

**28334 TRABAJO FIN DE GRADO**

**ESTIMACIÓN MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL CONTENIDO  
DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE FORESTAL (SECTOR  
CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO)**

***Autor: Mario Laín de Pedro***

***Profesor: Raquel Montorio Llovería***

**Grado en  
Geografía y Ordenación del Territorio**

**30 de Noviembre de 2015**



**Universidad  
Zaragoza**

**Departamento de Geografía  
y Ordenación del Territorio**





## Resumen

*La inflamabilidad y la combustibilidad de la vegetación son dos parámetros clave en la evaluación del riesgo de incendios. Los modelos de combustible del sector central del valle del Ebro constituyen, de este modo, el marco geográfico de este trabajo cuyo objetivo es establecer una relación empírica entre el comportamiento de reflectividad de la vegetación en el espectro óptico y el contenido de humedad. Un total de 56 muestras, correspondientes a diferentes especies mediterráneas (pino, encina, enebro, romero, coscoja, sisallo, sabina, retama, lastón, ontina y tomillo) han sido analizadas. De ellas se dispone de información sobre el contenido de humedad, medido con el Fuel Moisture Content (FMC), y mediciones hiperespectrales de reflectividad realizadas con espectro-radiometría de campo, sensibles a las longitudes de onda entre 400 y 2500 nm (desde el visible al infrarrojo medio de onda corta o SWIR). Los análisis realizados han permitido caracterizar el FMC de las distintas especies, estratos y modelos muestreados y han demostrado la existencia de correlaciones significativas entre ambas variables en la región del SWIR. La R de Pearson máxima ( $R=-0,56$ ) obtenida muestra claramente la relación inversa que existe entre estas dos variables. El modelo empírico desarrollado ha alcanzado un valor de ajuste bajo ( $R^2_{ajustado}$  de 0,444) pero significativo, lo que indica la fortaleza de las relaciones existentes. Además, se ha observado la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento medio del FMC entre los diferentes estratos y entre algunas especies vegetales, lo que permitirá el futuro desarrollo de modelos específicos que puedan ser utilizados para estimar con adecuada precisión el contenido de humedad usando imágenes de satélite.*

*Palabras-clave: riesgo de incendio, modelos de combustible, índice de humedad (FMC), espectro-radiometría de campo, infrarrojo medio de onda corta (SWIR).*

## Abstract

*The flammability and combustibility of vegetation are two key parameters in assessing the risk of fire. Fuel models of the central sector of the Ebro valley from the geographic scope of this dissertations which aims to establish an empirical relationship between the behavior of reflectivity of the vegetation in the optical and moisture content. A total of 56 samples corresponding to different Mediterranean species (pine, oak, juniper, rosemary, kermes, sisallo, juniper, broom, lastón, ontina and thyme) have been analyzed. Talking them into account, there are available information about the moisture content measured with the Fuel Moisture Content (FMC), and hyperspectral measurements of reflectivity performed with field spectrometry sensitive to wavelengths between 400 and 2500 nm (from the visible to the short-wave infrared or SWIR). The analyses allowed to characterize the FMC of the different species, and sampled strata models have demonstrated the existence of significant correlations between the two variables in the SWIR region. The maximum Pearson R ( $R = -0.56$ ) obtained clearly shows the inverse relationship between these two variables. The empirical model developed has reached a low value ( $R^2$  of 0.444) however significant, pointing out the strength of the relationship. In addition, there has been observed an existence of statistically significant differences in the average behavior of the FMC between different strata and among some plant species, enabling the future development of specific models that can be used to estimate with adequate precision the moisture content using satellite imagery.*

*Keywords: fire risk, fuel model, moisture index (FMC), field spectrometry, short-wave infrared (SWIR).*



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción .....	1
1.1. Los incendios forestales.....	1
1.1.1. Los incendios forestales en Aragón .....	2
1.2. El riesgo de incendios .....	4
1.2.1. La combustibilidad .....	4
1.2.2. La inflamabilidad .....	5
1.3. Aplicación de la teledetección en la evaluación del riesgo de incendios .....	6
1.3.1. Cartografía de modelos de combustible con técnicas de teledetección .....	6
1.3.2. Estimación del contenido de humedad basada en datos procedentes de teledetección .....	7
2. Contexto del proyecto, hipótesis y objetivos.....	8
3. Metodología .....	9
Fase 0. Trabajo de campo.....	9
Fase 1. Tratamiento de los datos.....	10
Fase 2. Análisis descriptivo.....	11
Fase 3. Análisis estadístico .....	12
4. Resultados .....	12
4.1. Descripción de las muestras objeto de análisis.....	12
4.2. Descripción del contenido de humedad (FMC) .....	14
4.3. Desarrollo del modelo empírico para estimar el FMC de la vegetación .....	18
5. Conclusiones .....	19
6. Bibliografía .....	20

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del número de siniestros en España en el periodo 1996-2015 .....	1
Figura 2. Evolución de la superficie forestal afectada por incendios en España en el periodo 1996-2015 .....	2
Figura 3. La evolución del número de incendios y de la superficie total quemada en la Comunidad Autónoma de Aragón en el periodo 1996-2015 .....	3
Figura 4. Gráfico izquierdo: causalidad de los incendios en Aragón. Gráfico derecho: detalle de la causalidad por negligencias en Aragón.....	3
Figura 5. La representación gráfica del modelo de combustible según el sistema <i>Prometheus</i> .....	5
Figura 6. Descripción de los modelos de combustible según el sistema <i>Prometheus</i> , con sus parámetros de carga de combustible, espesor del estrato combustible y humedad de extinción .....	5
Figura 7. Regiones del espectro electromagnético.....	7
Figura 8. Comportamiento espectral típico de la vegetación sana .....	7
Figura 9. Área de estudio .....	9

Figura 10. Promediado de espectros por especie vegetal y parcela: ejemplo de obtención de la firma espectral del pino en la parcela 54.....	11
Figura 11. Firmas espectrales de las especies del estrato arbóreo.....	16
Figura 12. Firmas espectrales de las especies del estrato arbustivo.....	16
Figura 13. Firmas espectrales de las especies del estrato herbáceo.....	16
Figura 14. Valores de correlación entre los valores de reflectividad y el índice FMC.....	18
Figura 15. Diferencias en los valores de FMC por modelos de combustible (izquierda), estratos (centro) y especies vegetales (derecha).....	19

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de jornadas en las que se desarrolló el trabajo de campo de espectro-radiometría y medición del contenido de humedad.....	10
Tabla 2. Tabla de los distintos modelos de combustible de la zona de estudio con el número de muestras que contienen.....	12
Tabla 3. Modelos de combustible (clasificación Prometheus) observados.....	13
Tabla 4. Tabla de especies de vegetación encontradas en la zona de estudio: identificación de su código, número de muestras, y estrato al que pertenecen.....	14
Tabla 5. Agrupación de especies por estratos.....	14
Tabla 6. Estadística descriptiva del FMC por modelos de combustible: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.....	15
Tabla 7. Estadística descriptiva del FMC por estratos: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.....	15
Tabla 8. Estadística descriptiva del FMC por especies vegetales: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.....	17

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. LOS INCENDIOS FORESTALES

El término incendios forestales se refiere a los fuegos no controlados, sean de origen natural o antrópico, que ocurren en los ecosistemas terrestres y que se propagan por la vegetación. Son un importante factor de transformación ambiental para una amplia variedad de ecosistemas mundiales (Shlisky *et al.*, 2007). Tienen tanto impactos globales, afectando por ejemplo al equilibrio mundial de gases de efecto invernadero, como regionales, relacionados con la degradación de los suelos, la pérdida de biodiversidad y daños a personas e infraestructuras (Chuvieco, 2010).

La gran mayoría de las sociedades relaciona los incendios forestales con desastres naturales, dominando una percepción negativa de los mismos. Sin embargo, los incendios forman parte de la naturaleza misma y han modelado la diversidad de nuestros ecosistemas durante millones de años. El fuego, al igual que otros procesos naturales, es un factor que se encuentra presente de manera natural en muchos ecosistemas y paisajes a lo largo del mundo y su presencia es vital para muchos ecosistemas. También puede generar diversos impactos negativos ecológicos y económicos así como amenazas para combatientes y personas que viven en el bosque.

Los incendios forestales constituyen uno de los principales agentes de perturbación de los ecosistemas del planeta. La elevada presión de las actividades humanas y el continuo calentamiento global provocará en el futuro un aumento de las condiciones meteorológica extremas y, por tanto, la frecuencia, la intensidad y tamaño de estos incendios, con importantes consecuencias tanto para las comunidades naturales como para la sociedad en su conjunto. Esto, unido al escenario actual de abandono de los montes, será letal para los bosques. Es por ello que el avance del conocimiento científico en la ecología del fuego se hace imprescindible para generar unos adecuados planes de gestión ambiental (Salas Rey, 1994).

España es uno de los países de la Unión Europea donde más incendios se producen cada año (Figura 1). Las causas son múltiples, aunque están íntimamente ligadas a las características climáticas del entorno Mediterráneo: escasez de precipitaciones y altas temperaturas que provocan una notable evapotranspiración y causan un estrés hídrico importante para la vegetación, sobre todo en los meses de verano (Chuvieco *et al.* 1998).

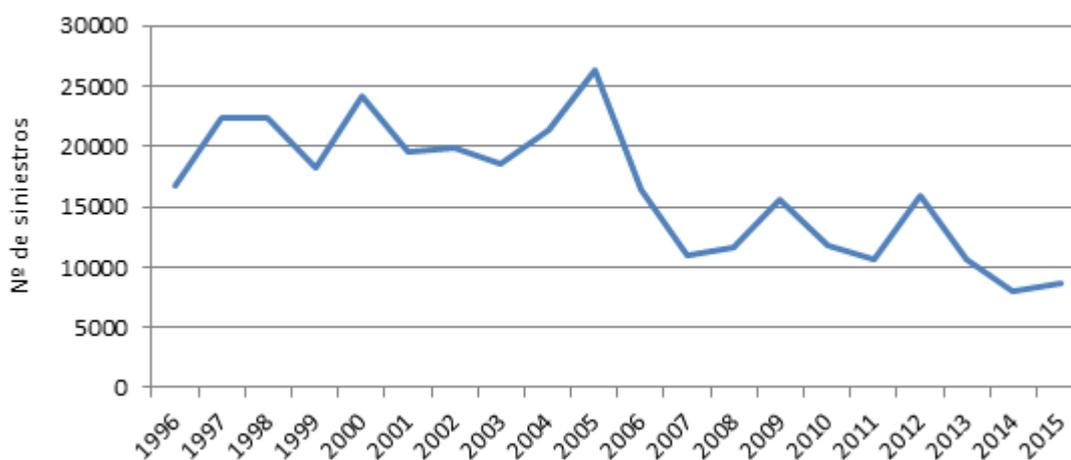


Figura 1. Evolución del número de siniestros en España en el periodo 1996-2015\*. Fuente: Instituto Aragonés de Estadística. \* Los datos de 2015 corresponden al periodo enero-agosto.

