
ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA VEGETACIÓN USANDO IMÁGENES DE SATÉLITE E ÍNDICES METEOROLÓGICOS DE PELIGRO DE INCENDIOS

David Cocero, David Riaño y Emilio Chuvieco

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá
C/ Colegios, 2-28801 Alcalá de Henares (Madrid)

Resumen: Se presentan en este trabajo las relaciones observadas entre la humedad de las hojas de varias especies vegetales de ámbito mediterráneo, medida sobre el terreno, los índices meteorológicos de peligro de incendios. Y las imágenes de satélite (NOAA-AVHRR y Landsat-TM). Se observa que el DC (Drought Code), subíndice meteorológico del sistema canadiense, y los índices basados en el infrarrojo medio y la temperatura de superficie (NDII₅, NDII₇, y NDVI/TS), derivados de las imágenes de satélite, permiten realizar una buena estimación del contenido de humedad de algunas especies mediterráneas.

Palabras clave: humedad de las hojas, índices meteorológicos de peligro de incendios, radiometría de campo, imágenes de satélite.

Abstract: Field foliage moisture content measurements were correlated with meteorological fire danger indices, satellite images (NOAA-AVHRR and Landsat-TM) and field radiometry. It is observed that the DC (Drought Code), a meteorological sub-index of the Canadian system, as well as the indices based on the middle infrared and surface temperature (NDII₅, NDII₇, and NDVI/TS), the three of which are derived from satellite data, allow us to obtain a good forecast of the moisture content of some Mediterranean species.

Key words: foliage moisture, meteorological fire danger indices, field radiometry, satellite images

INTRODUCCIÓN

La determinación del peligro de incendio forestal en un ecosistema como el mediterráneo debe considerar la diversidad de factores que intervienen en el inicio y propagación del incendio. Este hecho requiere la utilización de diferentes métodos capaces de estimar las condiciones previas al desarrollo de este suceso, línea en la que se inscribe el presente trabajo.

Así, durante los últimos años, se ha producido un gran incremento del uso de las imágenes de satélite en las labores de prevención de incendios (estimación del peligro a corto plazo), basado en la asunción de la relación existente entre la in-

formación espectral adquirida por éstas y el estado de la vegetación. En este sentido, los datos procedentes de teledetección complementarían los obtenidos de estaciones meteorológicas (índices de peligro), proporcionando ambos una visión más realista del peligro de incendio.

En la actualidad, la mayoría de estos índices de peligro de incendio están basados en datos meteorológicos, principalmente en la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento (Van Wagner, 1987; Carrega, 1991: ver artículo de Aguado y Camiá en este mismo número). Estos índices son fáciles de calcular y proporcionan una valoración rápida de las condiciones generales de peligro asociado a la situación de la atmósfera. Presentan, sin embargo, algunos

problemas operativos, entre los que cabe destacar los siguientes:

1. Los índices se calculan a partir de datos procedentes de estaciones meteorológicas, situadas con frecuencia lejos de las zonas forestales. Esto implica una tarea de interpolación-extrapolación espacial que no resulta muy precisa, especialmente en lo que se refiere al viento y la precipitación.
2. Pese a la gran importancia del contenido de humedad de la vegetación en el inicio y desarrollo el fuego (la mayor parte de los modelos de simulación lo consideran: Albini, 1985; Andrews y Chase, 1990; Hartford y Rothermel, 1991; Van Wagner, 1985), estos índices no están calibrados para estimar esta variable (algunos de ellos lo están para la humedad de la vegetación muerta, más dependiente de las condiciones atmosféricas, pero ninguno para las especies vivas).

Conviene considerar que el contenido de agua en las plantas no sólo depende las condiciones atmosféricas, sino también del tipo de vegetación (longitud de raíces, resistencia estomática, etc.), por lo que resulta complejo que un solo índice se adapte bien a la variedad presente en los espacios mediterráneos. En consecuencia, la fiabilidad de los índices meteorológicos del peligro de incendios aumentaría si tuvieran en cuenta la humedad del combustible (tanto la de la vegetación viva como la de la materia muerta presente en el sustrato forestal). Para estimar este parámetro, el medio más adecuado es la medición directa mediante muestreos de terreno. Sin embargo, esta tarea resulta poco operativa, ya que las medidas directas requieren un costoso muestreo espacial y no son fácilmente generalizables a grandes espacios. En este contexto, las imágenes de los satélites de teledetección podrían facilitar una alternativa muy adecuada, ya que permiten adquirir información sobre grandes territorios con una cadencia temporal bastante alta. Aquí, el principal problema sería demostrar la relación existente entre esas imágenes y la dinámica del contenido de humedad para diversas especies vegetales. Hasta el momento se han abordado trabajos de laboratorio en esta línea (Carter, 1991; Cohen, 1991), pero todavía existe poca experiencia en la aplicación a imágenes de satélite propiamente dichas, siendo más destacada su aplicación a cubiertas de herbáceas (Paltridge y Barber, 1988; Chladil y Nunez, 1995) y mucho menos a zonas de matorral en ámbitos mediterráneos (Alonso et al., 1996).

OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es presentar los primeros resultados de una estimación integrada del contenido de humedad de la vegetación, a partir de la información captada por los satélites de teledetección y los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales.

Nuestra hipótesis de partida es que el contenido de humedad de algunas especies vegetales puede ser estimado a partir de los datos espectrales captados por los sensores de teledetección y por los índices meteorológicos de peligro, hecho que permitiría refinar los sistemas actuales de prevención del peligro, al proporcionamos la teledetección un muestreo exhaustivo del territorio, más intensivo que el facilitado por los índices meteorológicos, tradicionalmente utilizados en la prevención del peligro.

De acuerdo con ello, la información espectral medida por teledetección podría presentar correlaciones intensas con el contenido de humedad de algunas especies vegetales, siempre que presentaran doseles simples, ya que serían las más sensibles a los cambios meteorológicos estacionales. También asumíamos que los índices meteorológicos de peligro estarían más relacionados con la humedad de la vegetación muerta, presente en el suelo forestal. De esta forma, los datos procedentes de teledetección completarían los obtenidos de estaciones meteorológicas, proporcionando ambos una visión más completa del peligro de incendio.

Para comprobar estas hipótesis procedimos a organizar un esquema de muestreo de la humedad de la vegetación para correlacionarlo con las imágenes de satélite y los índices meteorológicos de peligro de incendios.

METODOLOGÍA

El área elegida para abordar este estudio es el Parque Nacional de Cabañeros, localizado entre el cuadrante noroccidental de la provincia de Ciudad Real y el suroccidental de la de Toledo, con una superficie de 41.804 hectáreas. El período de trabajo abarca desde abril a septiembre de los años 1996 y 1997, con objeto de considerar la variación existente en las condiciones de humedad de la vegetación desde la primavera, momento en que las cubiertas vegetales presentan su máximo vigor, hasta el verano, cuando alcanzan su mínimo debido a la fuerte sequía estival.

Medidas de la humedad del combustible

Para el presente proyecto se consideraron como tipos de combustible forestal de interés el pasto, el matorral y el arbolado. Planteamos como hipótesis que el primero determina la probabilidad de ignición de una masa forestal, mientras los dos segundos la mayor o menor facilidad de propagación ante el fuego.

Previa a la planificación del trabajo de campo, se revisó la bibliografía referente al diseño del muestreo, la localización de las parcelas, la toma de muestras y el trabajo de laboratorio (Brown et al., 1989; Trowbridge y Feller, 1988; Viegas et al., 1990).

Se eligieron un total de cinco parcelas de muestra para el año 1996 y de seis parcelas para el año 1997 (Figura 1), con los siguientes tipos de combustible: pasto, jara (*Cistus ladanifer*), brezo (*Erica australis*), romero (*Rosmarinus officinalis*), y quejigo (*Quercus faginea*), esta última especie sólo en 1997. La recogida de muestras de vegetación en cada una de las parcelas seleccionadas se llevó a cabo de una forma sistemática, una vez cada ocho días y a la misma hora aproximadamente (entre las 12:00 y las 16:00 h).

Según las distintas especies recogidas, la selección del material para este cálculo fue diferente:

- (i) El pasto fue arrancado a tirón y desprovisto posteriormente de la tierra que quedaba adherida a las raíces.
- (ii) En los matorrales las muestras recogidas fueron los extremos de las ramillas laterales y terminales, cortadas en tramos de unos 5-10 cm.
- (iii) En el caso de la vegetación arbórea, se recogieron hojas en diferentes partes del mismo individuo.

