



Universidad de Oviedo

---

**Estimación de modelos de combustible  
basada en datos de sensores remotos**

**Trabajo Fin de Máster**

**Autor:** Óscar Fernández Alonso

**Tutor en empresa:** Víctor Arrimada De La Parra

**Tutor académico:** Pedro Álvarez Álvarez

Julio, 2016

León, 13 de julio de 2016

D. Víctor Arrimada De La Parra, tutor de la empresa Tecnosylva del trabajo fin de máster: *Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos*, presentado por D. Óscar Fernández Alonso, da el visto bueno para su presentación y defensa.



Fdo.: Víctor Arrimada de la Parra



Universidad de  
Oviedo

Mieres, 13 de julio de 2016

D. Pedro Álvarez Álvarez, profesor del máster en Teledetección y SIG y tutor del trabajo fin de máster *Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos*, presentado por D. Óscar Fernández Alonso, da el visto bueno para su presentación y defensa.



NOMBRE ALVAREZ  
ALVAREZ PEDRO - NIF

Firmado digitalmente por NOMBRE ALVAREZ  
ALVAREZ PEDRO - NIF 33327250C  
Nombre de reconocimiento (DN): cn=ALVAREZ ALVAREZ PEDRO - NIF, o=FNMT, ou=front class 2 ca, ou=1  
ALVAREZ ALVAREZ PEDRO - NIF  
Fecha: 2016.07.13 10:33:27 +02'00'

Fdo.: Pedro Álvarez Álvarez

## RESUMEN

---

Los modelos de combustible son uno de los elementos clave para explicar el comportamiento del fuego en los incendios forestales. En este trabajo se realiza la estimación de los modelos de combustible, desarrollados por Scott y Burgan (2005), basándose en información radiométrica de Landsat 8 y SPOT 5, LiDAR y la inclusión de información auxiliar como la altitud, pendiente y orientaciones. Para ello, se realiza una segmentación de la zona de estudio correspondiente a la provincia de Cuenca, mediante el Análisis Orientado a Objetos donde se definen conjuntos de píxeles homogéneos llamados objetos. Posteriormente se realiza la estimación de los modelos de combustible presentes mediante una clasificación supervisada donde se parte de un conocimiento previo del terreno y utilizando los árboles de decisión como algoritmo de clasificación. Se revisan y verifican los nodos conflictivos en los que el número de casos de aparición se reparten en varias categorías de modelos de combustible. Así, se procede a la validación de los modelos de combustible generados mediante simulador de incendios operacional WildFire Analyst. La capa de alta resolución generada mejora significativamente la cartografía de modelos de combustible existente para la zona de estudio, permitiendo mejorar la información sobre las características de los mismos, lo que resulta clave para la predicción del comportamiento del fuego, evaluación del riesgo de incendio o el éxito en las tareas de extinción.

**Palabras clave:** modelos de combustible, sensores remotos, OBIA, objetos, clasificación supervisada, nodos, comportamiento del fuego.

## ABSTRACT

---

Fuel models are one of the key applications to explain fire behaviour in forest fires. This report presents estimation samples of fuel models developed by Scott and Burgan (2005) based on the radiometric information Landsat 8 and SPOT 5, LiDAR and additional support information such as altitude, slope and aspect. A segmented area similar to the Cuenca region has been selected for this study, through the Object Based Image Analysis where homogeneous pixels groups called objects are defined. Subsequently an estimation of the fuel models is carried out through a supervised classification where there has been a previous knowledge of the ground, using the trees as algorithm classification. The conflicting nodes where the cases of appearance are divided into several fuel models categories, are reviewed and verified. This is the validation process for the fuel models generated through fire simulator WildFire Analyst. The high resolution layer generated significantly increases the fuel model cartography provided in the area of study, allowing to obtain better information about the characteristic of these; it becomes a key for predicting fire behaviour, fire risk assessment or success in preventing fires.

**Keywords:** fuel models, remote sensing, OBIA, objects, supervised classification, nodes, fire behaviour.

# ÍNDICE

---

Resumen.....	3
Abstract.....	4
1. Introducción.....	6
1.1. Justificación y objetivos.....	8
2. Material y métodos.....	10
2.1. Área de estudio.....	10
2.2. Material empleado.....	12
2.2.1. Software utilizado.....	12
2.2.2. Datos de partida.....	13
2.3. Métodos de análisis.....	15
2.3.1. Definición de los modelos de combustible.....	15
2.3.2. Procedimientos para la elaboración del mapa de modelos de combustible.....	17
2.3.2.1. Análisis orientado a objetos (OBIA).....	18
2.3.2.2. Clasificación supervisada.....	19
2.3.3. Revisión y verificación de nodos.....	22
2.3.4. Validación de la capa de modelos de combustible.....	22
3. Resultados y discusión.....	23
3.1. Análisis orientado a objetos.....	23
3.2. Clasificación supervisada.....	24
3.2.1. Predicción de los modelos de combustible en el resto de objetos.....	24
3.3. Revisión y verificación de nodos.....	26
3.4. Identificación de los modelos de combustible estimados.....	26
3.5. Validación de la capa de modelos de combustible.....	29
3.6. Comparación de la capa de modelos de combustible con el Mapa Forestal de España 1:50.000.....	29
4. Conclusiones.....	31
5. Bibliografía.....	33

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Los incendios forestales son un elemento modelador del paisaje, suponen una de las principales amenazas de los ecosistemas forestales, ocasionando un impacto tanto a nivel ambiental, como social y económico. La incontrolada proliferación de los mismos en los últimos años ha contribuido a agravar sus efectos. De esta forma, la acción del fuego no se limita a arrasar la vegetación presente, sino que produce un impacto sobre el suelo, que se ve degradado a sus estadios más elementales (Chuvieco & Martín, 2004). En los países con clima mediterráneo los ciclos de ocurrencia se acortan rápidamente en determinados espacios, lo que combinado con otros factores (climáticos, edafológicos, antrópicos, etc.) conduce a situaciones con peligro muy alto de irreversibilidad (Vélez, 1986).

Los combustibles son uno de los elementos clave para explicar el comportamiento del fuego en los incendios forestales, ya que suministran la energía necesaria para la propagación del fuego (Byram, 1959; Chandler *et al.*, 1983). Se definen en función de la carga de biomasa, la composición en diferentes tamaños o el contenido en humedad promedio (Rothermel, 1972; Rothermel, 1983).

Se han desarrollado varias clasificaciones de combustibles forestales que llevan asociada una serie de propiedades que permiten estimar el peligro o el comportamiento asociado a cada tipo de combustible en el caso que sea afectado por un incendio. El Servicio Forestal de Estados Unidos en la década de los años setenta, perfeccionaron las clasificaciones de modelos de combustible que se venían usando en la extinción de incendios forestales. El equipo, entre los que destacan Rothermel (1972) y Albini (1976), establecieron cuatro grupos de combustibles, que se subdividen en 13 modelos diferentes en función del tamaño y densidad de las especies.

El ICONA (1990) llevo a cabo un inventario fotográfico de situaciones representativas de combustibles en las regiones españolas. En la Europa mediterránea, el proyecto Prometheus (Prometheus, 2000) ha diseñado un tipología que basándose en principios similares a los anteriores, describe siete modelos de combustible, considerando tres elementos de propagación del fuego: pastizal, matorral y hojarasca, obteniendo una caracterización más acorde con la vegetación mediterránea. Scott y Burgan (2005) actualizaron la clasificación del Servicio Forestal de Estados Unidos y la ampliaron a 45 modelos que se usan actualmente en Estados Unidos y que además se han adaptado para su uso en otras partes del mundo (Vélez, 2000).

Una mejora en el conocimiento de sus características resulta esencial para la predicción del comportamiento del fuego, y por tanto, para el éxito de las tareas de extinción de los incendios forestales, la protección de los bienes amenazados y la seguridad de los combatientes. También los combustibles forestales juegan un papel clave en la magnitud de los efectos ambientales de los incendios. El impacto sobre la vegetación y los suelos dependen en gran medida de la severidad del fuego y a su vez este parámetro está muy influenciado por la cantidad de biomasa consumida durante el incendio (Vega *et al.*, 2013).

En este contexto, la cartografía de modelos de combustible proporciona información sobre el estado del terreno y su posible respuesta en caso de incendio. La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan una valiosa herramienta para la prevención y evaluación de un incendio mediante un inventario de modelos de combustible.