El gráfico de la Figura 1 muestra una reducción continuada del número de conatos e incendios desde finales del siglo pasado hasta la actualidad. A modo de ejemplo, en la última década los conatos se han reducido de 13.226 en 2005 a los 6.032 de 2015, y por otro lado los incendios han descendido desde los 7.602 de 2005 a los 2.551 de 2015.

A pesar de los avances producidos en las últimas décadas en la lucha contra los incendios, como ejemplo indicar que entre 2005 y 2014 ardió un 58% menos de superficie que hace dos décadas, los bosques mediterráneos se enfrentan a incendios cada vez más destructivos: cada gran incendio forestal quema un 20% más de hectáreas que en la década anterior. Así, pueden darse años con pocos incendios pero de grandes dimensiones, entonces la superficie quemada es muy superior a otros años con un mayor número de incendios pero de menores dimensiones (WWF España, 2015). Esto es lo que está ocurriendo en los últimos años en España, se ha reducido el número de incendios pero siguen quemándose un número de hectáreas muy importante debido a que los grandes incendios se dan con mayor facilidad. Un ejemplo claro de esta situación se observa en el análisis comparado de la Figura 1 y Figura 2 en los años 2005 y 2012. Mientras que 2012 no es un año que destaque por número de incendios, sí lo es por superficie quemada, demostrando la existencia de incendios de grandes dimensiones en esa fecha. La situación contraria se produce en 2005, donde se produce un pico máximo de número de incendios que no tiene un énfasis tan claro en el gráfico de superficie quemada.

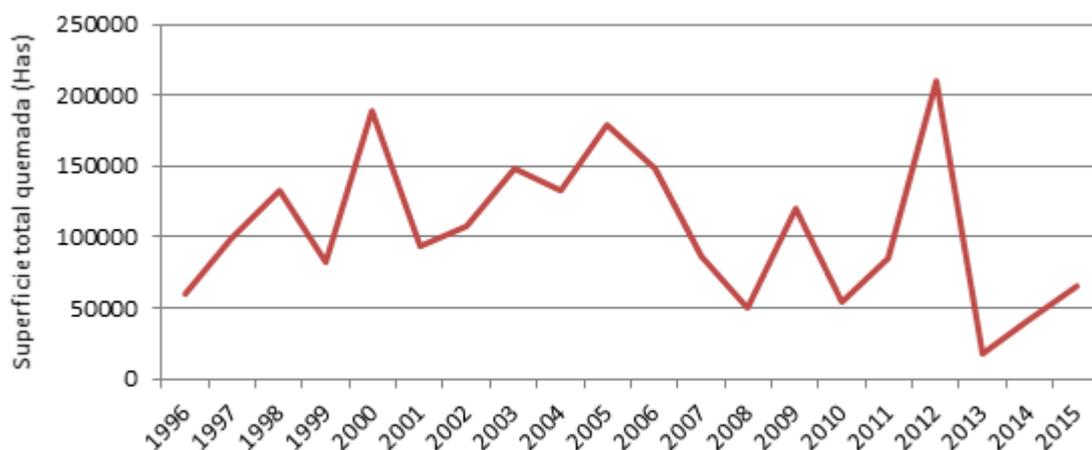


Figura 2. Evolución de la superficie forestal afectada por incendios en España en el periodo 1996-2015\*.  
\* Los datos de 2015 corresponden al periodo enero-agosto.

La acumulación de combustible asociada al abandono de los montes y el cambio climático son quizás los factores que auguran un escenario preocupante para los bosques españoles, que sufrirán grandes incendios forestales con cada vez más frecuencia e intensidad (WWF España, 2015).

### 1.1.1. Los incendios forestales en Aragón

En la Comunidad Autónoma de Aragón (Figura 3), se observa una distribución muy irregular del número de incendios y de superficie total quemada desde el inicio de la serie en el año 1996. Se observan algunos años, 2005 y 2012, con el mayor número de incendios, y años como 2009, que destaca por el elevado número de hectáreas quemadas. Se reproduce lo observado en España, con años como el 2009, en el que pocos incendios de grandes dimensiones han sido los responsables del mayor porcentaje de la superficie quemada.

Determinados factores climáticos, como una mayor evapotranspiración por ser años más calurosos o el déficit hídrico, condicionan estas estadísticas generales de número de incendios y superficie afectada pero, además de los factores naturales, hay que considerar la gran influencia del hombre sobre el medio. El origen de la gran mayoría de los incendios forestales se relaciona con acciones antrópicas, bien directas, cuando se provocan con fines especulativos o fruto de la acción de pirómanos, o bien indirectas, propagación del fuego producido por la quema de barbechos, líneas eléctricas, y prácticas recreativas en zonas de ocio que constituyen negligencias (Figura 4).

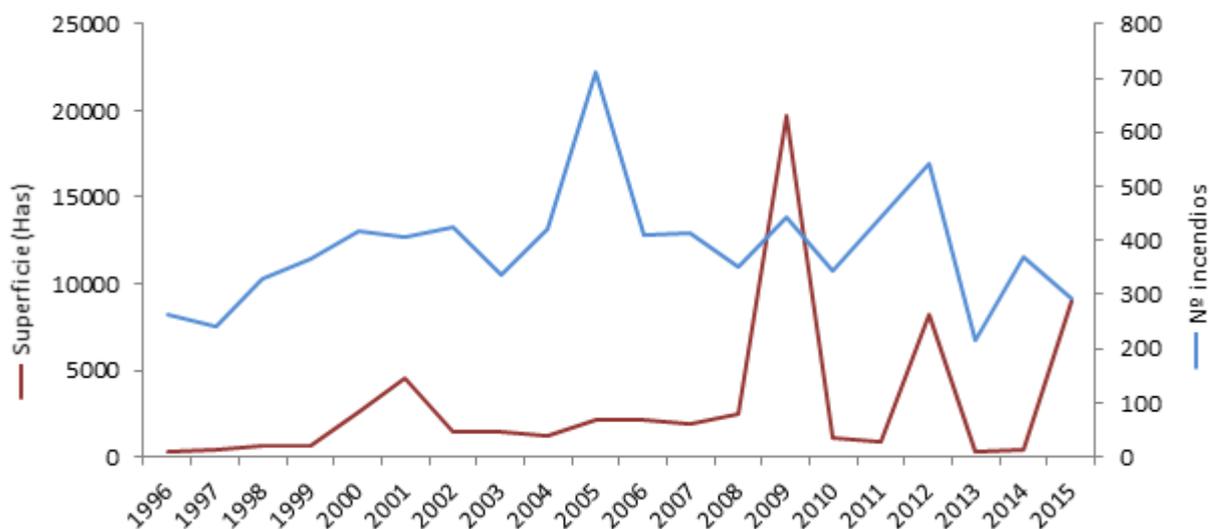


Figura 3. La evolución del número de incendios y de la superficie total quemada en la Comunidad Autónoma de Aragón en el periodo 1996-2015\*. \* Los datos de 2015 corresponden al periodo enero-agosto.

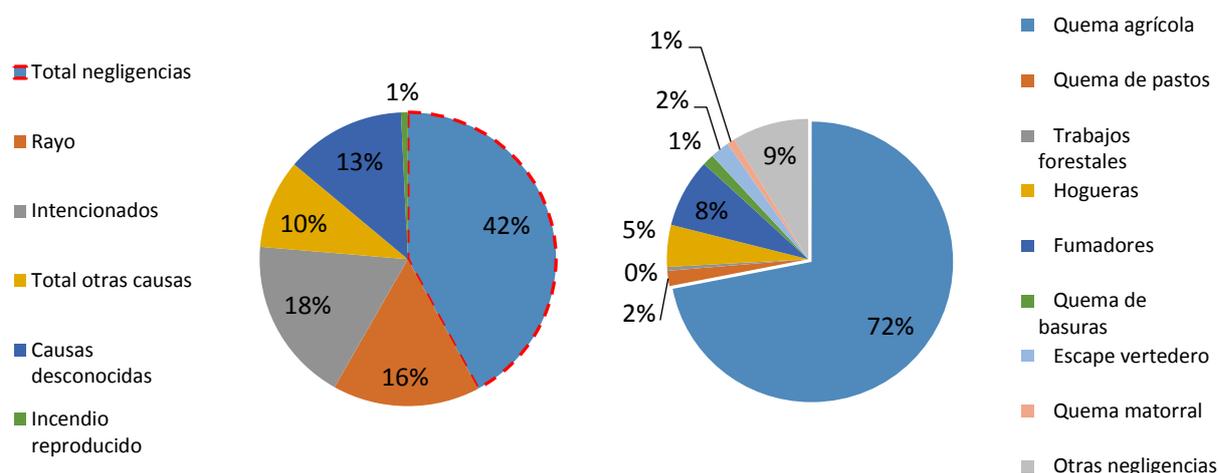


Figura 4. Gráfico izquierdo: causalidad de los incendios en Aragón. Gráfico derecho: detalle de la causalidad por negligencias (marcada con línea discontinua roja en el gráfico de la izquierda) en Aragón.

En cuanto a la causalidad de los incendios, como se aprecia en la Figura 4, destaca en Aragón el gran volumen de negligencias, con un 42% del total, seguido de los incendios intencionados, con un 18%, y los originados por rayos, con un 16%. Dentro del gran volumen de negligencias (Figura 4, gráfico derecho) destaca la quema agrícola con un 72% del total.

Se observa que las variables socio-económicas ayudan a explicar la incidencia de los incendios forestales. Además, influyen las variables climatológicas y se encuentran evidencias de que el abandono del monte provoca una mayor matorralización del mismo que afecta de forma considerable a la incidencia de incendios.

