
- Clase 2 - Mezcla de copas vivas y muertas (intensidad 30-60)
- Clase 3 - Predominio de copas vivas (intensidad > 60)

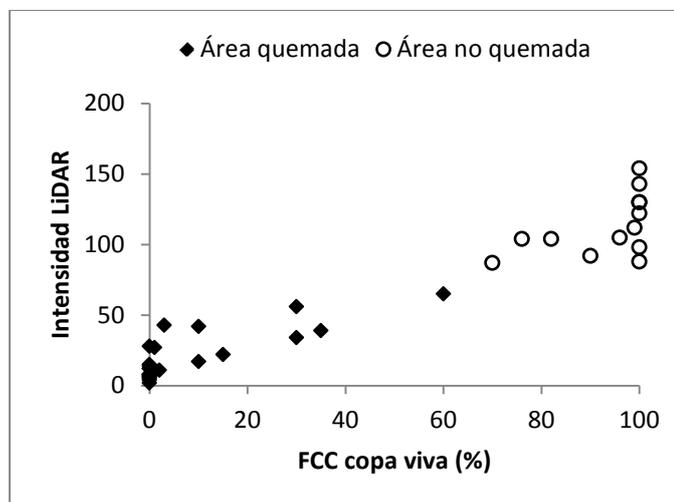


Figura 2. Relación entre la cobertura de copas vivas y la intensidad LiDAR en el estrato arbolado (> 4 m)

Los resultados para las fechas estudiadas indican que la clasificación propuesta, elaborada a partir de los datos LiDAR de 2014 y las observaciones de campo, es coherente con los datos LiDAR de 2011 (Figura 3), donde se observa una mayoría de copas vivas antes del incendio en toda la zona de estudio. En el año 2012, los resultados de la clasificación con datos LiDAR también coinciden con los niveles de severidad establecidos en el Parque, en los que las copas vivas se localizan fundamentalmente en las zonas de menor severidad, asociadas a fuego de superficie, y en las que aún se encontraban copas que seguían estando fotosintéticamente activas justo después del incendio (MARINO et al. 2016). Las zonas con predominio de copas quemadas se localizan en las zonas de mayor severidad del fuego, donde prácticamente la totalidad de la vegetación existente fue calcinada, quedando tan solo los restos de la biomasa muerta de las copas en pie. Sin embargo, en 2014 se observa un importante incremento de la biomasa muerta respecto a 2012, lo que indica que en términos generales las copas no sólo no rebrotaron dos años tras el fuego sino que muchas de ellas murieron. Concretamente, entre los años 2012 y 2014, la superficie con predominio de biomasa muerta en las copas aumentó del 30% a más del 46% del área de estudio, mientras que las zonas con predominio de copas vivas quedaron reducidas a menos del 15% de la superficie.

En relación al estrato inferior de la vegetación (< 4 m), el análisis de los datos asociado a la existencia de rebrote de cepa del arbolado en las parcelas de campo fue menos evidente, no encontrando una correlación entre los valores de intensidad LiDAR y las coberturas del rebrote. Según la clasificación propuesta, los resultados cartográficos indicaron que justo después del incendio (2012) la mayoría de la zona de estudio tenía nula o escasa recuperación de la vegetación en el estrato inferior. En el año 2014 se observó una importante recuperación en el sotobosque en las masas arboladas, aunque todavía no se detecta suficiente rebrote en muchas zonas afectadas. Las áreas que presentan valores moderados de rebrote se corresponden fundamentalmente con zonas de formaciones arbustivas de fayal-breza, donde también existía mezcla con matorral y/o herbáceas. Por tanto, la recuperación de la de vegetación prioritaria, entendiendo como tal el rebrote de cepa de las especies de monteverde (lauráceas, fundamentalmente) no pudo ser suficientemente bien discriminado de la ocupación de otro tipo de especies.