La gestión de la información geográfica se realiza a través de los Sistemas de Información Geográfica que se definen como un conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra (Instituto Geográfico Nacional, 2016)

La teledetección tiene por objeto el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella tienen lugar a partir de los datos registrados por sensores remotos (Sobrino, 2001). Los satélites de observación de la tierra, ofrecen condiciones adecuadas para este tipo de estudios dado la periodicidad de su órbita, la cobertura global que poseen, su resolución espacial y la disponibilidad de información multiespectral. La homogeneidad en la toma de los datos y la información sobre regiones no visibles del espectro (infrarrojo cercano y medio) suponen una importante ventaja de esta técnica, ya que al interpretarse digitalmente permite la conexión con otros datos espaciales a partir de su integración en un Sistema de Información Geográfica (Salas & Chuvieco, 1995).

La teledetección resulta un medio que permite la clasificación digital de diversas variables, en este caso modelos de combustible, con las principales técnicas existentes: clasificación supervisada y clasificación no supervisada, como introdujo Kourtz (1977). Salas y Chuvieco (1995) desarrollaron la aplicación de diversos métodos de clasificación, la utilidad de las imágenes Landsat TM e información auxiliar para obtener mapas de modelos de combustibles en países mediterráneos. Riaño *et al.*, (2003) muestran la capacidad de la teledetección para la cartografía de modelos de combustible, utilizando imágenes Landsat – TM y modelos de

combustible de Prometheus. Arrollo et al., (2006) desarrolló una metodología para la cartografía de modelos de combustible a partir de imágenes de alta resolución espacial a través de la clasificación orientada a objetos.

Sin embargo, el empleo de nuevas tecnologías de teledetección mediante sensores remotos activos, como es el caso del LiDAR (Light Detection and Ranging), supone un gran potencial para mejorar significativamente la caracterización de los combustibles forestales, ya que permite conocer con elevado nivel de detalle la estructura tridimensional de la vegetación de forma continua en grandes superficies (Marino *et al.*, 2016). Existen distintos trabajos de investigación donde se ha utilizado la tecnología LIDAR para la estimación de modelos de combustible (Riano *et al.*, 2003; Mutlu *et al.*, 2008; González-Olabarria *et al.*, 2012).

La utilización conjunta de los SIG, teledetección y LiDAR, conforman un sistema de información eficaz y capaz de resolver cuestiones de diverso tipo, por lo que constituyen un recurso de gran interés para la cartografía de modelos de combustible.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Este estudio se enmarca dentro del proyecto denominado “Elaboración de un Mapa de Modelos de combustible en Castilla – La Mancha” llevado a cabo por la empresa Tecnosylva, que posee una amplia experiencia en servicios de planificación del territorio y tecnología geoespaciales. Una de las tareas a realizar en este proyecto es la realización de un mapa de modelos de combustibles para la comunidad autónoma de Castilla – La Mancha.

Abordar el análisis de la cartografía de modelos de combustible resulta una herramienta de apoyo muy interesante, debido a que las diferentes características físicas como son: las cargas de biomasa, la composición en diferentes tamaños o las humedades promedio que poseen los modelos de combustible permiten estimar el peligro o el comportamiento asociado a cada tipo de combustible en el caso de que se vea afectado por un incendio.

En el marco de este proyecto pretendemos asignar una variable objetiva y precisa, que permita ofrecer una información final de tipo cualitativo, a través de los SIG, la clasificación orientada a objetos, la clasificación de imágenes con información radiométrica, LiDAR y modelos derivados. Así mismo, resulta de gran interés que dicha información pueda ser aplicada a diferentes estudios de planificación de incendios, estimación del peligro y riesgo de incendios o simulación de incendios, entre los que podemos incluir el simulador operacional de la

propagación del fuego en el territorio, Wildfire Analyst (Ramírez *et al.*, 2011), desarrollado por Tecnosylva y que proporciona un análisis en tiempo real del comportamiento y propagación de los incendios forestales.

Los objetivos de este trabajo son:

- ✓ Realizar la segmentación de la zona de estudio mediante la clasificación basada en objetos.
- ✓ Generar reglas lógicas de clasificación mediante los árboles de decisión.
- ✓ Estimar los modelos de combustible mediante clasificación supervisada.
- ✓ Revisar e identificar los nodos conflictivos.
- ✓ Identificar y describir los modelos de combustible presentes en el territorio.
- ✓ Validar la capa de modelos de combustible mediante el simulador Wildfire Analyst.
- ✓ Comparar los modelos de combustible presentes en el área de estudio con los modelos descritos con anterioridad presentes en el Mapa Forestal de España 1:50.000.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto adjudicado a Tecnosylva se desarrolla para toda la comunidad autónoma de Castilla - La Mancha, si bien en este trabajo el territorio se extiende en la provincia de Cuenca (Figura 1). Castilla - La Mancha se divide en 14 zonas facilitando así los diferentes procesos que se llevan a cabo. La provincia de Cuenca corresponde a las zonas 8A y 8B.

#### Localización de la zona de estudio

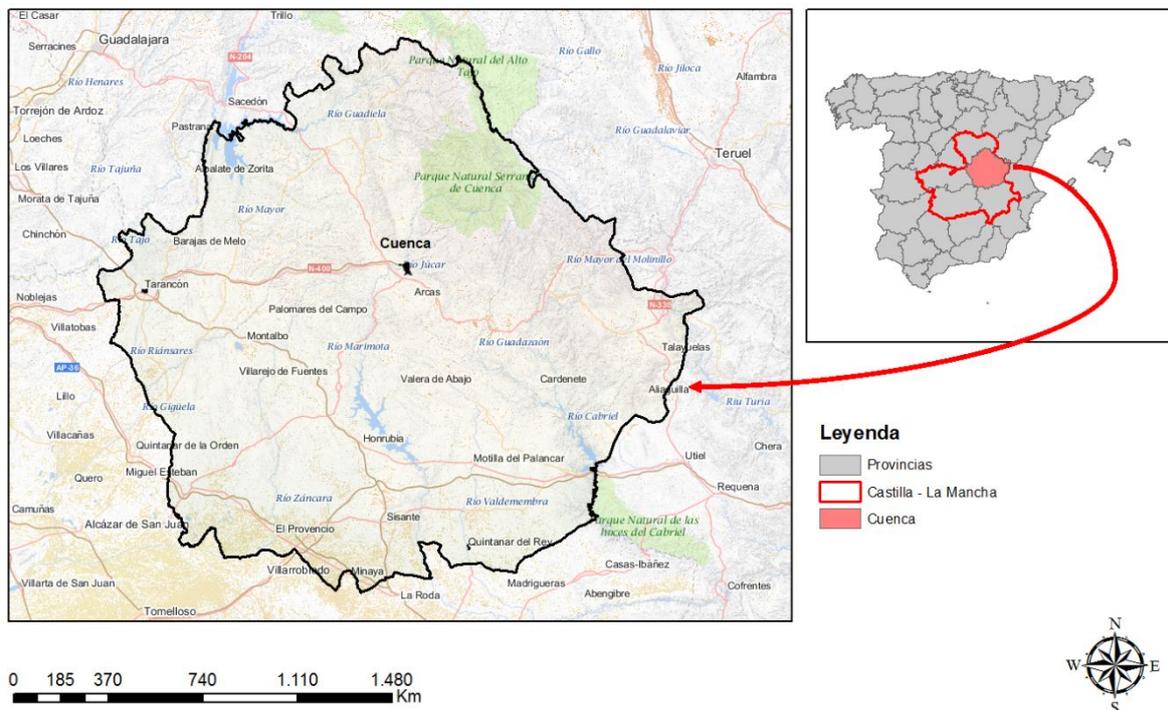


Figura 1. Localización de la zona de estudio

El área objeto de estudio en este proyecto, posee una extensión aproximada de 17.141 km<sup>2</sup> y una altitud media de 946 m. La red fluvial es amplia y se distribuye por todo el territorio destacando el río Júcar y afluentes como el Cabriel, Cigüela, Zancara y Guadiela (MAGRAMA, 2016a).

La provincia de Cuenca contiene un total de 14 Lugares de Interés Comunitario (LIC) (Tabla 1), que ocupan una extensión de 302.367,55 ha del territorio (Viceconsejería de Medio Ambiente de Castilla - La Mancha, 2016).

Tabla 1. Zonas LIC incluidas en Cuenca.