## 1.2. EL RIESGO DE INCENDIOS

Dentro de la gestión de los incendios forestales existen una serie de actividades que se realizan antes, durante y después de un incendio. En todas estas tareas de gestión, caracterizar la vegetación susceptible de arder cobra gran importancia. Así pues, las aportaciones de la geografía en el ámbito de los incendios forestales se pueden englobar desde tres perspectivas (Cocero *et al.*, 2004):

1. La cartografía de la ocurrencia de incendios que permite el establecimiento de zonas sensibles al fuego.
2. Análisis de los efectos en el paisaje y adopción de medidas para combatir la erosión y regenerar las zonas afectadas.
3. Determinar áreas de riesgo fruto de la interacción de factores ambientales y sociales y su distribución en el espacio, imprescindibles en la tarea de prevención. En esta perspectiva se engloba el presente trabajo.

Uno de los elementos principales para que un incendio se produzca es la presencia de combustible o, más específicamente, combustibles forestales: materia viva o muerta, resultante del desarrollo vegetativo de una determinada región que puede ser afectada por el fuego (Domingo Martín, 2009). En palabras de este autor, la cantidad, estructura, composición química, humedad y poder calorífico de los combustibles forestales determinan dos características básicas que influyen en la facilidad para que ocurra un incendio y se propague: (i) la combustibilidad, que se puede definir como la mayor o menor facilidad a la que arde un vegetal y (ii) la inflamabilidad, que depende inversamente del índice de contenido de humedad.

### 1.2.1. La combustibilidad

Una práctica habitual para determinar el riesgo de incendio es utilizar los llamados “modelos de combustible”. Esta metodología se basa en definir una serie de modelos de combustible, cada uno con un comportamiento asignado diferente ante el fuego (Domingo Martín, 2009). Cada modelo está caracterizado por una serie de parámetros cualitativos y/o cuantitativos que lo identifican y le confieren determinadas condiciones para la propagación de incendios (Blanco *et al.*, 2013). De este modo, a partir de su conocimiento se puede estimar el comportamiento más probable de un incendio en un lugar y en un momento dado.

Se han desarrollado multitud de clasificaciones de combustibles vegetales con distintos enfoques ya fuera la prevención del peligro o la simulación del comportamiento (Cocero *et al.*, 2004). Las diferentes tipologías llevan asociados características propias como serían la carga de biomasa, la composición o las humedades promedio.

Dos clasificaciones de modelos de combustible muy conocidas son la *Northern Forest Fire Laboratory system* (NFFL) propuesta por Albini (1976) para los Estados Unidos, que se basa en trece grupos de combustible, y la *Canadian Forest Fire Behavior Prediction system* (FBP) propuesta por Lawson *et al.*, (1985). En el marco del proyecto europeo *Prometheus* se adaptaron los 13 grupos del sistema NFFL a las características de la vegetación mediterránea, generándose siete modelos a partir de la ecuación de Rothermel (1972). A continuación se describen estos 7 modelos y se presenta una representación gráfica (Figura 5) y una descripción de sus principales parámetros (Figura 6):

- Modelo 1: pasto.
- Modelo 2: matorral (0,30-0,60m).
- Modelo 3: matorral (0,60-2 m).
- Modelo 4: matorral (2-4 m).
- Modelo 5: bosque sin combustible de superficie (sin arbustos ni herbáceas).
- Modelo 6: bosque con combustible de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles.
- Modelo 7: bosque con combustibles de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles.

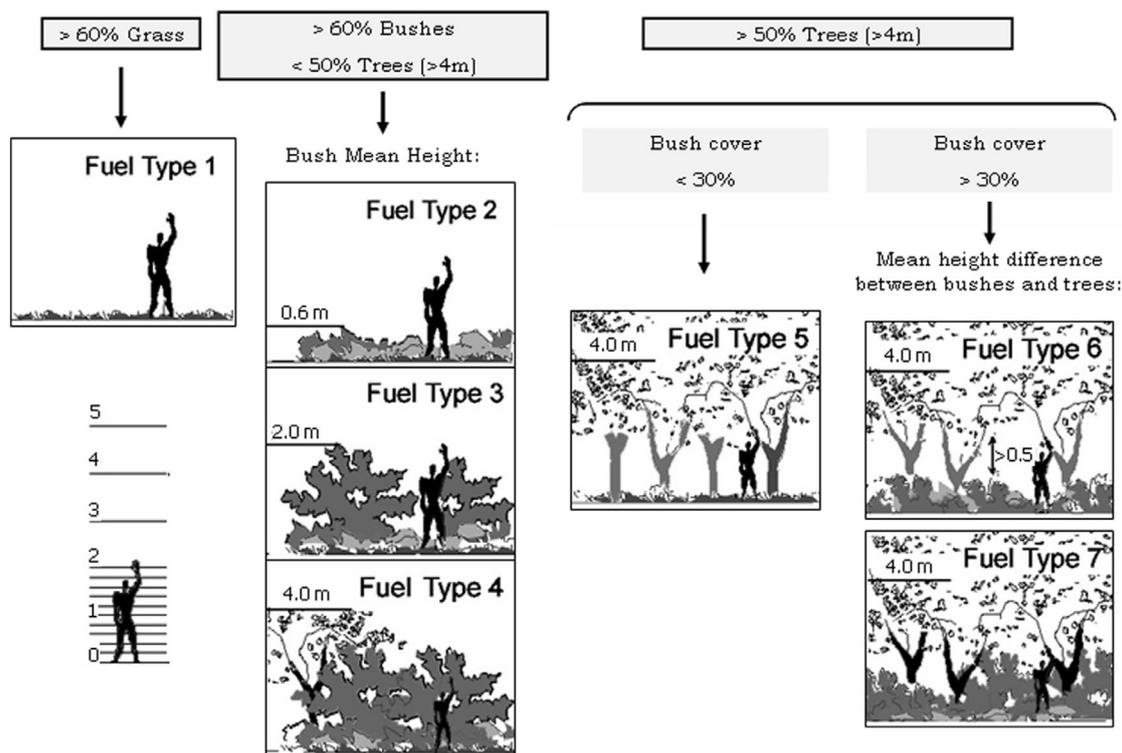


Figura 5. La representación gráfica del modelo de combustible según el sistema *Prometheus*. Imagen extraída de Arroyo *et al.* (2006).

Modelo	Carga combustible (kg/m <sup>2</sup> )				Espesor del estrato combustible (cm)	Humedad de extinción (%)
	1 h	10 h	100 h	Vivo		
1	0.166	0.000	0.000	0.000	30.48	30
2	0.225	0.112	0.000	0.449	60.96	30
3	0.360	0.070	0.000	1.350	107.16	30
4	1.123	0.898	0.449	1.123	182.88	30
5	0.740	0.100	0.020	0.000	5.69	30
6	0.449	0.225	0.112	0.112	30.48	30
7	0.540	0.110	0.030	0.720	100.55	30

Figura 6. Descripción de los modelos de combustible según el sistema *Prometheus*, con sus parámetros de carga de combustible, espesor del estrato combustible y humedad de extinción. Imagen extraída de Cocero *et al.* (2004).

Hay que considerar que estos modelos son importantes para elaborar sistemas de simulacro de propagación de incendios, y en las labores de extinción, porque permiten determinar cómo se desarrollará, pero no ayuda a determinar cuándo, cuestión de gran importancia en la gestión (Domingo Martín, 2009).

### 1.2.2. La inflamabilidad

La humedad del combustible es considerado el factor más significativo en el proceso de ignición del combustible (Domingo Martín, 2009). Hasta que éste no desciende hasta niveles mínimos no se da lugar a la posibilidad de llegar al punto de inflamación. Se trata en este caso de una variable del riesgo de incendio que se suele calcular a corto plazo, incluso de manera diaria, ya que depende de factores ambientales, principalmente climático, que influyen en el contenido de agua de las plantas como son, por ejemplo, la humedad del aire o el viento.

El FMC (*Fuel Moisture Content*) es uno de los índices más extendidos para aplicaciones a incendios forestales. Como indica (Chuvieco, 2010) su utilización se ha adoptado en numerosos proyectos nacionales

e internacionales, y ha sido incluido en los programas más extendidos que modelan la ignición y el comportamiento del fuego. El Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá dispone, por ejemplo, de una base de datos de medidas del FMC creada específicamente para la evaluación del riesgo de incendio en España (accesible en [http://www.geogra.uah.es/emilio/FMC\\_UAH.html](http://www.geogra.uah.es/emilio/FMC_UAH.html)).

El FMC de las plantas vivas está relacionado principalmente con su actividad fisiológica y con la humedad del suelo y de la atmósfera, tanto la actual como la precedente (Cocero *et al.*, 2004). La aproximación más habitual a su estimación es a partir de la medición del FMC de las hojas, uno de los parámetros más críticos en la propagación del fuego al ser uno de los indicadores más sensibles del estado del agua en la vegetación (Vaughan, 2001).

### **1.3. APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS**

La observación de la Tierra desde el espacio ha experimentado en los últimos años un vertiginoso desarrollo, llegando a ser un aliado cada vez más imprescindible en el seguimiento de distintos procesos ambientales de gran impacto en nuestro país, como son los incendios forestales (Chuvieco, 2010). El papel de la teledetección en la determinación de condiciones de riesgo de incendios puede enfocarse hacia (i) la propagación del fuego, mediante el análisis las propiedades estructurales del combustible y el establecimiento de los modelos de combustible y (ii) la generación de variables críticas para estimar la ignición, principalmente la determinación de las condiciones hídricas del combustible.

#### **1.3.1. Cartografía de modelos de combustible con técnicas de teledetección**

Frente a la identificación y cartografía de modelos a partir de fotografía aérea y trabajo de campo, con resultados muy precisos pero altamente costosos en tiempo y dinero, la teledetección ofrece muchas posibilidades de cartografiar los modelos de combustible con buenos resultados y a una escala regional. Cocero *et al.* (2004) ofrece en su capítulo del libro “Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales, Chuvieco, E. y Martín Isabel, M.P. (Eds)” una detallada revisión de las distintas aproximaciones de la teledetección a este problema, que se resumen a continuación.

Los sensores ópticos multiespectrales han sido tradicionalmente los más empleados para la cartografía de modelos de combustible. De entre ellos, destaca sin duda el satélite Landsat (sensores MSS, TM y ETM+) que, frente a otros sensores como el NOAA-AVHRR o el SPOT-HRV, ha sido empleado para este objetivo por su alta resolución espacial (MSS con 79 m y TM y ETM+ con 30 m), su buena resolución espectral (con bandas desde el visible hasta el infrarrojo medio de onda corta) y su fácil accesibilidad ya que se dispone de información sistemática de casi toda la superficie terrestre. Más recientemente, los sensores hiperespectrales aerotransportados como el AVIRIS, con cientos de bandas espectrales, también se utilizan para hacer cartografía de modelos de combustible. El aspecto a destacar de esta técnica sería la posibilidad de obtener una detallada discriminación de las especies vegetales que componen los diferentes modelos, aspecto importante por ser indicativo de la morfología de los combustibles.