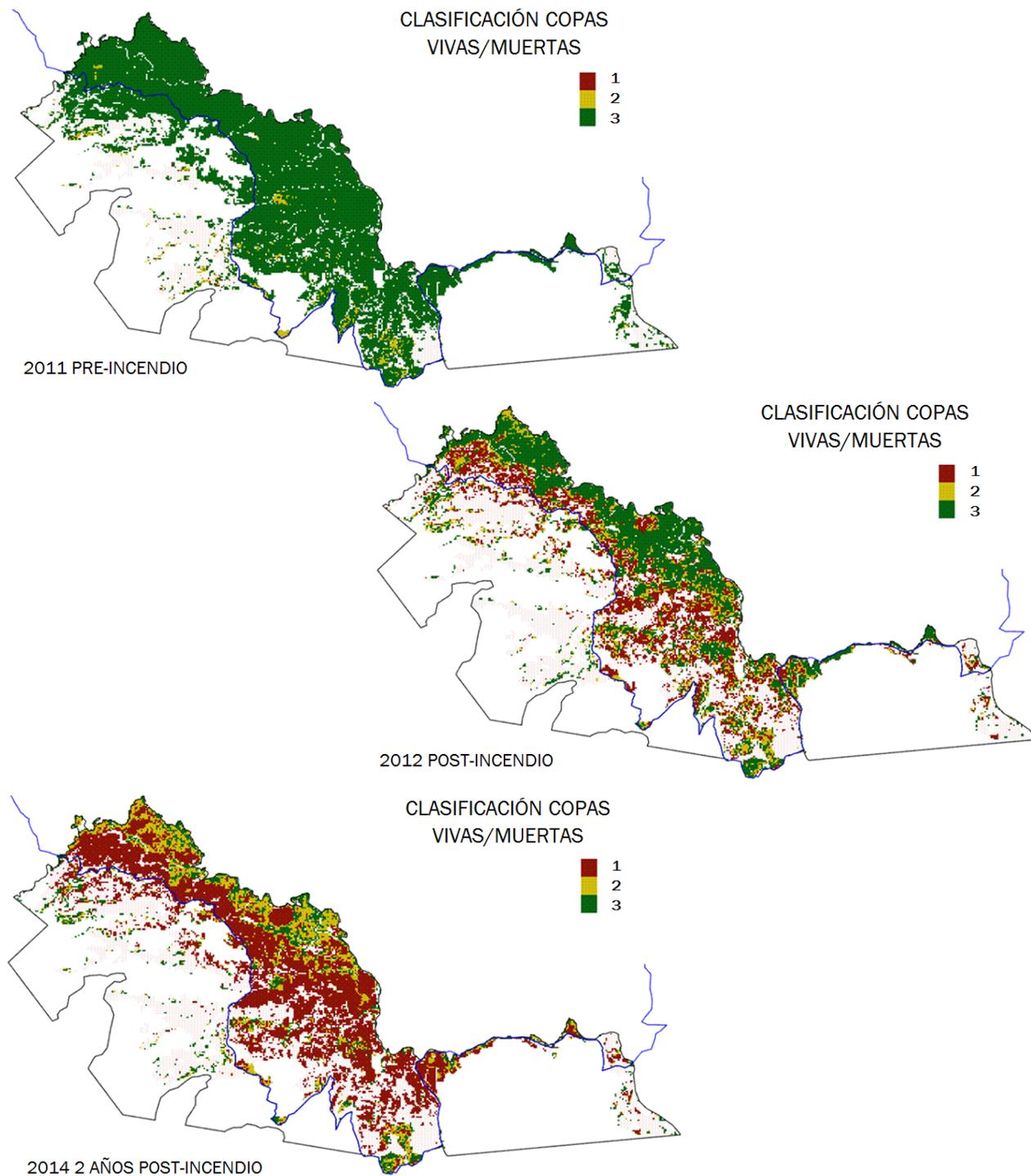


Figura 3. Discriminación de biomasa viva y muerta en el estrato arbolado (> 4 m) antes (2011) y después del incendio (2012, 2014). 1 = predominio de copas muertas; 2 = mezcla de copas vivas y muertas; 3 = predominio de copas vivas

4.2. Análisis de la integración de imágenes ópticas e información LiDAR. Clasificación supervisada Random Forest.

El análisis del grado de supervivencia de las copas (presencia de biomasa viva/muerta) y del nivel de rebrote de cepa del arbolado en el sotobosque/matorral para la vegetación prioritaria se ha realizado estudiando la señal de intensidad obtenida mediante LiDAR en dos estratos independientes: el estrato del sotobosque/matorral (0,4 a 4 m) y el estrato arbóreo (4 a 40 m). Esto nos permitió establecer rangos de intensidades clasificados para el estrato arbóreo (3 clases: zonas con copas muertas, zonas mixtas y zonas con copas vivas) y para el estrato del sotobosque/matorral (2 clases: zonas con rebrote nulo o escaso, y zonas con rebrote moderado a abundante). En este análisis integrativo de tecnología LiDAR con índices de vegetación obtenidos mediante imagen satelital, evaluamos la relación del índice NDVI, indicador del desarrollo y el vigor de la vegetación, con parámetros obtenidos mediante LiDAR, en concreto la fracción de cabida cubierta (FCC) del estrato arbolado y del sotobosque/matorral y sus respectivas intensidades.