<b>Zonas LIC</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>PROVINCIA</b>	<b>SUPERFICIE DECLARADA TOTAL (ha)</b>
<b>Hoz del Río Gritos y Páramos de las Valeras</b>	Cuenca	1.733,83
<b>Laguna de el Hito</b>	Cuenca	914,9
<b>Rentos de Orchova y Vertientes del Turia</b>	Cuenca	4.765,48
<b>Sierras de Talayuelas y Aliaguilla</b>	Cuenca	7.763,00
<b>Sabinares de Campillos-Sierra y Valdemorillo de la Sierra</b>	Cuenca	13.654,00
<b>Hoces de Alarcon</b>	Cuenca	2.778,52
<b>Complejo Lagunar de Arcas</b>	Cuenca	275,03
<b>Cueva de la Judía</b>	Cuenca	196,62
<b>Cueva de los Morciguillos</b>	Cuenca	45,96
<b>Estepas Yesosas de la Alcarria Conquense</b>	Cuenca	11.481,79
<b>Sierra del Santerón</b>	Cuenca	2.609,00
<b>Río Júcar sobre Alarcón</b>	Cuenca	699,77
<b>Alto Tajo</b>	Cuenca y Guadalajara	140.068,00
<b>Sierra de Altomira</b>	Cuenca y Guadalajara	29.493,00

Así mismo, el territorio de Cuenca contiene un total de 9 Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) (Tabla 2), que ocupan una extensión de 303.541,66 ha (Viceconsejería de Medio Ambiente de Castilla - La Mancha, 2016).

Tabla 2. Zonas ZEPA incluidas en Cuenca.

<b>Zonas ZEPA</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>PROVINCIA</b>	<b>SUPERFICIE DECLARADA TOTAL (ha)</b>
<b>Alto Tajo</b>	Cuenca y Guadalajara	191.254,51
<b>Hoces del Cabriel, Guadazaón y Ojos de Moya</b>	Albacete y Cuenca	64.744,96
<b>Hoz del río Gritos y páramos de las Valeras</b>	Cuenca	1.792,27
<b>Laguna de El Hito</b>	Cuenca	954,93
<b>Serranía de Cuenca</b>	Cuenca y Guadalajara	192.461,04
<b>Sierra de Altomira</b>	Cuenca y Guadalajara	29.831,42
<b>Area esteparia de la Mancha Norte</b>	Ciudad Real, Cuenca y Toledo	107.245,96
<b>Rentos de Orchova y páramos de Moya</b>	Cuenca	6.335,55
<b>San Clemente</b>	Cuenca	10.677,81

En cuanto a la vegetación, la formación dominante es el *Quercus rotundifolia*, la característica encina de las zonas secas, grandes extensiones de pino laricio (*Pinus nigra*), y en zonas húmedas el alcornoque (*Quercus suber*). A mayor altitud aparecen otras especies arbóreas y una vegetación más densa como los quejigos (*Quercus lusitanica*), melojos (*Quercus pyrenaica*) y sabinas albares (*Juniperus thurifera*) (López-Davalillo, 2014).

## 2.2. MATERIAL EMPLEADO

### 2.2.1. Software utilizado

Hemos utilizado diversos software para el tratamiento y análisis de la información. A continuación se expone cada uno de ellos:

- **ArcGIS for Desktop v10.2:** ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar información geográfica. Mediante la aplicación ArcCatalog se puede organizar y administrar bases de datos espaciales para ArcGIS for Desktop (ESRI, 2016).

- **eCognition:** es un software desarrollado por Trimble, que combina todo tipo de datos geoespaciales para realizar diversos análisis y comparaciones. Puede importar imágenes (aéreas o de satélite), nubes de puntos, información vectorial, datos provenientes de un SIG, etc. Utiliza análisis basado en objetos, esto es, agrupa píxeles de imágenes con características similares de acuerdo a una parametrización dada (Trimble, 2016).
- **SPSS Statistics:** es software de análisis estadístico desarrollado por IBM, que presenta las funciones principales necesarias para realizar el proceso analítico de principio a fin. Posee la capacidad de trabajar con grandes bases de datos (IBM, 2016).
- **Microsoft Office:** es un conjunto de programas informáticos dedicados a aplicaciones ofimáticas (Microsoft, 2016), entre ellos se utiliza Access, Excel y Word.
- **WildFire Analyst:** simulador operacional de la propagación de incendios forestales. Integra diversos modelos predictivos de apoyo al cálculo de comportamiento del fuego y permite a sistemas de gestión de incendios con base GIS. Ofrece novedosos métodos de simulación, como la calibración automática de los modelos, el cálculo de tiempo de evacuación, las simulaciones inversas y modos probabilísticos sobre escenarios de incendios de diseño (Ramírez *et al.*, 2011).

### 2.2.2. Datos de partida

Entre la información espacial de partida para desarrollar los diferentes procesos se encuentra:

- **Mosaico de imágenes de satélite SPOT 5** procedentes del PNT (Plan Nacional de Teledetección) correspondientes a las imágenes del verano de 2014. La resolución espectral de las imágenes es de 5 bandas espectrales correspondientes a Banda 1: Verde (0,50 - 0,59  $\mu\text{m}$ ), Banda 2: Rojo (0,61 - 0,68  $\mu\text{m}$ ), Banda 3: Infrarrojo cercano (0,78 - 0,89  $\mu\text{m}$ ), Banda 4: Infrarrojo medio (IRM) (1,58 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) y una banda pancromática. Las bandas 1, 2 y 3 tienen una resolución espacial de 10 metros, la banda 4 de 20 metros y la pancromática de 2,5 metros. el Sistema Geodésico de Referencia es ETRS89 y la proyección cartográfica es UTM en el Huso 30 (Instituto Geográfico Nacional, 2010). Estas imágenes son proporcionadas por la Junta de Castilla - La Mancha.
- **Imágenes del satélite Landsat 8**, que cuenta con 2 instrumentos de toma de datos: el OLI (Operational Land Imager) o Generador Operacional de Imágenes de Tierra con 9 bandas y el TIRS (Thermal Infrared Sensor) o Sensor Infrarrojo Térmico con 2 bandas espectrales (U.S. Geological Survey, 2015). Tecnosylva administra imágenes de invierno, primavera, otoño y verano con la transformación de los niveles digitales

originales de las imágenes a reflectancia y sus correspondientes correcciones atmosféricas. A continuación se muestra la resolución espectral y espacial de cada una de las bandas:

Tabla 3. Bandas espectrales de Landsat 8 en OLI.

Bandas Espectrales de OLI	Longitud de onda	Resolución
<b>Banda 1 - Costero / Aerosol</b>	0.433 - 0.453 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 2 - Azul</b>	0.450 - 0.515 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 3 - Verde</b>	0.525 - 0.600 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 4 - Roja</b>	0.630 - 0.680 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 5 - Infrarrojo cercano</b>	0.845 - 0.885 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 6 - Infrarrojo de onda corta</b>	1.560 - 1.660 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 7 - Infrarrojo de onda corta</b>	2.100 - 2.300 $\mu\text{m}$	30 m
<b>Banda 8 - Pancromática</b>	0.500 - 0.680 $\mu\text{m}$	15 m
<b>Banda 9 - Cirrus</b>	1.360 - 1.390 $\mu\text{m}$	30 m

Tabla 4. Bandas espectrales de Landsat 8 en TIRS.

Bandas Espectrales de TIRS	Longitud de onda	Resolución
<b>Band 10 - Infrarrojo térmico de onda larga</b>	10.30 - 11.30 $\mu\text{m}$	100 m
<b>Band 11 - Infrarrojo térmico de onda larga</b>	11.50 - 12.50 $\mu\text{m}$	100 m

- Los **NDVI** (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) de las cuatro estaciones del año de Landsat 8 y de SPOT. Se trata de un índice propuesto por Rouse *et al.*, (1974) que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, en base a los valores de reflectancia correspondientes a las longitudes de onda del infrarrojo cercano y del rojo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a +1. La vegetación sana refleja bien la luz infrarroja y poco la roja, así la vegetación enferma refleja más la luz roja y menos la infrarroja. Se puede señalar un umbral crítico para cubiertas vegetales de 0,1 y para la vegetación densa de 0,5 y 0,7. La expresión es la siguiente:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - \text{R}}{\text{IRC} + \text{R}}$$

IRC = valores de píxel de la banda infrarroja cercana.

R = valores de píxel de la banda roja.

- **Nubes de puntos LiDAR** capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, procedentes del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) del año 2009. Mediante esta nube de puntos Tecnosylva desarrolla Modelos Digitales de Superficie, que informan sobre la estructura tridimensional de la vegetación. Esta información resulta especialmente interesante para la localización, extracción y descripción de la vegetación al incorporar una nueva variable como es la altura de los árboles y/o el matorral (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, 2009).
- **Modelo Digital del Terreno** con resolución espacial de 5 metros procedente del PNOA del año 2009 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, 2009).
- **Modelo de pendientes y modelo de orientaciones** derivado del modelos digital de elevación de PNOA y elaboradas mediante las herramientas *Slope* y *Aspect*, realizados en ArcMap 10.2.