La tecnología radar, con sensores activos como el ERSI-SAR, ha sido utilizada de forma complementaria a los sensores ópticos, proporcionando una cuantificación de la cantidad de biomasa y ayudando así, a la discriminación entre modelos de combustible.

Cuando el objetivo de los estudios es identificar aspectos más específicos como el cerramiento de las copas, la altura de la vegetación, la altura a la base de la copa o la densidad de la copa, los resultados que se alcanzan con estas tecnologías de sensores ópticos o radar no alcanzan precisiones muy altas. En este contexto, son los sensores activos LiDAR los que permiten estimar distintos parámetros forestales con los mejores resultados, con precisiones de hasta 5-15 cm<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> La tecnología LiDAR es precisamente la que el grupo GEOFOREST del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza está aplicando en el proyecto UZCUD2014-HUM-01, que da contexto a este trabajo, para la caracterización de los modelos de combustible del sector central del valle del Ebro.

### 1.3.2. Estimación del contenido de humedad basada en datos procedentes de teledetección

En palabras de Cocero *et al.* (2004) la base para estimar el contenido de humedad de las plantas a partir de teledetección radica en demostrar que el agua introduce efectos suficientemente grandes en la reflectividad de la planta como para ser detectados mediante teledetección. A este respecto, es importante definir el concepto de reflectividad como la ratio entre la energía reflejada y la energía incidente en las distintas longitudes de onda (Chuvieco, 2010) y describir cuál es el comportamiento típico de la vegetación sana en las distintas regiones del espectro óptico, aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar (Figura 7 y 8).

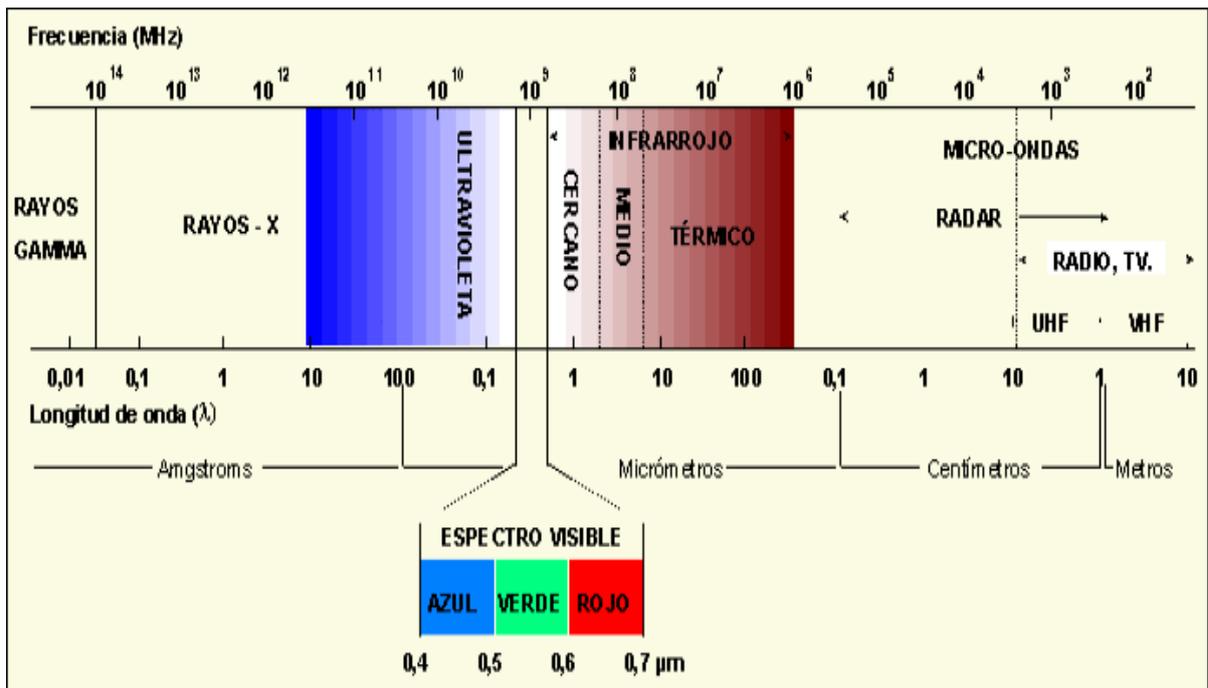


Figura 7. Regiones del espectro electromagnético. Imagen tomada de Chuvieco (2010).

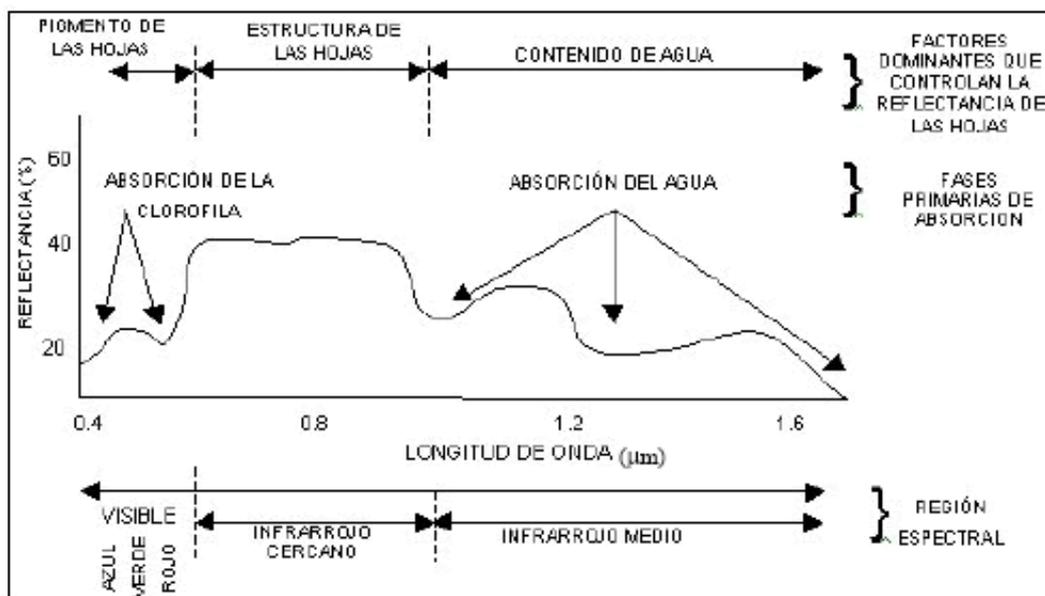


Figura 8. Comportamiento espectral típico de la vegetación sana. Imagen tomada de Arango *et al.* (2005).

- Espectro visible (0,4 a 0,7 micras): las hojas absorben la mayor parte de la energía incidente en las bandas del visible. La baja reflectividad en el azul y el rojo se atribuye normalmente a la absorción de los pigmentos de las hojas. La clorofila, carotenos y xantofilas absorben radiación a 0,445 micras, pero sólo la clorofila absorbe en el rojo en torno a 0,645 micras. El máximo relativo en el verde se produce por una carencia relativa de absorción por estos pigmentos, lo que proporciona el color verde de las plantas que percibe nuestra vista.
- Infrarrojo próximo o cercano (IRC) (0,7 a 1,3 micras): la alta reflectividad de la vegetación en esta banda del espectro se asocia al estado de vigor de la planta, su porcentaje de cobertura verde y su buen estado foliar. Cuanto mejor es la estructura celular interna de la planta, mayor es la reflectividad en esta región del espectro.
- Infrarrojo medio de onda corta (*short-wave infrared*, SWIR) (1,3 a 2,5 micras): en esta región es unánime la observación de una relación inversa entre el contenido de agua y la reflectividad. La respuesta de la vegetación en estas longitudes de onda está dominada por la fuerte absorción del agua, que se produce principalmente en 1,4, 1,9 y 2,4 micras. En esta región, los picos de reflectividad de la vegetación se originan aproximadamente a 1,6 y 2,2 micras, justo entre las bandas de absorción del agua.

Considerando este comportamiento espectral típico, queda patente que la observación de la región del SWIR resulta de gran interés para conocer el estado del vigor de la hoja en función de su contenido de humedad (Chuvienco, 2010). No obstante, cambios en el contenido de humedad también tienen su reflejo en las otras regiones del espectro ya que el deterioro hídrico de la planta implica una pérdida de vigor vegetal, que se traduce en un descenso de la reflectividad en el IRC, y una pérdida de funcionalidad de la clorofila, que se traduce en un aumento de la reflectividad en el rojo. En consecuencia, aumenta la reflectividad en el SWIR y disminuye el contraste espectral entre rojo e IRC.

Los resultados más claros, obtenidos en su mayor parte con medidas espectrales de laboratorio, han mostrado que el contenido hídrico de la vegetación está más claramente relacionado con la reflectividad en el infrarrojo medio (Cohen, 1991; Hunt *et al.*, 1987; Ripple, 1986).

Los diversos estudios orientados a estimar la humedad de la vegetación con imágenes de satélite no son tan abundantes, debido a que las mediciones en campo del contenido de agua de las especies son complejas y costosas y los cambios en la reflectividad pueden ser explicados por factores externos como la influencia atmosférica o factores topográficos. La mayoría de estos estudios se han basado en modelos empíricos desarrollados a partir de imágenes del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo del satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Chuvienco *et al.*, 2004; García *et al.*, 2008) y del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo de la plataforma Terra (Stow *et al.*, 2006; Jurdao *et al.*, 2013). El trabajo de Yebra *et al.* (2013) recoge una revisión global de los resultados alcanzados, manifestando la complejidad de estas estimaciones y la necesidad de seguir profundizando en estos estudios.

## 2. CONTEXTO DEL PROYECTO, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El trabajo se inserta plenamente dentro de una de las líneas principales de investigación del grupo GEOFOREST (Procesos GEOambientales en espacios FORESTales) del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza: el estudio de las superficies forestales incendiadas o en riesgo de incendio mediante técnicas de teledetección y trabajo de campo.

Concretamente, este trabajo se desarrolla en el marco de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Zaragoza y el CUD, denominado “Caracterización espectral de la vegetación mediterránea para la estimación de parámetros biofísicos” (UZCUD2014-HUM-01). Este proyecto tiene como objetivo principal el *análisis de las relaciones entre el comportamiento espectral de la vegetación y determinados parámetros biofísicos de gran interés desde la perspectiva de los incendios forestales, por su relación con la combustibilidad de la vegetación*. De manera general, el proyecto que da marco a este trabajo contribuirá a la mejor caracterización de los modelos de combustible del sector central de la Depresión del Ebro.