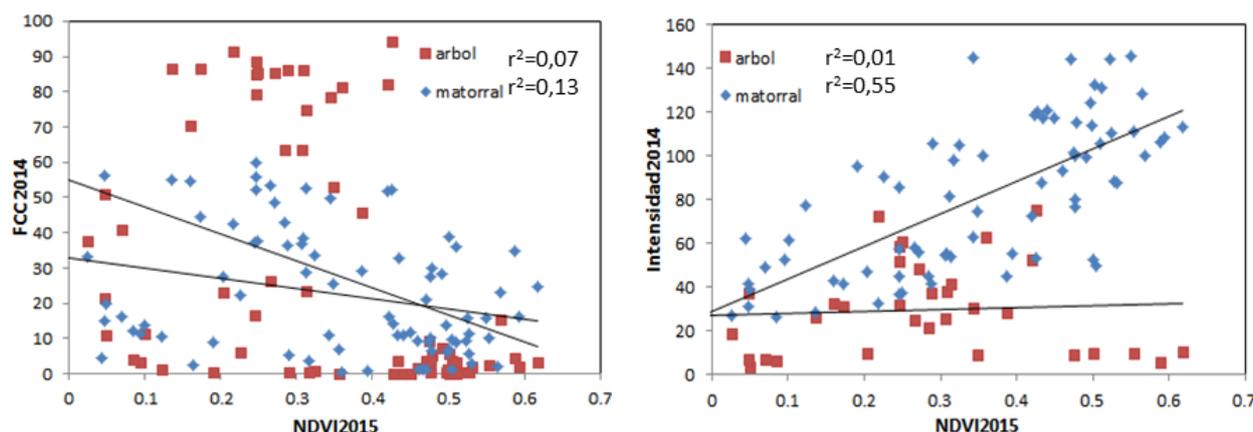


Figura 4. Fracción de cabida cubierta e intensidad obtenida con LiDAR 2014 frente a NDVI de la imagen Pleiades Julio 2015

La representación entre el índice de vegetación NDVI obtenido de imágenes satelitales de 2015 y el parámetro de fracción de cabida cubierta obtenido de datos LiDAR de 2014 presenta correlaciones bajas tanto para matorral como para arbolado ($r^2 < 0,15$). Esto es debido, como se explica anteriormente, a que existen copas de árboles quemadas en pie, con un elevado entramado de ramas que presenta valores de fracción de cabida cubierta altos y valores de NDVI muy bajos. También pueden existir zonas donde empieza a haber crecimiento de matorral, y por tanto presenta valores de NDVI elevados, pero se corresponden con zonas de poca fracción de cabida cubierta. Por tanto podemos afirmar que la fracción de cabida cubierta no es un parámetro válido para obtener cantidad de biomasa viva en este estudio.

Sin embargo, encontramos que los valores de intensidad LiDAR, principalmente en matorral, presentan una mejor correlación con el índice de vegetación NDVI con valores de $r^2=0,55$. Por lo tanto, el parámetro de intensidad puede darnos un mayor acercamiento al porcentaje de biomasa viva en el estrato inferior que encontramos en las diferentes zonas del incendio. No obstante, en el estrato arbóreo esta correlación baja considerablemente. El índice NDVI no nos aporta información en el plano vertical, ya que obtiene el valor promedio para todo el estrato de vegetación. Por tanto, puede haber zonas de copas muertas en pie (intensidad LiDAR baja) que presenten valores altos de NDVI debido a la recuperación de la vegetación en el estrato inferior. Y zonas donde la intensidad LiDAR sea alta, porque hay vegetación en copa, pero el valor de NDVI es un valor medio entre 0,25 - 0,4, ya que no representa copas arbóreas muy densas. Una superficie con una vegetación arbórea sana y tupida presentaría valores de NDVI superiores a 0,6. En este caso, los valores de NDVI en torno a 0,25 y 0,4, corresponden a la vegetación arbórea que no tiene una alta densidad foliar en las copas. Esto explica que la gráfica de NDVI versus intensidad arbórea no presente una buena correlación.