## 2.3.MÉTODOS DE ANÁLISIS

### 2.3.1. Definición de los modelos de combustible

El objetivo principal de este proyecto es la estimación de modelos de combustible basada en la información de sensores remotos. Por lo tanto, las variables a estimar son los modelos de combustible, en este caso los propuestos por Scott y Burgan (2005). Los trece modelos desarrollados por Rothermel (1972) son ampliamente utilizados, en cambio, posteriormente en el año 2005, Scott y Burgan desarrollaron las definiciones de 45 modelos de combustible, que mejoran la exactitud de las predicciones de comportamiento del fuego ya que aumentan el número de modelos a aplicar, y mejoran la capacidad de entender el comportamiento del incendio al ofrecer más opciones de modelos de combustible, por lo que se están utilizando actualmente por todo el mundo, incluidas zonas mediterráneas de España como Andalucía (Rodríguez-Silva & Molina, 2010) y Valencia (Quilez & Chinchilla, 2013).

Establecen siete grandes grupos que a continuación se detallan (Scott y Burgan, 2005; Ramírez *et al.*, 2011):

#### 1) Modelos incombustibles (Nonburnable - NB).

En este tipo de modelos no existe una carga de combustible, los incendios forestales no presentan propagación.

## **2) Modelos de combustible de tipo pastizal (Grass - GR).**

El principal portador del fuego en los modelos de combustible tipo GR es el Pastizal. Los pastos combustibles pueden ser rastrojos de pasto natural o pastos densos de más de 2 metros de altura. El comportamiento del fuego varía desde una moderada velocidad de propagación y una baja longitud de llama en los pastos poco densos, a un comportamiento extremo de velocidad de propagación y longitud de llama en pastos altos. Todos los modelos de pasto son dinámicos, lo que significa que los cambios de carga de combustible herbáceo vivo a muerto se encuentran en función del contenido de humedad del combustible herbáceo vivo.

## **3) Modelos de combustible tipo pastizal-matorral (Grass-Shrub - GS).**

El principal propagador del fuego en los modelos de combustible tipo GS es la combinación de pastizal con matorral, ambos componentes son importantes en la determinación del comportamiento del fuego. Todos los modelos de combustible tipo GS son dinámicos, lo que significa que sus cambios de carga de combustible herbáceo vivo a muerto se encuentran en función del contenido de humedad del combustible herbáceo vivo. El efecto del contenido de humedad del combustible herbáceo vivo en la velocidad de propagación e intensidad es fuerte y depende de la cantidad relativa de carga de pastizal y matorral en el modelo de combustible.

## **4) Modelos de combustible tipo Matorral (Shrub-SH).**

El principal propagador del fuego en los combustibles SH son las ramas y hojas vivas o muertas en combinación con los restos de matorral muerto en la hojarasca. Una pequeña cantidad de combustible herbáceo puede estar presente. El efecto del contenido de humedad del combustible herbáceo vivo en la velocidad de propagación y longitud de llama puede ser fuerte en los modelos dinámicos SH.

## **5) Modelos de combustibles de Madera-Sotobosque (Timber-Understory - TU).**

El principal propagador del fuego en los modelos de combustible tipo TU es la hojarasca del bosque en combinación con combustible herbáceo o matorral. TU1 y TU3 contienen carga de combustible herbáceo vivo y son dinámicos. El efecto del contenido de humedad herbáceo vivo la velocidad de propagación e intensidad es fuerte y depende de la cantidad relativa de combustible pastizal o matorral presente en el modelo de combustible.

**6) Modelos de combustible Hojarasca de Bosque (Timber Litter - TL).**

El principal propagador del fuego en los modelos de combustible TL es el combustible leñoso muerto bajo. El combustible vivo esta presente, tiene un pequeño efecto sobre el comportamiento del fuego.

**7) Modelos de combustible tipo restos de madera derribada (Slash-Blowdown - SB).**

El principal propagador del fuego en los modelos de combustibles SB son restos de madera derribada. Áreas Boscosas con una alta mortalidad pueden ser modeladas con modelos de combustible SB.

**2.3.2. Procedimientos para la elaboración del mapa de modelos de combustible**

La estimación de los modelos de combustible a partir de información de los sensores remotos, se va a llevar a cabo mediante una serie de etapas. La primera de ellas corresponde a la estimación de los modelos de combustible mediante: análisis de imágenes orientado a objetos (OBIA), árbol de decisión y clasificación supervisada. La segunda etapa es la de revisión y verificación de nodos, en la que se realiza dos procesos independientes pero con una continuidad, donde se comienza con una clasificación no supervisada y, si después de este procedimiento existen nodos conflictivos se lleva a cabo la fotointerpretación. Se obtiene una capa de modelos de combustible que posteriormente se valida mediante el software WildFire Analyst.

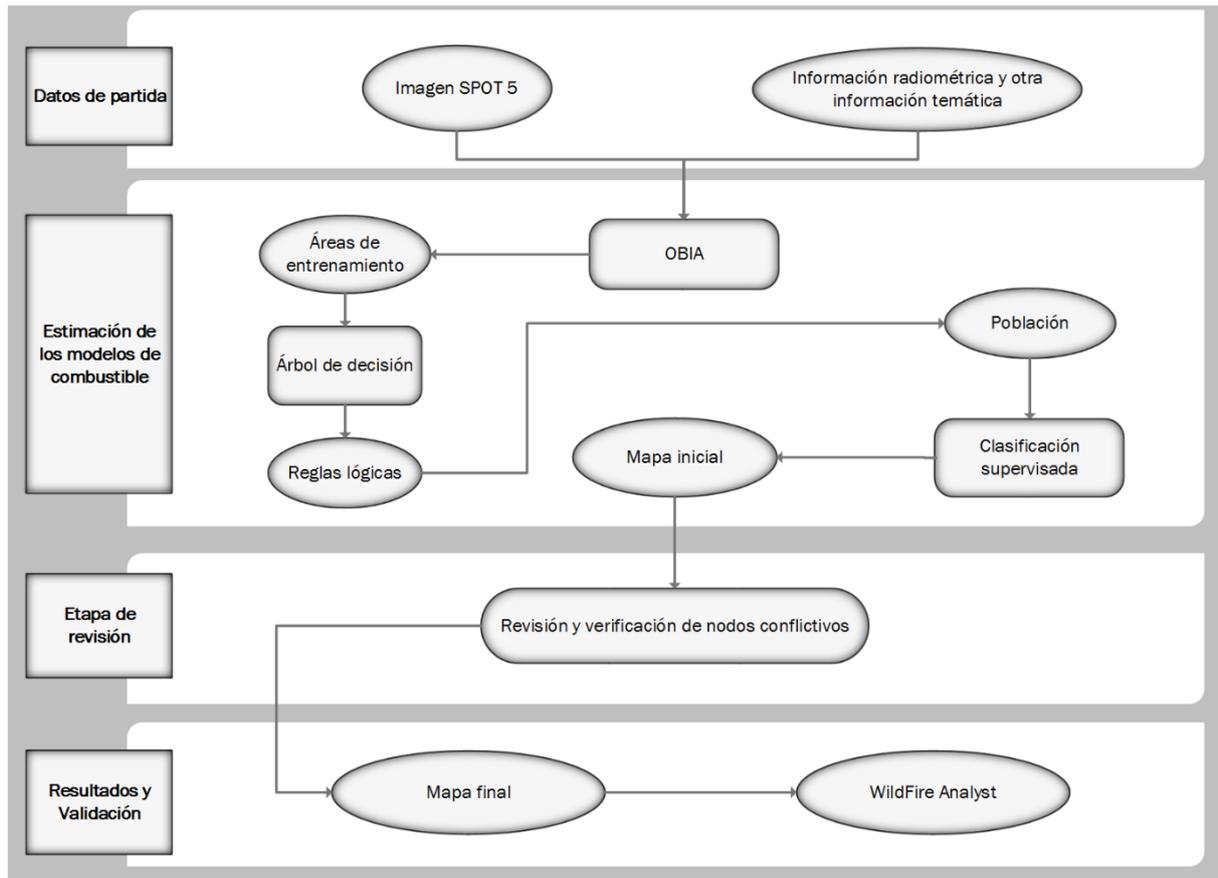


Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento general para la estimación de combustibles forestales a partir de la información de los sensores remotos y su integración en el simulador WildFire Analyst.

### 2.3.2.1. Análisis orientado a objetos (OBIA)

Se realiza una segmentación de la zona de estudio mediante el Análisis Orientado a Objetos (OBIA). El Análisis Orientado a Objetos es una técnica empleada para analizar imágenes satelitales, esta clasificación al igual que la convencional se basa en información de píxeles (valores espectrales de cada píxel), en cambio, incluye también un análisis basado en la información de un conjunto de píxeles similares llamados objetos. Los objetos de la imagen son los grupos de píxeles que son similares entre sí y están basados en el color, la forma, la textura, y la ubicación de estos en relación con otros objetos no clasificados o clasificados (Blaschke, 2010).