De forma específica, este trabajo se centra en uno de los parámetros biofísicos más relevantes para la evaluación del riesgo de incendios: el contenido de agua. De esta forma, el presente trabajo se sustenta en la siguiente hipótesis: *es posible establecer relaciones consistentes entre el comportamiento reflectivo de la vegetación en el espectro óptico y el contenido de agua de la misma*; y persigue alcanzar dos objetivos específicos:

1. Caracterizar los modelos de combustible existentes en la zona de estudio a partir de los valores medidos/estimados del contenido de humedad.
2. Establecer relaciones empíricas entre la medición experimental del contenido de agua en campo y la reflectividad medida con espectro-radiometría de campo.

### 3. METODOLOGÍA

#### FASE 0. TRABAJO DE CAMPO

Durante el verano de 2014 los miembros del proyecto coordinado UZCUD2014-HUM-01 llevaron a cabo el trabajo de campo, durante el que se obtuvo la información de partida de este trabajo. A continuación se describen los aspectos más importantes de esta fase en los aspectos relacionados directamente con este trabajo.

El área de estudio son 24 parcelas situadas en el Centro Nacional de Adiestramiento (CENAD) San Gregorio (Figura 9), cuya vegetación puede considerarse en gran medida característica del sector central de la Depresión del Ebro y del ecosistema mediterráneo. Estas parcelas fueron seleccionadas previamente en el laboratorio y localizadas en campo con un equipo GPS-GNSS de precisión centimétrica (GS15 de Leica). Las fechas en las que se llevó a cabo el trabajo de campo fueron los días 16, 18, 21, 23, 25 y 30 de julio; 1 y 6 de agosto y 1 y 3 de septiembre del año 2014. El equipo de trabajo del proyecto UZ-CUD en su visita a estas parcelas realizó una clasificación de las mismas según el modelo de combustible *Prometheus*.

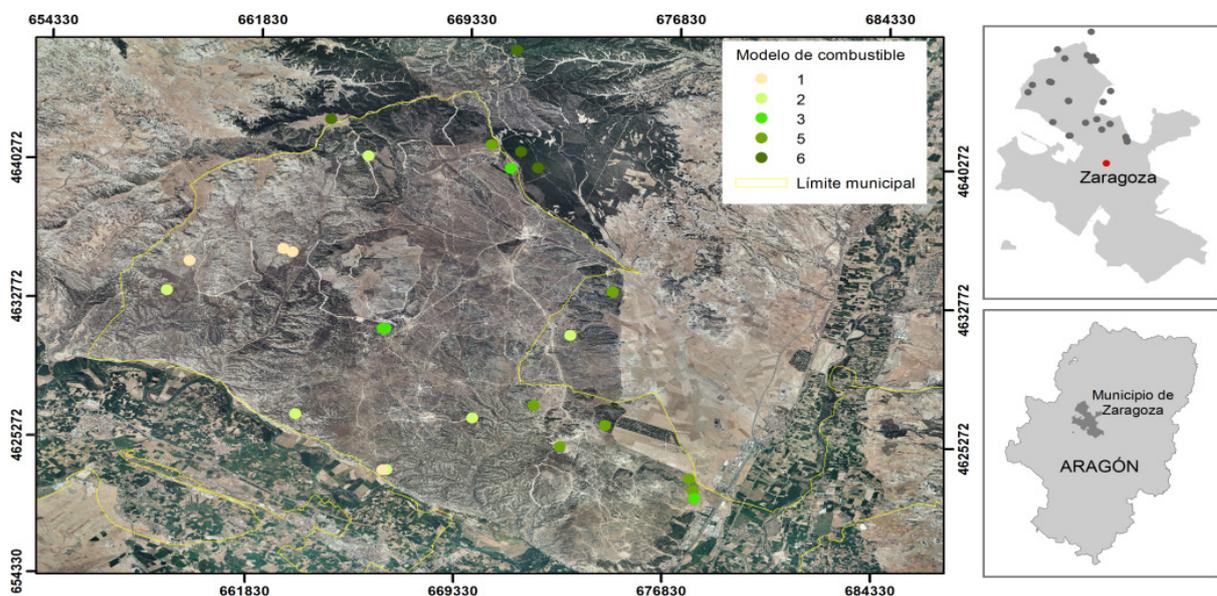


Figura 9. Área de estudio.

En cada una de las 24 parcelas muestreadas en las 10 jornadas de campo se aplicaron dos técnicas de campo (Tabla 1):

- Método gravimétrico para la obtención de la humedad del combustible vivo. Este método consiste en la recolección y pesado de las muestras en húmedo para su posterior traslado al laboratorio. Se recogió una muestra por cada especie vegetal presente en las parcelas, un total de 56 muestras de humedad.
- Espectro-radiometría de campo para registrar la reflectividad de las principales especies de vegetación. Estas mediciones se realizaron con el equipamiento disponible en el laboratorio de Espectro-Radiometría y Teledetección Ambiental (ERTAlab) de la Universidad de Zaragoza: espectro-radiómetro de campo ASD FieldSpec SR4, que mide en el continuo espectral entre 400-2500 nm con una elevada resolución espectral, y panel de referencia Spectralon. Como establecen los protocolos oficiales de espectro-radiometría de campo, todas estas medidas de reflectividad se realizaron en días despejados y en las horas centrales, para asegurar unas perfectas condiciones de iluminación. Se realizaron un total de 330 mediciones espectrales, porque para cada especie vegetal se tomaron entre cinco y diez medidas de reflectividad diferentes con el objetivo de recoger toda la variabilidad espacial.

Tabla 1. Relación de jornadas en las que se desarrolló el trabajo de campo de espectro-radiometría y medición del contenido de humedad.

<i>Fecha</i>	<i>Muestras de humedad</i>	<i>Mediciones de espectro-radiometría</i>
16/07/2014	5	25
18/07/2014	9	45
21/07/2014	10	50
25/07/2014	9	45
30/07/2014	7	40
01/08/2014	4	35
06/08/2014	1	15
01/09/2014	9	55
03/09/2014	2	20
Total	56	330

## FASE 1. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

El tratamiento inicial de los datos, primera fase metodológica de este trabajo, se divide en dos partes, una por cada variable recogida en campo.

### 1. Estimación del contenido de humedad

En el tratamiento inicial de los datos se obtiene el parámetro del contenido de agua con el índice *Fuel Moisture Content* (FMC), de cada una de las especies en sus determinadas parcelas mediante los datos de Peso en húmedo (gr) y Peso en Seco (gr). Para el cálculo de este índice se utiliza la siguiente fórmula:

$$FMC (\%) = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100$$

donde  $P_H$  es el peso en húmedo (gr.) y  $P_S$  es el peso en seco (gr.).

El peso en seco deriva del pesado con una báscula de las muestras después de ser sometidas a un proceso de secado en estufa durante 48 horas a 60°C.

## 2. Tratamiento de los datos espectrales

El siguiente paso en el tratamiento de los datos iniciales del proyecto, consistió en calcular las medias de reflectividad en cada una de las longitudes de onda de las diferentes especies en las respectivas parcelas de estudio. Este paso es necesario porque el número de muestras de humedad y de muestras de reflectividad no coincide. En campo se obtuvo un dato de humedad para todo el pinar de una parcela, por ejemplo, y en cambio se tomaron entre 5-10 muestras de reflectividad. Para poder relacionar las dos informaciones, es necesario generar una firma espectral global para el pinar de toda la parcela, y esto se consigue con el promediado de las firmas individuales de cada muestra (Figura 10).

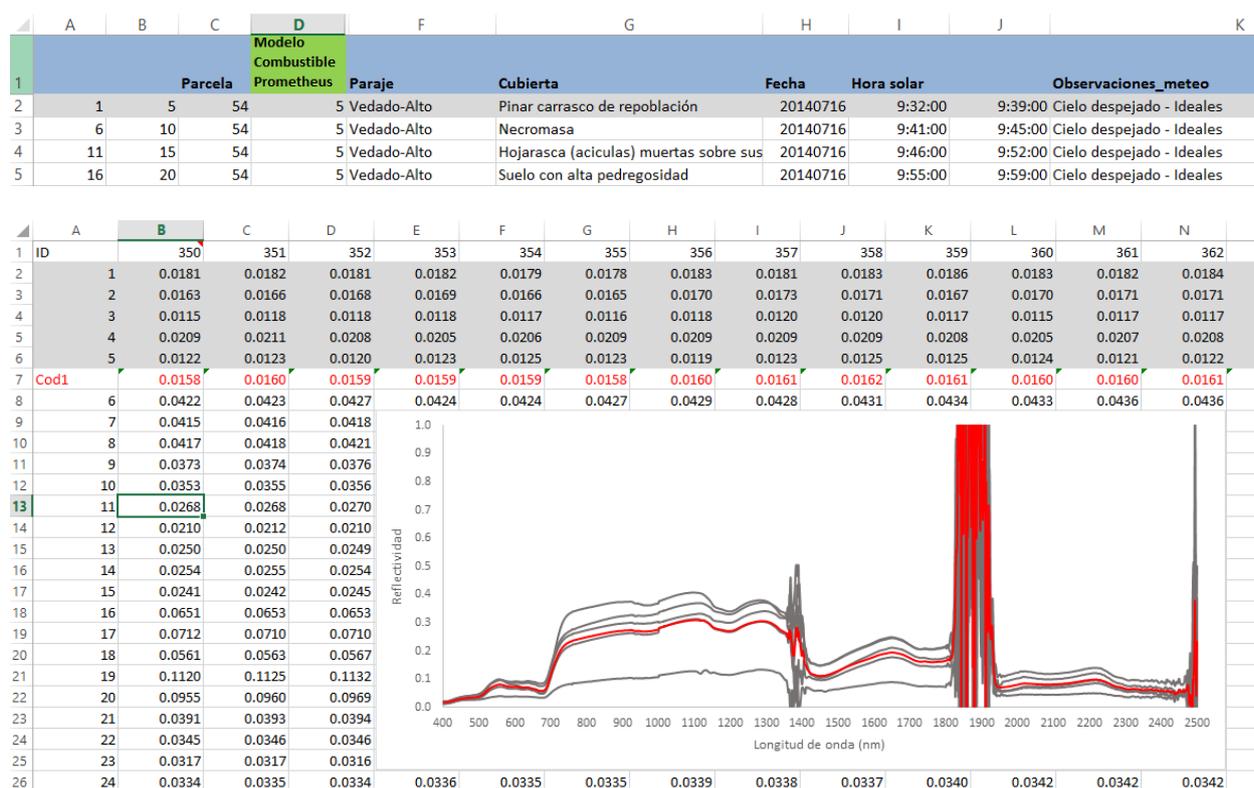


Figura 10. Promediado de espectros por especie vegetal y parcela: ejemplo de obtención de la firma espectral del pino en la parcela 54.