A la vista de estos resultados, para obtener mapas de rebrote en el estrato arbóreo y el estrato de matorral, se integró la información proveniente del NDVI y los valores de intensidad obtenidos con LiDAR. Las imágenes con información de bandas espectrales, índice de vegetación e intensidad, fueron clasificadas mediante el algoritmo Random Forest, obteniendo nuevos mapas de nivel de rebrote y estado de la biomasa de las copas (Figura 5).

- En el caso del rebrote del arbolado a nivel del sotobosque/matorral, se diferenciaron las siguientes clases: Clase 1 - Rebrote nulo o escaso: fracción $< 20\%$, y Clase 2 - Rebrote moderado a abundante: fracción $> 20\%$.
- En el caso del estrato arbóreo (> 4 m), realizamos la clasificación de copas vivas/muertas en las siguientes clases: Clase 1 - Predominio de copas muertas: fracción viva $< 15\%$, Clase 2 - Mezcla de copas vivas y muertas: fracción viva $15 - 70\%$, y Clase 3 - Predominio de copas vivas: fracción viva $> 70\%$.

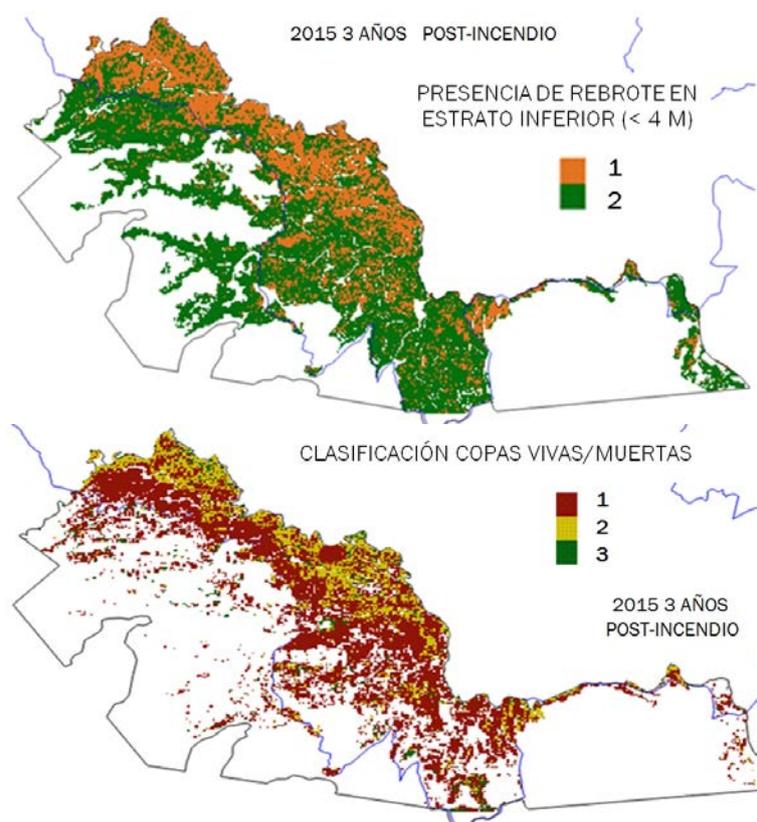


Figura 5. Clasificación de la presencia de rebrote de cepa del arbolado elaborada a partir de los valores de reflectancia, el índice NDVI de la imagen Pleiades y la intensidad LiDAR en el estrato inferior y la intensidad LiDAR en el estrato superior, respectivamente.

En el estrato arbóreo destacan principalmente las zonas de clase 1, copas muertas en toda el área, presentando algunas copas viva con una fracción de más del 70% (clase 3) en zonas donde probablemente las copas del arbolado no se vieron afectadas por el fuego.

La información espectral junto con el índice NDVI aporta información de gran utilidad para analizar la evolución de la vegetación (GUILLÉN-CLIMENT et al., 2016). Sin embargo, no aporta información diferenciada por estratos. En concreto, esta zona presenta una densidad alta de ramaje en copas quemado o seco lo cual falsea datos de rebrote. Por ello, el poder contar con información

LIDAR, que proporciona datos en el plano vertical, hace que sea una tecnología de gran potencial para estudios de evaluación de la vegetación regenerada en un incendio.