La segmentación es el proceso de separar la imagen en regiones más pequeñas representadas por objetos, que forman la base para clasificar la imagen. El objetivo era identificar segmentos homogéneos en la imagen, que sirvan de base a una buena delimitación espacial de la tesela, como proponen Arroyo *et al.*, (2006).

Este proceso es fundamental para llevar a cabo una posterior clasificación de la imagen. Se realiza con las imágenes SPOT 5 y mediante el software eCognition, que ofrece la posibilidad de usar diversos algoritmos de segmentación que producen distintos tipos de objetos. En este trabajo se utiliza el procedimiento de segmentación por multiresolución, en el que se crean los objetos basándose en tres criterios: escala, color y forma (suavidad/compactidad). Genera objetos tan grandes como sea posible y tan detallados como sea necesario, empleando para ello tanto color como sea posible manteniendo a su vez la forma tan alta como sea necesario permitiendo obtener objetos con el borde óptimo (suavidad/compactidad) (Ramírez *et al.*, 2013).

La escala es el parámetro más importante ya que controla la heterogeneidad máxima permitida para cada objeto, variando este factor se obtiene un número de objetos mayor o menor. El parámetro color define de forma general la contribución de los valores espectrales para definir la homogeneidad. El factor suavidad delimita el grado de suavidad de los bordes de los objetos y a valores más altos de compactación se crean objetos más pequeños y más compactos (Castellano *et al.*, 2003). El color y los parámetros de forma pueden ser ponderados de 0 a 1, al darle peso a la forma se le resta peso a la homogeneidad espectral de los objetos.

Así mismo, se procede a la asignación mediante eCognition, de diferentes variables independientes a cada polígono u objeto generado. Las variables a adjudicar son: repuesta radiométrica de las imágenes de Landsat 8 de invierno (Bandas 3, 5 y 6), primavera (Bandas 2, 4 y 5), otoño (Bandas 2, 4 y 5) y verano (Bandas 3, 5 y 6); NDVI de las cuatro estaciones de Landsat 8 y el NDVI de SPOT; Nube de puntos LiDAR; Modelo Digital del Terreno con resolución espacial de 5 metros; modelo de orientaciones y modelo de pendientes.

La clasificación supervisada, que posteriormente se describe, de los clasificadores clásicos a nivel de píxel basados en las características espectrales resulta complejo en las imágenes con gran detalle por la variación existente en la respuesta espectral de los píxeles que forman un objeto. Por esto, es necesario incorporar a las características espectrales otro tipo de información como la empleada en este proyecto.

#### **2.3.2.2. Clasificación supervisada**

La clasificación, entendida en el contexto de este estudio, es la asignación de un modelo de combustible a un polígono u objeto generado anteriormente, al tratarse de una clasificación supervisada se parte de un conocimiento previo del terreno, es decir las áreas de entrenamiento, que servirán de muestra para la asignación de modelos de combustible en otros polígonos con

características espectrales y temáticas similares en el resto del área de estudio (Chuvienco, 1996; Álvarez & Marquínez, 2007).

#### 2.3.2.2.1. Determinación de áreas de entrenamiento

La estimación de los modelos de combustible presentes en cada objeto mediante la clasificación supervisada, requiere de un proceso complementario de muestreo de campo. El fin es obtener una información representativa de cada modelo de combustible presente en el área de estudio, que sirva como validación en su asignación a cada objeto generado, es decir, proveer al algoritmo de clasificación que posteriormente se aplica, de conceptos que condicionan en gran medida, la calidad en la estimación de los modelos de combustible.

El equipo técnico de Tecnosylva desarrolla una serie de trabajos de campo, donde se definen áreas de entrenamiento, que poseen unas características puras de cada modelo de combustible. Posteriormente, en gabinete, se procede a la asignación de los estadísticos elementales (Media, Desviación típica, rango...etc.) de los atributos que contiene cada área, es decir, respuestas radiométricas de las imágenes Landsat 8 y SPOT, NDVI de ambos satélites, nube de puntos LiDAR, altitudes, orientaciones y pendientes.

Por lo tanto, las parcelas de campo caracterizadas o áreas de entrenamiento con sus respectivos atributos, actúan como verdad terreno en la creación del algoritmo de clasificación.

#### 2.3.2.2.2. Creación del algoritmo de clasificación

En esta etapa se selecciona el método estadístico que asigne de la mejor manera posible los modelos de combustible a los objetos generados según los atributos presentes en ellos. Debido a la experiencia previa del equipo de Tecnosylva en el desarrollo de otros proyectos, se utiliza como algoritmo de clasificación los árboles de decisión mediante el software SPSS. Para ejecutar el análisis de árbol de decisiones se seleccionan los menús: Analizar-Clasificar-Árbol.

Se trata de un método no paramétrico de clasificación basado en diagramas de flujo. Pronostican valores de una variable dependiente (modelos de combustible) basada en valores de variables independientes (información radiométrica y otra información temática) (Berlanga-Silvente *et al.*, 2013).

El objetivo es aprender cómo clasificar objetos, por medio del análisis de los atributos de las áreas de entrenamiento cuyas clases de modelos de combustible son conocidas. Los modelos se

distribuyen de forma jerárquica a modo de árbol aplicándose una serie de condiciones (Hernández *et al.*, 2004).

El árbol comienza en el nodo raíz que representa a toda la población, continúa con las ramas que muestran los diferentes caminos que se puede emprender al cumplir una condición, es decir una variable predictora que permite la división de nodo raíz en dos nuevas hojas denominadas nodos hijos, estos a su vez se dividen usando la partición de una nueva variable. Este proceso se repite para los nuevos nodos hijos hasta llegar a un nodo terminal donde finaliza el procedimiento.

Existen diferentes algoritmos de crecimiento para los árboles de decisión, en este caso se utiliza los árboles de clasificación y regresión, CART por sus siglas en inglés (Classification And Regression Trees). Fue desarrollado por Breiman *et al.*, 1984 y se trata de un método de partición donde las divisiones se seleccionan de modo que “la impureza” de los hijos sea menor que la de la hoja madre y estas se encuentran definidas por un valor de una variable explicativa (Deconinck *et al.*, 2006). El grado en el que un nodo no representa un subconjunto homogéneo de casos es una indicación de impureza.

Por lo tanto, genera nodos que se subdividen cumpliendo una serie de reglas del tipo SI (condición) ENTONCES (asignación de clase), que se convierten en nodos terminales homogéneos que es donde finaliza el proceso y donde son capaces de predecir los modelos de combustible (Recio, 2010).

Mediante el SPSS, se convierte el árbol de decisión en una regla única mediante la herramienta *Generar reglas de clasificación* en formato de sintaxis de SPSS (.sps), que será asignada para el resto de los objetos.

#### 2.3.2.2.3. Predicción de los modelos de combustible en el resto de objetos

Una vez creado la regla de decisión, se procede a la estimación de los modelos de combustible en el resto de objetos presentes. La clasificación de un objeto se realiza mediante la aprobación de las condiciones que cumple según el valor de sus atributos en el conjunto de condiciones establecido en el árbol, desde el inicio hasta llegar al final del mismo cuando se le asigna una clase.

Una vez guardada la base de datos con la capa de segmentación, se procede a abrirla con el SPSS, donde se aplicara la regla de decisión. En este proceso se asigna al resto de objetos un tipo de modelos de combustible en función de las condiciones establecidas en el árbol de

decisión. El resultado es una tabla donde se ha asignado a cada objeto, un modelo de combustible.

Se obtiene una nueva base de datos con los modelos de combustible asignados a cada objeto, que se procede abrirla en ArcMap para observar los resultados.

### **2.3.3. Revisión y verificación de nodos**

En esta fase se lleva a cabo la revisión y posterior verificación de los nodos conflictivos del árbol de decisión. Las hojas o nodos terminales se encuentran formadas por una tabla de frecuencias que muestra el número de casos en frecuencia y porcentaje para cada categoría de los modelos de combustible. Existen nodos donde el número de casos se reparten en varias categorías y que por lo tanto, serán objeto de revisión y verificación. Este procedimiento se lleva a cabo mediante una serie de fases que poseen un orden cronológico y en el caso de que se verifiquen los nodos conflictivos en una de las fases no implica realizar la sucesiva.