El resultado final es de 56 firmas espectrales de reflectividad que corresponden a las distintas especies en las distintas parcelas. Con ella se ha podido elaborar una base de datos en la que para cada muestra de las 56 (a la que se ha asignado un código único) se tiene la especie a la que corresponde, el modelo de combustible de Prometheus, el valor del FMC y los valores de reflectividad promedio en todas las longitudes de onda.

De esta base de datos se ha eliminado para los posteriores análisis toda la información de los rangos entre 1350-1400 nm y 1800-1950 nm. Estos rangos se han eliminado debido a la presencia de ruido en los datos (ver ejemplo de gráfico en la Figura 10) por efecto de la absorción atmosférica.

### FASE 2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO

En esta fase se ha realizado un análisis descriptivo de:

- Las firmas espectrales de cada una de las especies vegetales analizadas. Para ello, a partir de las firmas promedio individuales por parcela se han obtenido firmas promedio globales por especie. En este análisis descriptivo se ha analizado el comportamiento espectral de las especies en las distintas regiones del espectro.

- El contenido de humedad (índice FMC). El análisis se basa en los estadísticos descriptivos de media, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo. Este análisis se ha realizado a 3 niveles:
  - o Por especies vegetales individuales.
  - o Por estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo.
  - o Por modelos de combustible.

Con este análisis se da cumplimiento del objetivo específico 1.

### FASE 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico más avanzado está relacionado con el objetivo específico 2: establecer relaciones entre el FMC y las medidas de reflectividad. Para ello, primero se ha analizado la correlación entre estas dos variables para obtener una medida de la fuerza de la relación entre ellas con el índice R de Pearson.

A continuación se ha hecho un análisis de regresión lineal de pasos sucesivos para obtener una ecuación para estimar la humedad del combustible (porcentaje de FMC) a partir de los valores de reflectividad. Este análisis se ha hecho con toda la muestra y su resultado se valora a través del estadístico del coeficiente de determinación  $R^2_{ajustado}$ .

Por último, para intentar profundizar en modelos específicos por especies, estratos o modelos de combustible, se ha analizado con ANOVA y gráficos de barras de error la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre el FMC de estos grupos de casos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBJETO DE ANÁLISIS

Las 56 muestras analizadas corresponden a 5 modelos de combustible del sistema de clasificación Prometheus. La tabla 2 recoge los modelos identificados y las muestras que contienen. La tabla 3 recoge una descripción y muestra una fotografía representativa tomada en el CENAD San Gregorio. El resumen sería que 8 muestras corresponden al modelo herbáceo (1), 20 muestras a modelos con predominio arbustivo (2 y 3) y 28 muestras a los modelos con predominio de árboles (5 y 6).

Tabla 2. Tabla de los distintos modelos de combustible de la zona de estudio con el número de muestras que contienen.

<i>Modelo</i>	<i>Nº muestras</i>
1	8
2	12
3	8
5	22
6	6

Tabla 3. Modelos de combustible (clasificación Prometheus) observados.

<p>MODELO 1: El tipo uno está formado por una cobertura herbácea que debe ser superior al 50 % del combustible de la tierra. Esta categoría comprende los pastizales, la vegetación agrícola y la herbácea.</p> 	<p>MODELO 5: El tipo cinco está formado por una cobertura de arbustos o matorral inferior al 30 % y una cobertura arbustiva superior al 50% son áreas forestales sin sotobosque. Incluye áreas donde el combustible del suelo fue removido, ya sea por la quema prescrita o por medios mecánicos.</p> 
<p>MODELO 2: El tipo dos está formado por una cobertura de arbustos o matorral, debe de ser superior al 60% y la cobertura arbórea inferior al 50% son combustibles superficiales. Esta categoría comprende los pastizales, arbustos bajos (30-60 cm) y un alto porcentaje (30-40%) de las especies herbáceas.</p> 	<p>MODELO 6: El tipo seis está formado por una cobertura de arbusto o matorral superior al 30 %, y una cobertura arbustiva superior al 50%. Con una distancia entre la base del dosel y la capa de combustible superficial superior a 0,5 m son unas áreas forestales con un sotobosque medio. El combustible de superficie está constituido esencialmente por pequeños arbustos, hierba, hojarasca y mantillo.</p> 
<p>MODELO 3: El tipo tres está formado por una cobertura de arbustos o matorrales que debe ser superior al 60% y mientras que la cobertura arbórea inferior al 50 % son arbustos de mediana altura. Se compone de arbustos de tamaño medio y grande desde 0,6 cm hasta 2.0 m, así como los árboles jóvenes resultantes de la regeneración natural.</p> 	

En total se han recogido en el Centro nacional de Adiestramiento de San Gregorio un total de once especies de vegetación diferentes, a las que se ha asignado un código específico (Tabla 4): pino (*Pinus halepensis*), encina (*Quercus ilex*), enebro (*Juniperus communis*), romero (*Romasrinus officinalis*), coscoja (*Quercus coccifera*), sisallo (*Salsola vermiculata*), sabina (*Juniperus sabina*), retama (*Retama sphaerocarpa*), ontina (*Santolina chamaecyparissus*), lastón (*Brachypodium retusum*) y tomillo (*Thymus vulgaris*). Estas especies se han agrupado en tres estratos: arbóreo (3), arbustivo (2) y herbáceo (1) (Tabla 5). Tal como muestra esta última tabla, el mayor porcentaje de muestras se sitúa en el estrato arbustivo, especialmente por la importancia del romero, con una gran distribución espacial en la zona de estudio y en el ecosistema mediterráneo.

Tabla 4. Tabla de especies de vegetación encontradas en la zona de estudio: identificación de su código, número de muestras, y estrato al que pertenecen.

<i>Especie vegetal</i>	<i>COD_esp</i>	<i>Nº muestras</i>	<i>Estrato</i>
Pino	1	12	3
Ontina	2	4	1
Lastón	3	8	1
Enebro	4	5	2
Romero	5	12	2
Coscoja	6	3	2
Tomillo	7	2	1
Encina	8	5	3
Sisallo	9	2	2
Sabina	10	2	2
Retama	11	1	2

Tabla 5. Agrupación de especies por estratos.

<i>Estrato</i>	<i>Especies vegetales</i>	<i>Nº muestras</i>
3   Arbóreo	Pino y encina	17
2   Arbustivo y subarbustivo	Enebro, romero, coscoja, sisallo, sabina y retama	25
1   Herbáceo	Ontina, tomillo y lastón	14

#### 4.2. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD (FMC).

En la descripción del contenido de humedad, tomado a partir del índice Fuel Moisture Content (FMC) se han elaborado análisis a tres niveles: por modelos de combustible, por estrato y por especie vegetal.

##### - Por modelos de combustible

En los datos finales sobre el contenido de humedad por modelos de combustible (Tabla 6), se aprecia un aumento constante del contenido de humedad desde el modelo 1 al 6, a excepción del modelo dos que disminuye. Por encima de la media (FMC del 56%) sólo se sitúan los modelos 5 y 6, a causa de la cobertura arbórea que es superior al cincuenta por ciento en estos dos modelos, y esta cobertura es la que más contenido de agua retiene en sus estructuras vegetales, por eso se registran los valores más altos.

Tabla 6. Estadística descriptiva del FMC por modelos de combustible: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.

<i>Modelo</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. típ.</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>N</i>
1	53,515	28,051	93,880	23,145	8
2	41,311	21,913	71,817	9,181	12
3	54,858	21,324	88,204	22,237	8
5	62,666	19,082	98,130	24,403	22
6	68,713	13,800	91,424	52,626	6
Total	56,315	22,223	98,130	9,181	56

**- Por estrato**

En las siguientes figuras 11, 12 y 13 se muestran las firmas espectrales en valores de reflectividad promedio de cada una de las especies agrupadas en función del estrato. Los rangos sin dato (1350-1400 nm y 1800-1950 nm) responden al problema de ruido ya comentado. La tabla 7 resumen los descriptivos del FMC para estos tres estratos.

Tabla 7. Estadística descriptiva del FMC por estratos: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.

<i>Estrato</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. típ.</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>N</i>
1	32,993	20,991	78,018	9,181	14
2	55,213	16,518	93,880	26,626	25
3	74,529	13,743	98,130	52,626	17
Total	56,315	22,223	98,130	9,181	56

Los datos muestran un crecimiento progresivo de la humedad desde el estrato 1, el herbáceo, hasta el 3, el arbóreo. Un resultado que está en la línea de lo observado en el apartado anterior por modelos de combustible (crecimiento de la humedad del modelo 1 al modelo 6).

En los gráficos de reflectividad, la región que hay que analizar más en detalle es la del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) entre 1300-2500 nm. El contraste más claro visualmente se produce entre el estrato herbáceo y arbóreo. Las especies del estrato herbáceo tienen claramente valores de reflectividad más elevados y valores más elevados en esta región se asocian con la menor presencia de agua en las plantas.

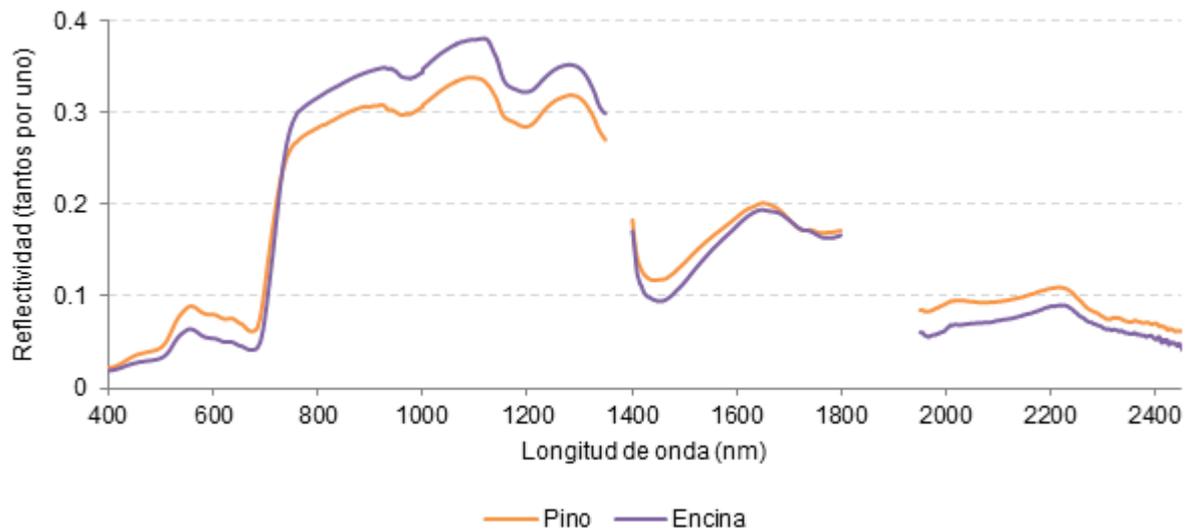


Figura 11. Firmas espectrales de las especies del estrato arbóreo.