Comparando la cartografía derivada sólo de los datos LiDAR frente a la obtenida a partir de la integración de datos LiDAR e imágenes espectrales, los resultados encontrados fueron similares. Las diferencias son debidas probablemente a la mezcla en la reflectancia (bandas espectrales y NDVI) de la vegetación recuperada, que fundamentalmente se encuentra en los estratos inferiores, con los restos quemados en el estrato superior de las copas, y que no se puede separar en la información espectral derivada de las imágenes. En nuestro caso, a pesar de encontrar áreas con poca cobertura arbórea tras el fuego, las estructuras de los árboles quemados permanecían en pie, lo que produjo una inevitable distorsión en la reflectancia de la vegetación a nivel de pixel ya que el análisis de las imágenes espectrales utiliza la energía reflejada para todo el estrato vertical de la vegetación en su conjunto.

Aunque no se aplicaron correcciones a los datos de intensidad brutos, los resultados demuestran que la incorporación de la intensidad LiDAR para la evaluación del seguimiento de la vegetación es prometedora. Los resultados para la clasificación del rebrote del arbolado en el estrato inferior no fueron tan satisfactorios como los obtenidos para la discriminación de biomasa viva-muerta en el estrato de las copas. A pesar de la capacidad de penetrabilidad del LiDAR, los datos de intensidad registrados en los estratos inferiores suelen estar asociados a retornos múltiples, cuyos valores son más difíciles de interpretar por la dispersión de energía producida a lo largo del perfil vertical de la vegetación (MORSDORF et al. 2010). En este sentido, algunos autores recomiendan usar sólo los primeros retornos y los retornos únicos con el fin de asegurar una mejor interpretación de los datos (MORSDORF et al. 2010; WING et al. 2012). La banda espectral utilizada por el pulso láser (1064 nm) se encuentra en una región del espectro electromagnético óptima para la discriminación del estado de la vegetación dada la mayor reflectancia esperada en la biomasa foliar respecto a la biomasa leñosa (KIM et al. 2009; GARCÍA et al. 2011). Sin embargo, estudios previos demuestran que las diferencias existentes entre los valores de intensidad entre especies son mucho más sutiles que entre biomasa viva-muerta (KORPELA et al., 2010). El correcto análisis e interpretación de los datos de intensidad LiDAR sólo es factible mediante una calibración adecuada a partir de las características del sistema de captura utilizado y mediante el uso de valores de referencia que permitan identificar los distintos niveles de intensidad asociadas a superficies tipo. La aplicación de correcciones a los datos de intensidad sin duda contribuirá a mejorar el potencial de discriminación usando este tipo de datos en el futuro (KORPELA et al., 2010).

Una de las limitaciones encontrada fue el reducido número de parcelas disponibles para la realización del estudio. Sería por lo tanto necesario aumentar el volumen de datos de campo y su variabilidad para poder detectar con mayor nivel de detalle las diferencias existentes entre especies, con el fin de identificar mejor los cambios producidos en la composición específica de la vegetación regenerada tras el fuego. Estudios previos han aplicado con éxito este tipo de datos para la identificación de especies tanto a nivel de árboles individuales (HOLMGREN et al., 2008; KORPELA et al., 2010) como de especies dominante a nivel de parcelas (MORSDORF et al., 2010) Por otro lado, la distribución espacial del regenerado presenta una alta heterogeneidad sobre el terreno, por lo que de cara a análisis futuros sería recomendable emplear la información espacial de 2 m de resolución que aporta Pleiades para mejorar los resultados.

5. Conclusiones

Este trabajo pone de manifiesto el potencial de los datos de intensidad LiDAR para la discriminación entre biomasa viva y muerta en zonas quemadas. Nuestro estudio confirmó que su uso para discriminar entre las diferentes especies del sotobosque regeneradas tras el fuego es mucho más complejo que para la clasificación de copas con y sin actividad fotosintética, y requiere de un mayor esfuerzo de investigación para obtener resultados adecuados a las necesidades demandadas

por los gestores. A pesar de las limitaciones en la calibración de los datos, la incorporación de la información tridimensional asociada a la intensidad LiDAR permite evaluar el estado de la vegetación en estratos de altura diferenciados, siendo de especial relevancia para evaluar los cambios producidos en las masas forestales quemadas. Esta metodología proporciona resultados complementarios respecto al análisis basado exclusivamente en datos de imágenes espectrales, y supone un importante valor añadido para el estudio de la recuperación de la vegetación tras incendios forestales.

6. Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado dentro del marco del proyecto LIFE+GARAJONAY VIVE financiado por la Comisión Europea. Los autores agradecen la colaboración de todos los que han aportado información a este estudio: Al Organismo Autónomo de Parques Nacionales, por la elaboración del mapa de vegetación. Al Gobierno de Canarias por facilitarnos la información procesada del vuelo LiDAR del año 2012. Y muy especialmente al equipo Técnico de TRAGSA y a Ángel Fernández (Director Conservador del P.N de Garajonay). La participación de Eva Marino y Mariluz Guillén-Climent fue posible gracias al programa post doctoral Torres Quevedo financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, así como por la financiación recibida en el marco del proyecto de I+D “GEPRIF” (RTA2014-00011-C06-06) por Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

7. Bibliografía

BREIMAN, L.; 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45 5-32

CHAVEZ, J.; 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24 459-479

DONOGHUE, D.N.M.; WATT, P.J.; COX, N.J.; WILSON, J.; 2007. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 110(4) 509–522.

FERNÁNDEZ A.B.; PÉREZ DE PAZ, P.L.; 2009. Una visión panorámica del monteverde canario. En: FERNÁNDEZ A.B. (eds.): Parque Nacional de Garajonay. Patrimonio de la Humanidad. Ed. Turquesa. S/C de Tenerife. 142-159.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; DANSON, F.M.; 2009. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 114 816–830.

GUILLÉN-CLIMENT, M.L.; MARINO, E.; RANZ, P.; TOMÉ, J.L.; 2016. Spatial variability of vegetation recovery at La Gomera wildfire using high spatial resolution imagery. *FLAMMA* 7(2) 29-34.

HOLMGREN, J.; PERSSON, Å.; 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90(4) 415–423

HOLMGREN, J.; PERSSON, Å.; SÖDERMAN, U.; 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. *Int. Journal of Remote Sensing* 29 1537– 1552.

- KIM, Y.; YANG, Z.; COHEN, W.B.; PFLUGMACHER, D.; LAUVER, C.L.; VANKAT, J.L.; 2009. Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint lidar data. *Remote Sensing of Environment* 113, 2499–2510.
- KORPELA, I.; ØRKA, H.O.; MALTAMO, M.; TOKOLA, T.; HYYPPÄ, J.; 2010. Tree species classification using airborne LiDAR – effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica* 44(2): 319–339.
- MACGAUGHEY, R.J., 2014. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization, version 3.42. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington, Seattle (179 p).
- MARINO, E.; GUILLÉN-CLIMENT, M.; RANZ, P.; TOMÉ, J.L.; 2016. Fire severity mapping in Garajonay National Park: comparison between spectral indices. *FLAMMA* 7(2): 22-28.
- MITRI, G.H. & GITAS, I.Z., 2013. Mapping post-fire forest regeneration and vegetation recovery using a combination of very high spatial resolution and hyperspectral satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 20, 60:66.
- MORS DORF, F.; MÅRELL, A.; KOETZ, B.; CASSAGNE, N.; PIMONT, F.; RIGOLOT, E.; ALLGÖWER, B.; 2010. Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information derived from airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 114, 1404–1415.
- NOTARIO, J.; ARBELO, C.; RODRÍGUEZ, A.; FERNÁNDEZ, A.; GÓMEZ, L.; 2015. Burned soil at La Gomera wildfire: a preliminary GIS analysis. *FLAMMA*, 6 (2), 95-97.
- PAUSAS, J.G.; KEELEY, J.E.; 2009. A burning story: The role of fire in the history of life. *Bioscience* 59 (7):593-601.
- PAUSAS, J.G.; LLOVET, J.; RODRIGO, A.; VALLEJO, R.; 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean Basin? – a review. *Int J Wildland Fire* 17 (6):713-723
- QGIS Development Team, 2014. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.; ZOMER, R.; DENNISON, P.; ROBERTS, D.; SALAS, J.; 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sensing of Environment* 79, 60 - 71.
- VIEDMA, O.; TORRES, I.; PÉREZ, B.; MORENO, J.; 2012. Modelling plant species richness using reflectance and texture data derived from Quickbird in a recently burned area of Central Spain. *Remote Sensing of Environment* 119, 208-211.
- WHITE, J.D.; RYAN, K.C.; KEY, C.C.; RUNNING, S.W.; 1996. Remote Sensing of Forest Fire Severity and Vegetation Recovery. *Int. J. Wildland Fire* 6(3): 125-136.