### **2.3.4. Validación de la capa de modelos de combustible**

WildFire Analyst (WFA) es un software comercial de simulación de incendios, creado por Tecnosylva en 2011, que proporciona análisis en tiempo real de la progresión de los incendios forestales, el comportamiento del fuego y las capacidades de supresión y análisis de impacto durante un incidente.

Se realiza la validación de la capa de modelos de combustible mediante el software WildFire Analyst con el que se simulan y reproducen condiciones de quema reales correspondientes a momentos del pasado. De modo que sea posible verificar que mediante el uso de la capa de modelos de combustible generada y ante unas condiciones meteorológicas similares a las ocurridas en el momento de la quema, se produce un avance y evolución del comportamiento del fuego similar al sufrido en la realidad.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. ANÁLISIS ORIENTADO A OBJETOS

La metodología propuesta en el apartado 2.3.2.1 para el Análisis Orientado a Objetos se realiza para las imágenes SPOT 5 de Castilla – La Mancha, y en concreto para el área de estudio de este proyecto correspondiente a la provincia de Cuenca. El resultado de la segmentación es un conjunto de regiones denominadas objetos que cubren completamente la imagen (Figura 3).

El algoritmo de segmentación utilizado es el de multiresolución que ha dado buenos resultados en otros proyectos similares llevados a cabo por Tecnosylva (Ramírez *et al.*, 2011). Todos los píxeles de una región son similares con respecto a alguna característica incluida en el algoritmo de segmentación por multiresolución utilizado en este proyecto, es decir, escala, color y forma de las imágenes SPOT 5. Al mismo tiempo no resulta un problema que haya objetos contiguos que deban ser asignados con el mismo modelo.

Los clasificadores por objetos están diseñados para abordar la clasificación de paisajes heterogéneos y han mostrado su efectividad incrementando la precisión de las clasificaciones (Aplin *et al.*, 1999).

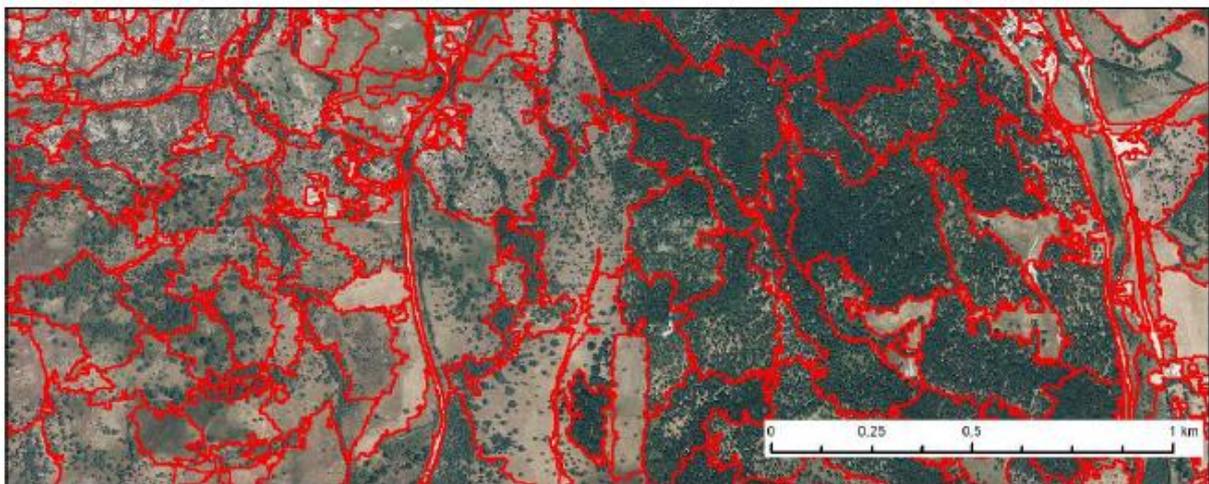


Figura 3. Resultado del proceso de segmentación realizado por Ramírez *et al.* (2011).

## 3.2. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

En este apartado correspondiente al 2.3.2.3 de la metodología, se consigue la estimación de los modelos de combustible a los objetos generados anteriormente. Para ello se utiliza la clasificación supervisada que parte de un conocimiento previo del terreno para realizar la asignación de los modelos de combustible.

### 3.2.1. Predicción de los modelos de combustible en el resto de objetos

Se utilizan los árboles de decisión como regla de clasificación. Este método de clasificación posee una variable dependiente, es decir, la variable que se quiere explicar correspondiente a los modelos de combustible y unas variables independientes, estas son, las explicativas que se tratan de los atributos de las áreas de entrenamiento (información radiométrica y otra información temática). El procedimiento de clasificación mediante SPSS excluye de forma automática cualquier variable de las seleccionadas cuya contribución al modelo final no sea significativa.

La aplicación de la regla de decisión genera una serie de resultados (SPSS, 2012):

- ✓ Tabla que proporciona información acerca del modelo.
- ✓ Diagrama del árbol.
- ✓ Las variables de predicción del modelo añadidas al conjunto de datos activo.

La Tabla del resumen del modelo se muestra la información general sobre las especificaciones utilizadas en la creación y resultado del modelo. Se encuentra la información sobre los valores de configuración utilizados para generar el modelo de árbol, incluidas las variables utilizadas en el análisis. La sección Resultados muestra información sobre el número de nodos totales y terminales, la profundidad del árbol (número de niveles por debajo del nodo raíz) y las variables independientes incluidas en el modelo final.

Otro resultado obtenido es el diagrama del árbol, que es una representación gráfica del modelo del árbol, en el que cada nodo contiene una tabla de frecuencias que muestra el número de casos en frecuencia y porcentaje para cada categoría de los modelos de combustible. El modelo predicho aparece resaltado en color gris y corresponde con el mayor valor de frecuencia en cada nodo.

Por último, se generan las variables de predicción del modelo, que son la matriz de clasificación y la tabla de riesgo, estas proporcionan una rápida evaluación de la bondad del funcionamiento del modelo.

En la matriz de clasificación o confusión se muestran los diferentes tipos de modelos de combustible, que corresponden a la variable dependiente y el número de casos clasificados correcta e incorrectamente para cada categoría de la variable dependiente.

La tabla de riesgo muestra la estimación del riesgo y su error típico que corresponden con una medida de la precisión predictiva del árbol. Para variables dependientes categóricas, como es el caso de los diferentes tipos de los modelos de combustible, la estimación de riesgo es la proporción de casos clasificados incorrectamente respecto a las probabilidades previas y los costes de clasificación errónea.

Se obtiene un porcentaje de acierto global en la matriz de confusión del 85%, este resultado es coherente con el que proporciona la matriz de riesgo, en la que se obtiene una estimación de riesgo de 0,15, es decir, que la categoría pronosticada por el modelo de clasificación es errónea para el 15% de los casos.

Este resultado puede ser considerado alto debido a la heterogeneidad de la zona de estudio. En comparación con otros estudios de cartografía de modelos de combustible, Riaño *et al.* (2002) alcanzó un porcentaje de acierto del 82% empleando datos multitemporales del Landsat-TM e información auxiliar. Recio (2010) logró un porcentaje de fiabilidad del 78% utilizando imágenes multiespectrales y otra información temática. Ramírez *et al.* (2013) obtuvo un porcentaje global del 85% contando con imágenes multiespectrales y datos LiDAR.

Los métodos no paramétricos no tienen en cuenta la naturaleza de los datos ya que no emplean parámetros estadísticos para calcular la separabilidad entre clases, este hecho hace que se utilice estos métodos en vez de los paramétricos que asumen que el conjunto de datos de una clase están distribuidos según una distribución normal que en este caso resulta erróneo debido a que se trata de un área compleja, en la que existen diferentes modelos de combustible con propiedades espectrales similares o viceversa. Además los métodos no paramétricos son especialmente adecuados para la incorporación de datos externos como son: la información radiométrica, NDVI, elevación, pendientes, orientaciones...etc, en el proceso de la clasificación (Recio, 2010).

### **3.3. REVISIÓN Y VERIFICACIÓN DE NODOS**

Este apartado corresponde a la revisión de los nodos conflictivos, en los que el número de casos de aparición se reparten en varias categorías de modelos de combustible. En la primera revisión se detectan 6 nodos conflictivos. Se observa que las categorías GS1 (Pastizal-matorral seco de carga baja), GS2 (Pastizal-matorral seco de carga moderada) y SH1 (Matorral de clima seco de carga baja) se corresponden con las que existen dificultades en su clasificación debido a que se encuentran con un cumplimiento similar de los criterios del árbol, es decir, unos porcentajes y frecuencias semejantes entre ellas.