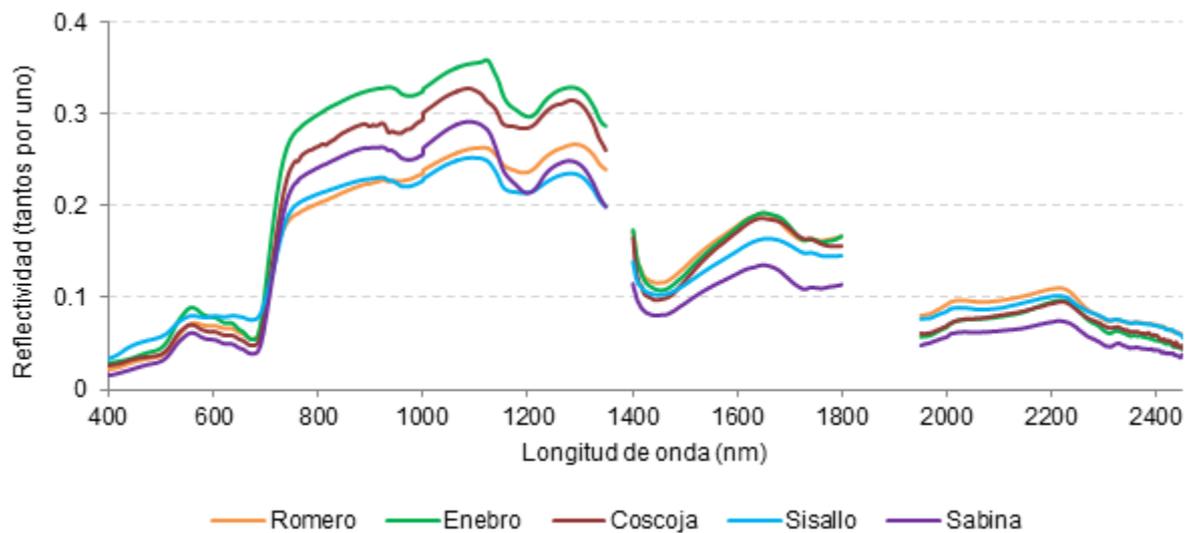


Figura 12. Firmas espectrales de las especies del estrato arbustivo.

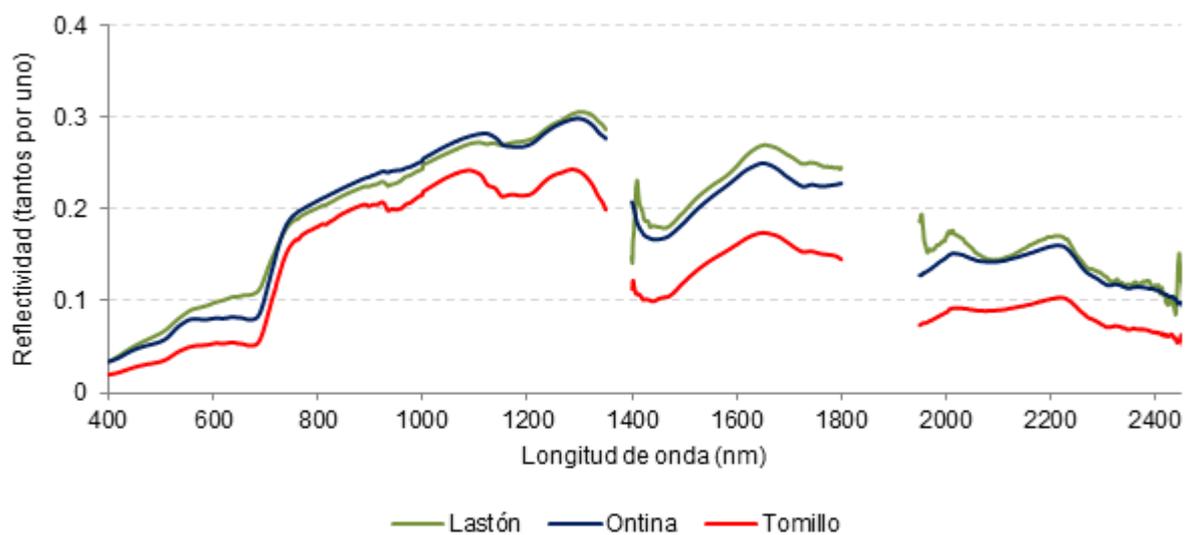


Figura 13. Firmas espectrales de las especies del estrato herbáceo.

- **Por especie**

Este análisis por especies constituye el nivel más desagregado y de más detalle. La tabla 8 recoge los resultados por FMC, que reflejan una gran variabilidad desde valores promedio por encima del 80% como el pino o el sisallo a valores por debajo del 40% como el tomillo o el lastón.

Tabla 8. Estadística descriptiva del FMC por especies vegetales: media, desviación típica, máximo, mínimo y número de muestras.

<i>COD_esp</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. típ.</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>N</i>
1 Pino	80,857	10,705	98,130	67,172	12
2 Ontina	54,237	23,753	78,018	24,290	4
3 Lastón	22,371	7,985	35,109	9,181	8
4 Enebro	56,749	11,579	66,875	38,436	5
5 Romero	51,073	17,335	83,051	26,626	12
6 Coscoja	54,431	4,216	57,217	49,580	3
7 Tomillo	40,945	10,826	48,601	33,290	2
8 Encina	59,344	5,655	68,077	52,626	5
9 Sisallo	82,848	15,600	93,880	71,817	2
10 Sabina	53,412	15,683	64,502	42,322	2
11 Retama	76,423	.	76,423	76,423	1
Total	56,315	22,223	98,130	9,181	56

Las gráficas de las figuras 11, 12 y 13 detallan la firma espectral de todas las especies vegetales. De forma mayoritaria, todas las especies arbóreas y arbustivas reproducen el comportamiento típico de la vegetación vigorosa. Así, muestran una reducida reflectividad en las bandas del visible, con un máximo relativo en la porción del verde en torno a los 550 nm. Esta baja reflectividad en la porción del espectro visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, (clorofilas, xantofilas y carotenos); todos estos pigmentos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 445 nm y una segunda banda de absorción en torno a los 645 nm. En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, se debe principalmente a la estructura interna de la hoja. Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, en claro contraste con el espectro visible especialmente en la banda del rojo. A partir de 1400 nm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce considerablemente en el infrarrojo medio, especialmente en las grandes regiones de absorción centradas en 1450 nm y 1900 nm.

El sisallo, dentro del estrato arbustivo, y, sobre todo, las especies del estrato herbáceo (ontina, lastón y tomillo), tienen un comportamiento espectral algo distinto. Hay dos diferencias importantes. La primera se produce en el el rojo, con valores más elevados de reflectividad debido a la pérdida de absorción de la clorofila. La distancia entre el rojo y el infrarrojo cercano se reduce en estas especies. La segunda diferencia se produce en el SWIR, con valores de reflectividad más altos asociados a la pérdida de absorción del agua.

El lastón es una de las especies que, visualmente, mejor refleja la relación entre el contenido de humedad y la reflectividad en la banda del infrarrojo medio SWIR. El lastón tiene valores en contenido de humedad entre el 35% y el 9% dando una media de 22%; se puede comprobar con los datos de la Tabla 8 que es el valor de humedad más bajo de todas las especies. Esto corresponde a lo que muestran los gráficos, ya que esta especie es la que tiene los valores de reflectividad más altos en el SWIR de todas las analizadas.

### 4.3. DESARROLLO DEL MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMAR EL FMC DE LA VEGETACIÓN

Para el desarrollo del modelo se ha llevado a cabo un análisis de correlación entre el contenido de humedad y los valores de reflectividad en el continuo espectral de longitudes de onda para el total de 56 muestras.

En este análisis de correlación se han obtenido unos valores de R de Pearson que se representan en el gráfico de la Figura 14 que se muestra a continuación, que refleja la relación existente entre la reflectividad en cada banda del espectro y el contenido de humedad. Los mayores valores de correlación se registran en el SWIR a partir de los 1400 nm con valores de R de Pearson máxima de -0,56, con una R de signo negativo que indica una relación inversa entre las dos variables: a medida que el contenido de humedad de la vegetación aumenta, la capacidad de absorción de energía también aumenta, y por lo tanto, menor es la reflectividad en ese rango.

El rango espectral del infrarrojo cercano (NIR) sería el segundo en importancia, entre las longitudes de onda 750-950 nm aproximadamente con una R máxima de 0,48. En el caso del NIR la relación existente es de signo positivo indicando que cuanto más alto sea el nivel de humedad en la especie, mejor será la estructura interna de la vegetación, por lo cual, mayor es la reflectividad en este rango espectral.

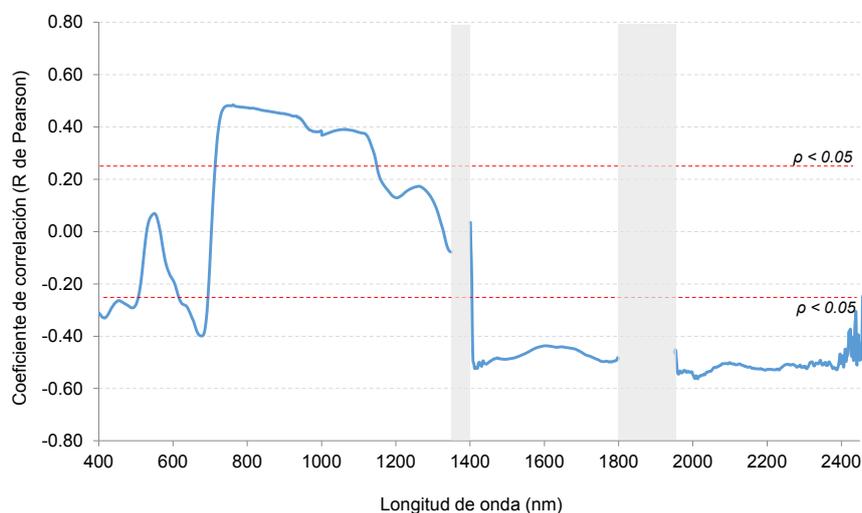


Figura 14. Valores de correlación entre los valores de reflectividad y el índice FMC. Las líneas rojas discontinuas marcan el nivel de significación estadística y los intervalos sombreados en gris corresponden a los rangos espectrales excluidos del análisis por problemas de ruido.