Los problemas que presentan en la clasificación los tipos de modelos de combustible, son debidos a la heterogeneidad del paisaje, es decir, a la diferente respuesta espectral que presenta un tipo de modelo de combustible y a la dificultad de discriminar entre las diferentes alturas de pastizal - matorral.

### **3.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE COMBUSTIBLE ESTIMADOS**

Se ha estimado un total de 11 tipos de modelos de combustible establecidos por Scott y Burgan, (2005) distribuidos en 5 grandes grupos. A continuación se detallan las características de cada uno de ellos:

#### **1) Modelos incombustibles (Nonburnable - NB)**

##### **a. NB1: Zonas Urbanas Consolidadas**

Corresponden a superficies de tierra cubiertas por terrenos urbanos o suburbanos desarrollados. Para ser considerado NB1, el área no debe favorecer la propagación de un incendio forestal. En algunos casos, las zonas asignadas como NB1 pueden experimentar pérdidas estructurales durante un incendio forestal. Sin embargo, la estructura de ignición en algunos casos es otra, por lo que estos tipos de combustibles no están modelados a través de modelos de comportamiento del fuego, por lo que si existe algún tipo de vegetación suficientemente combustible alrededor de la estructura, de tal manera que la propagación de un incendio forestal sea posible, se deberá elegir un modelo de combustible apropiado para dicha vegetación silvestre en lugar de un modelo NB1.

Comportamiento del fuego: No existe una propagación del fuego.

**b. NB8: Zonas de aguas**

Superficies cubiertas por cuerpos de agua, tales como ríos y lagos.

Comportamiento del fuego esperado: No existe una propagación del fuego.

**c. NB9: Zonas de Suelos Desnudos**

Comprende zonas sin combustible suficiente para propagar un incendio forestal, estas áreas pueden incluir desiertos áridos con poca vegetación, dunas de arena, afloramientos rocosos, playas...etc.

Comportamiento esperado del fuego: No existe una propagación del fuego.

**2) Modelos de combustible de tipo pastizal (Grass - GR)**

**a. GR1: Pastizales secos bajos y poco densos**

El principal propagador del fuego son los pastizales poco densos, aunque pueden estar presentes pequeñas cantidades de combustible fino muerto. El pastizal es generalmente corto, ya sea, en forma natural o por el pastoreo, pudiendo ser escaso o discontinuo.

Posee una baja velocidad de propagación y longitud de llama comparado con otros modelos de combustibles GR.

**a. GR2: Pastizales secos de carga baja**

El principal portador del fuego en el modelo GR2 es el pastizal seco, aunque pueden existir pequeñas cantidades de combustible fino muerto. La carga de combustible por superficie es mayor que en el modelo GR1.

Pueden estar presentes algunos matorrales, pero no afecta el comportamiento del fuego.

**3) Modelos de combustible tipo pastizal-matorral (Grass-Shrub - GS)**

**a. GS1: Pastizal-matorral seco de carga baja**

El principal propagador del fuego en el modelo GS1 es la combinación de pastizal con matorral. El matorral tiene una altura de 30 cm., el pastizal tiene una carga de combustible por superficie baja. La velocidad de propagación es moderada; Longitud de llama baja. Humedad de extinción baja.

### **b. GS2: Pastizal-matorral seco de carga moderada**

El principal propagador del fuego en este modelo la combinación de pastizal con matorral. El matorral tiene un altura entre 30 cm. y 1 metro aproximadamente, la carga de combustible del pastizal es moderada. la velocidad de propagación del fuego es alta; la longitud de llama es moderada. humedad de extinción baja.

## **4) Modelos de combustible tipo Matorral (Shrub-SH)**

### **a. SH1: Matorral de clima seco de carga baja**

El principal propagador del fuego en el modelo SH1 es el matorral leñoso y restos de matorral presentes en la hojarasca. La carga de combustible por superficie del matorral es baja, el combustible en la hojarasca tienen una profundidad cercana a 30 cm., algunos pastos pueden estar presentes. La velocidad de propagación es muy baja al igual que la longitud de la llama.

### **b. SH4: Matorral-arbolado de clima húmedo de carga baja**

El principal propagador del fuego en el modelo SH4 es el matorral leñoso y los restos de matorral presentes en la hojarasca. La carga del combustible por superficie del matorral y la hojarasca presente va de baja a moderada, el combustible en la hojarasca tiene una profundidad cercana a 90 cm. La velocidad de propagación del fuego es alta; la longitud de la llama es moderada.

### **c. SH5: Matorral de clima seco de carga alta**

El principal propagador del fuego en el modelo SH5 es el matorral leñoso y los restos de matorral presentes en la hojarasca. La carga de combustible del matorral por superficie es alta, de profundidad de unos 1,2 a 1.8 metros. La velocidad de propagación del fuego es muy alta; longitud de llama muy alta. Humedad de extinción es alta.

## **5) Modelos de combustibles de Madera-Sotobosque (Timber-Understory - TU)**

### **a. TU5: Arbolado-Matorral de clima seco de carga muy alta**

El principal propagador del fuego en el modelo TU5 es una pesada carga de combustible de hojarasca de bosque con matorral o sotobosque de arboles pequeños. Velocidad de propagación moderada; longitud de llama moderada.

### **3.5. VALIDACIÓN DE LA CAPA DE MODELOS DE COMBUSTIBLE**

Una vez obtenida la capa de modelos de combustibles de alta resolución se procede a su integración en el WildFire Analyst, para ello, dentro del programa se debe asignar los tipos de modelos de combustible que contiene la capa, en este caso los desarrollados por Scott y Burgan (2005). De este modo se consideran en la simulación las características propias de cada modelo. Para realizar la simulación también es necesario convertir la capa vectorial a formato ráster, además de utilizar el Modelo Digital de Elevaciones obtenido a partir de los datos LiDAR.

Se procede a verificar la fiabilidad de los modelos de combustible estimados, para ello se reproducen situaciones con fuegos reales ocurridas con anterioridad, simulando el comportamiento de fuego en el terreno con unas condiciones meteorológicas similares a las sucedidas. Se comprueban que los resultados de la integración en el simulador se adaptan de una manera óptima a la realidad utilizando la capa de modelos de combustible generada en este proyecto, generándose un avance y evolución del fuego conforme al incendio sufrido.

Por lo tanto, mediante la metodología desarrollada en este trabajo se obtiene una información de los modelos de combustible de Cuenca, que resulta de especial interés en la predicción del comportamiento del fuego, el éxito de las tareas de extinción de los incendios forestales, la protección de los bienes amenazados, la comprobación de incendios reales o simulación de futuros incendios.

### **3.6. COMPARACIÓN DE LA CAPA DE MODELOS DE COMBUSTIBLE CON EL MAPA FORESTAL DE ESPAÑA 1:50.000**

La cartografía existente actual de modelos de combustible para Castilla – La Mancha deriva del Mapa Forestal de España 1:50.000, por lo que se realiza una comparación entre la capa de modelos de combustible generada en este trabajo para la provincia de Cuenca y la cartografía de modelos de combustible existente para dicha zona.

Las teselas presentes en el Mapa Forestal no poseen una homogeneidad en cuanto a modelos de combustible se refiere, la capa generada en este trabajo se realiza mediante una segmentación basada en el Análisis orientado a objetos análisis basado en la información de un conjunto de píxeles similares en la escala, color y forma (suavidad/compacidad).

La heterogeneidad presente en el Mapa Forestal es debida a la escala de trabajo utilizada que es de 1:50.000, que provoca la aparición de diferentes modelos de combustible en una tesela.

La capa de modelos de combustible se genera con objetos tan grandes como sea posible y tan detallados como sea necesario debido al algoritmo de segmentación por multiresolución empleado en el OBIA.

El Mapa Forestal no describe las características de comportamiento de los modelos de combustible frente al fuego, es decir, los modelos de combustible identificados en este estudio presentan diferentes características de comportamiento frente a un incendio forestal, como son: la carga de combustible, la velocidad de propagación, longitud de llama y humedad.

Así mismo, el Mapa Forestal 1:50.000 no se encuentra actualizado desde el año 2006 (MAGRAMA, 2016b), en cambio la capa de modelos de combustible producida se encuentra actualizada a fecha de 2014 correspondiente al mosaico de imágenes de SPOT 5.

La desactualización del Mapa Forestal conlleva que los objetos representados en la cartografía no coincidan con los existentes en la realidad lo que provoca unas consecuencias negativas en el análisis del comportamiento del fuego, así como en la evaluación del riesgo de incendio.

La metodología propuesta en este estudio ofrece una actualización de alta resolución de la cartografía de modelos de combustible presente en Castilla – La Mancha que implica una mejora en el conocimiento de las características de los combustibles presentes en el área de estudio, lo que resulta esencial para la predicción del comportamiento del fuego, y por lo tanto, para el éxito de las tareas de extinción de los incendios forestales, la protección de los bienes amenazados y la seguridad tanto de la población como de los bomberos forestales.

## 4. CONCLUSIONES

---

- Se ha realizado la segmentación a través del Análisis Orientado a Objetos, obteniéndose una capa continua de objetos homogéneos en una superficie aproximada de 17.141 km<sup>2</sup>.
- Se han obtenido reglas lógicas de clasificación mediante el árbol de decisión, que ha clasificado objetos por medio del análisis de los atributos de las áreas de entrenamiento cuyas clases de modelos de combustible son conocidas.
- Se han estimado los modelos de combustible mediante la clasificación supervisada utilizándose las reglas del árbol de decisión, obteniéndose un porcentaje de acierto global en la matriz de confusión del 85%, que puede ser considerado lo suficientemente alto dada la heterogeneidad de la zona de estudio.
- Se han detectado un total de 6 nodos conflictivos que se han revisado y verificado. Estos nodos presentan una frecuencia de aparición similar entre los tipos de modelos de combustible: GS1 (Pastizal-matorral seco de carga baja), GS2 (Pastizal-matorral seco de carga moderada) y SH1 (Matorral de clima seco de carga baja).
- Se reconocieron y describieron un total de 11 tipos de modelos de combustible distribuidos en 5 grandes grupos definidos por Scott y Burgan, (2005). Los modelos GR2, GS2, SH4 y TU son los que ocuparon una mayor extensión en la zona de estudio.
- Se ha verificado que la integración en el simulador de incendios WildFire Analyst de la capa de modelos de combustible producida, ha generado un comportamiento conforme en cuanto al avance y evolución del incendio sufrido en el pasado.
- La aplicación de la metodología ofrece una actualización de la base de datos cartográfica existente derivada del Mapa Forestal de España 1:50.000 mejorando la información ofrecida de los modelos de combustible, lo que representa una valiosa herramienta en la lucha contra los incendios forestales, así como en la seguridad de la población.
- Destaca la integración de la información disponible de distintas fuentes y en distintos formatos, en lugar del empleo único o fundamental de imágenes. La combinación de distintos tipos de información produce un sistema semiautomático capaz de interpretar el territorio con una fiabilidad alta y un grado de detalle elevado.

- La capa de modelos de combustible obtenida constituye la base para estudios de diversa índole, como estudios de prevención, evaluación del riesgo o extinción de incendios forestales, ya que toda la información y datos que se obtienen quedan almacenados en una base de datos espacial y de atributos disponible para posteriores operaciones de análisis.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

---

Albini, F. A. (1976). Estimating wildfire behavior and effects. USDA Forest Service, *Intermountain Forest and Range Experiment Station*.

Álvarez, M. A., & Marquínez, J. (2007). *Impacto de los incendios forestales en Asturias. Análisis de los últimos 30 años*. Oviedo: Krk Ediciones.

Aplin, P., Atkinson, P. M., & Curran, P. J. (1999). Fine spatial resolution simulated satellite sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom. *Remote Sensing of Environment*, 68, 206-216.

Arroyo, L. A., Healey, S. P., Cohen, W. B., Cocero, D., & Manzanera, J. A. (2006). Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111.

Berlanga-Silvente, V., Rubio-Hurtado, M. J., & Vilà-Baños, R. (2013). Com aplicar arbres de decisió en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 6, 65.

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65, 2-16.

Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., & Olshen, R. A. (1984). *Classification and regression trees*. CRC press.

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In 'Forest fire: control and use'. (K. P. Davis, Ed.) 61–89.

Castellano, G. C., Gutierrez, J. S., & Aleu, A. L. (2003). *Objet-oriented Analysis of Remote Sensing Images for Land Cover Mapping: Conceptual Foundations and a Segmentation Method to Derive a Baseline Partition for Classification*. Guillermo Castilla Castellano.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). *Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization*. John Wiley & Sons, Inc.

Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp.

Chuvieco, E. & Martín, M. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. (I. d. Geografía, Ed.) Madrid: CSIC.

Deconinck, E., Zhang, M. H., Coomans, D., & Vander Heyden, Y. (2006). Classification tree models for the prediction of blood-brain barrier passage of drugs. *Journal of chemical information and modeling*, 46, 1410-1419.

ESRI. (2016). *ArcGIS Resources*. Obtenido de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

González-Olabarria, J. R., Rodríguez, F., Fernández-Landa, A., & Mola-Yudego, B. (2012). Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *Forest Ecology and Management*, 282, 149-156.

Hernández, J., Ramírez, M. J. y Ferri, C. (2004). *Introducción a la minería de datos*. Madrid: Pearson Educación S.A.

ICONA. (1990). *Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible*. Madrid: Defensa contra incendios forestales.

Instituto Geográfico Nacional. (2010). *Plan Nacional de Teledetección*. Obtenido de Especificaciones Técnicas para Satélite SPOT 5: <https://blogpnt.files.wordpress.com/2009/06/especificaciones-tecnicas-pnt-altar-spot5-2010.pdf>

Instituto Geográfico Nacional. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de <https://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>

Kourtz, P. H. (1977). An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping. In *11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor*, 1111-1115.

López-Davalillo, L. (2014). *Geografía regional de España*. UNED.

MAGRAMA. (2016a). *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Obtenido de Sistema integrado de información del Agua: <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/descargas/capas.jsp>

MAGRAMA. (2016b). *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Obtenido de Mapa Forestal de España: <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx>

Marino, E., de Montes, D. I., Vega, P. R., Tomé, J. L., Noriega, M. Á., en Geografía, L., & Cooperativa, S. (2016). Cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal: metodología de bajo coste basada en datos LIDAR. *Foresta*, (65), 34-43.

Microsoft. (2016). *Office*. Obtenido de <https://products.office.com/es-cl/home>

Mutlu, M., Popescu, S. C., Stripling, C., & Spencer, T. (2008). Mapping surface fuel models using lidar and multispectral data fusion for fire behavior. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 274-285.

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. (2009). *PNOA*. Obtenido de Especificaciones Técnicas para vuelo fotogramétrico digital con vuelo LiDAR: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>

Prometheus, S. V. (2000). Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects. *System validation*.

Quilez, R. & Chinchilla, S. (2013). Modelos de combustible en la provincia de Valencia. *Congresos Forestales*.

Ramírez, J., Monedero, S., & Buckley, D. (2011). New approaches in fire simulations analysis with Wildfire Analyst. In *7th International Conference on Forest Fire Research*.

Ramírez, J., Blanco, J., Cerrillo, A., Marqués, G., Valcarce, R., & Llordén, J. M. (2013). Generación de cartografía de modelos de combustible a partir de datos LiDAR y análisis de imágenes orientado a objetos para su integración en Wildfire Analyst. In *Congresos-CARGA FINAL*.

Recio, J. A. (2010). *Técnicas de extracción de características y clasificación de imágenes orientada a objetos aplicadas a la actualización de bases de datos de ocupación del suelo* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.

Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 1301-1315.

Riaño, D., Meier, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E., & Ustin, S. L. (2003). Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(2), 177-186.

Rodríguez-Silva, F., & Molina, J. R. (2010). Manual Técnico para la Modelización de la Combustibilidad asociada a los Ecosistemas forestales Mediterráneos. *Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Córdoba. España*

Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, *Intermountain Forest and Range Experiment Station*.

Rothermel, R. C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 70.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation (p. 371). *Greenbelt, MD: NASA/GSFC (Type III, Final Report)*.

Salas, F. J., & Chuvieco, E. (1995). Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles. *Revista de Teledetección*, 18-28.

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 66.

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.

SPSS. (2012). Decision trees 21.IBM.

Trimble. (2016). *eCognition Essentials*. Obtenido de <http://www.ecognition.com/essentials>

U.S. Geological Survey. (2015). *USGS*. Obtenido de Landsat 8: <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>

Vega, J. A., Arellano, S., González, R., & Arellano, A. (2013). Nuevos modelos de combustibles forestales de Galicia. In *Congresos Forestales*.

Vélez, R. (1986). Incendios forestales y su relación con el medio rural. *Revista de estudios agrosociales*(136), 195-224.

Vélez, R. (2000). *La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias*. McGraw-Hill.

Viceconsejería de Medio Ambiente de Castilla - La Mancha. (2016). *Difusión de la Información Ambiental*. Obtenido de La red Natura 2000 en Castilla - La Mancha:  
[http://pagina.jccm.es/medioambiente/espacios\\_naturales/natura2000.htm](http://pagina.jccm.es/medioambiente/espacios_naturales/natura2000.htm)