Justificada finalmente la existencia de correlación entre ambas variables se procedió a aplicar un método de análisis de regresión lineal por pasos sucesivos empleando como variable dependiente a estimar el FMC y como variables independientes todas las bandas espectrales del rango 400-2500 nm. El resultado de este análisis ofrece el siguiente modelo con un  $R^2_{ajustado}$  de 0,444 y un error de 16,578.

$$FMC (\%) = 57,073 - (372,625 \times R_{2013nm}) + (559,152 \times R_{534nm})$$

donde  $R_{2013nm}$  y  $R_{534nm}$  refiere al valor de reflectividad en esas dos longitudes de onda.

Aunque el valor de estimación ( $R^2_{ajustado}$ ) no es elevado (por debajo del 50%), es importante señalar que las bandas espectrales seleccionadas son significativas al nivel  $p < 0.05$ . Indicar en este aspecto que si obtuviéramos un número de muestras mayor se alcanzarían resultados más precisos. El parámetro de la significatividad de las variables anima a continuar con el estudio en esta línea de trabajo.

El desarrollo de modelos específicos por modelos de combustible, estratos o especies vegetales no se ha desarrollado debido al reducido número de muestras. No obstante, sí se ha estudiado mediante análisis

ANOVA el comportamiento de la humedad entre estas diferentes tipologías para orientar futuros análisis en profundidad. En la figura 15 se muestran los gráficos de barras de error que representan el intervalo de confianza al 95% para la media del FMC por modelo combustible, estratos y especies. Los resultados son:

- Por modelos de combustible el análisis ANOVA indica la ausencia de diferencias estadísticamente significativas (Sig. = 0.067). El gráfico de barras de error también lo señala, ya que todas las categorías solapan.
- Por estratos las diferencias son significativas (Sig. = 0.000) entre los tres estratos.
- Por tipo de especie el análisis ofrece diferencias estadísticamente significativas sólo entre algunas de ellas. Como refleja el gráfico de la figura 15 (derecha), realizado sólo con las especies para las que se dispone un número superior a cuatro muestras, el pino (cod=1) y el lastón (cod=3) tienen un comportamiento claramente contrastado respecto a las restantes especies, por lo que podrían ser objeto de un análisis para la obtención de ecuaciones específicas.

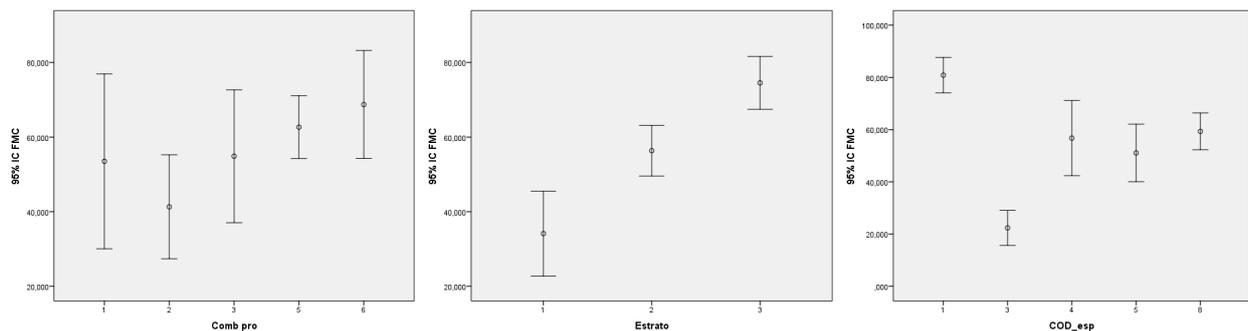


Figura 15. Diferencias en los valores de FMC por modelos de combustible (izquierda), estratos (centro) y especies vegetales (derecha).

## 5. CONCLUSIONES

El primer aspecto a destacar en este apartado de conclusiones es que se ha contrastado la hipótesis de partida y se han cumplido los objetivos planteados. El trabajo ha demostrado la existencia de relación entre el comportamiento espectral de la vegetación y el contenido de agua. Más específicamente, se ha establecido un modelo empírico para estimar el índice de humedad FMC a partir de información de reflectividad procedente, principalmente, de la región del infrarrojo medio de onda corta o SWIR, la región destacada por la bibliografía especializada como la más sensible al contenido de agua de la vegetación (ver referencias en apartado 1.3.2).

La relación empírica establecida no alcanza el 50% de ajuste pero es consistente, todas las bandas incluidas en el modelo son significativas al nivel  $p < 0,005$ . Así pues, aunque el nivel de cumplimiento del objetivo no ha alcanzado un valor muy alto, los resultados apuntan en la buena dirección. En este sentido, se plantean nuevas vías de trabajo futuro que irían en la línea de ampliar el número de muestras para poder desarrollar modelos globales y específicos con una mayor precisión. Los esfuerzos no irían orientados hacia modelos específicos por modelos de combustible, porque no se han observado diferencias en el contenido de FMC entre ellos, pero sí hacia modelos por estratos, donde sí hay diferencias. De cara al papel de los modelos de combustible como elemento explicativo del riesgo de incendio, las estimaciones por estratos permitirían derivar el FMC global de los modelos ya que el porcentaje de cada estrato en cada uno de los modelos de combustible es una variable conocida.

La estimación del FMC por especies de vegetación podría abordarse para especies específicas ya que entre algunas, como el pino y el lastón, se han observado comportamientos de humedad muy contrastados y específicos.

Desde el punto de vista metodológico, hay que indicar que la información proporcionada por la espectroradiometría de campo ha resultado muy valiosa para establecer modelos empíricos a escala de detalle, siendo ésta una de las principales aplicaciones de esta técnica. Este diseño experimental ha demostrado el potencial de la reflectividad para estimar el contenido de humedad del combustible, una variable

fundamental en los estudios del riesgo de incendio. En el futuro deberá abordarse el siguiente paso, el traslado de la ecuación empírica desarrollada en campo a las imágenes de satélite que proporcionan una perspectiva regional.

## AGRADECIMIENTOS

A los miembros del proyecto “Caracterización espectral de la vegetación mediterránea para la estimación de parámetros biofísicos” (UZCUD2014-HUM-01) por proporcionarme los datos con los que poder desarrollar este trabajo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Albini, Frank A. 1976. *Estimating wildfire behavior and effects*. USDA Forest Service. General Technical Report INT-30. Intermountain forest and range experiment station. U.S. Department of Agriculture. Ogden. Utah.
- Arango Gutiérrez, M., Branch Bedoya, J.W. y Botero Fernández, V. 2005. Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat-ETM+. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*: 58-1. Medellín.
- Arroyo, L.A., Healey, S.P., Cohen, W.B., Cocero, D. y Manzanera, J.A. 2006. Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research*, 111, G04S04.
- Blanco, J., Ramírez, J., Cerrillo, A., Marqués, G., Valcarce, R. y 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*. 6º Congreso Forestal Español: Montes, Servicios y desarrollo rural. 10-14 junio 2013. Vitoria-Gasteiz.
- Cocero, D., Riaño, D., Meza, E. y Chuvieco, E. 2004. *Cartografía del tipo y estado de los combustibles*. En Chuvieco, E. y Martín Isabel, M.P. (Eds.): Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. ISBN: 978-84-00-08275-8. 190 p.
- Cohen, W. B. 1991. Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1865-1876.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, M. P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J., *et al.* 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92, 322–331.
- Chuvieco, 2010. *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*
- Domingo Martín, S. 2009. La física de un índice predictivo de riesgo de incendios forestales. Universidad de Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. ISBN: 978-8478002658.
- García, M., Chuvieco, E., Nieto, H., y Aguado, I. 2008. Combining AVHRR and meteorological data for estimating live fuel moisture content. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3618–3627.
- Hunt, E. R., Rock, B. N. y Nobel, P. S. 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22: 429-435.
- Jurdao, S., Yebra, M., Guerschman, J. P., y Chuvieco, E. 2013. Regional estimation of woodland moisture content by inverting Radiative Transfer Models. *Remote Sensing of Environment*, 132, 59–70.
- Lawson, B. D., Stocks, B. J., Alexander, M. E. y Van Wagner, C. E. 1985. *A system for predicting fire in Canadian forests*. 8th Conference on Fire and Forest Meteorology, Detroit, Michigan.
- Ripple, W. J. 1986. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52: 1669-1675.
- Rothermel, R.C. 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 pp.
- Salas Rey, F.J. 1994. *Detección de áreas de riesgo de incendio forestal a partir de los SIG y la Teledetección*. Tesis doctoral dirigida por Emilio Chuvieco Salinero.

- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., Alvarado, E., Ainuddin Nuruddin, A., Rodríguez-Trejo, D. A., Swaty, R., Schmidt, D., Kaufmann, M., Myers, R., Alencar, A., Kearns, F., Johnson, D., Smith, J., Zollner, D., y Fulks, W. 2007. *El fuego, los ecosistemas y la gente: Amenazas y estrategias para la conservación global de la biodiversidad*. En Informe técnico de la Iniciativa Global para el Manejo del Fuego 2007-2. The Nature Conservancy, Arlington, VA.
- Stow, D., Madhura, N., y Kaiser, J. 2006. Time series of chaparral live fuel moisture maps derived from MODIS satellite data. *International Journal of Wildland Fire*, 15, 347–360.
- Vaughan, P. 2001. *Estimación de contenido de humedad de la vegetación mediante espectroradiometría*. Trabajo de investigación tutelado. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.
- Yebra, M., Dennison, P.E., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Raymond Hunt Jr., E., Mark Danson, F., Qi, Y. y Jurdao, S. 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, 136, 455-468.
- WWF España. 2015. *Incendios en España. Bosques listos para arder*.