Todas las muestras recogidas tenían un peso entre 100 y 200 gramos, y eran pesadas en el momento de su recogida en una balanza (con una pesada máxima de 250 gramos y un error de 0,1 gramos). Posteriormente se trasladaban al laboratorio, donde se secaban en una estufa durante cuarenta y ocho horas a una temperatura de 60° C. Tras esta operación, las muestras fueron pesadas de nuevo con la misma balanza. Con esta información se calculó la humedad del combustible (que aquí denominamos FMC, *Fuel Moisture Content*), definido como el peso del agua en función del peso seco:

$$FMC = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

donde P_h es el peso en gramos de las hojas verdes, y P_s el peso en seco. El resultado se expresa en porcentaje.

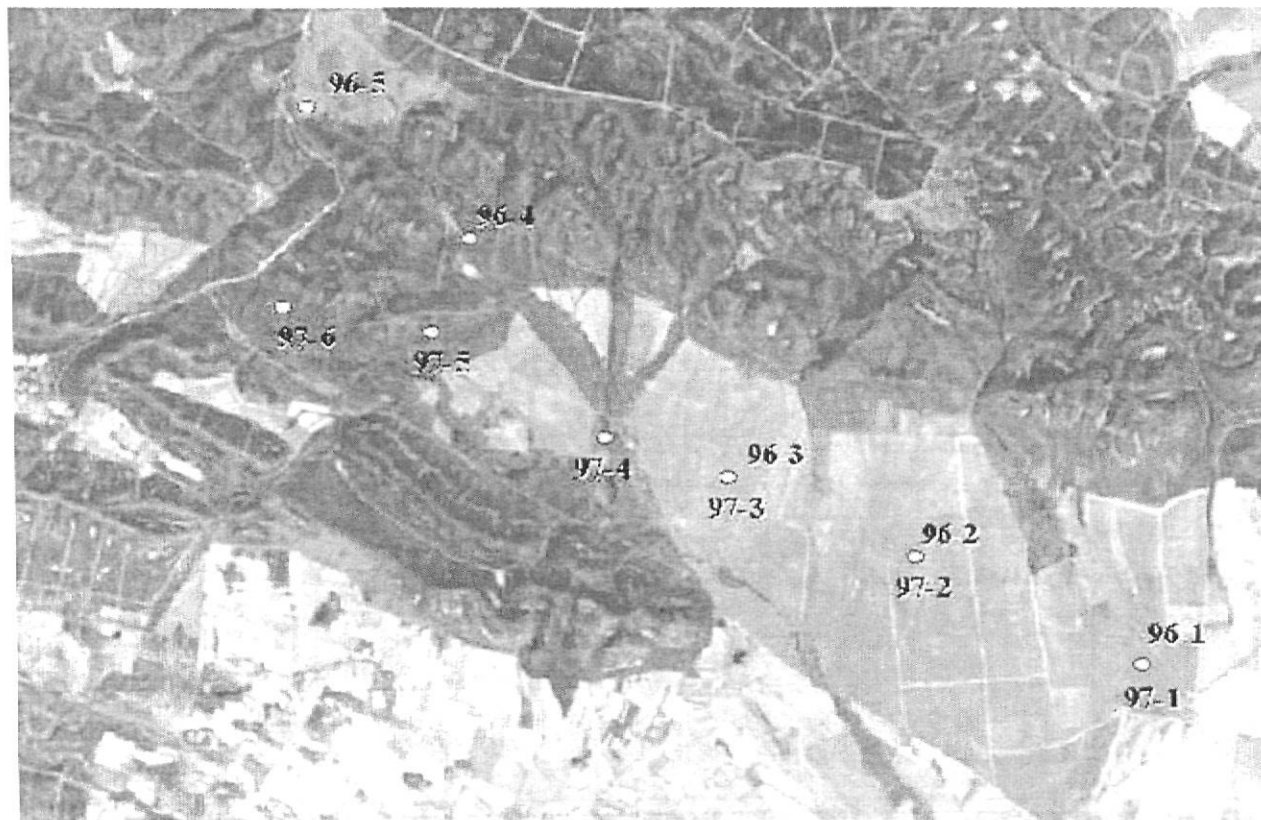


Figura 1. Imagen Landsat-TM del Parque Nacional de Cabañeros con la localización de las parcelas de muestreo

Una primera observación de la evolución temporal de la humedad del combustible durante el año 1996 (Figura 2) indica que ésta varía no tanto por las condiciones medioambientales del entorno como por el tipo de especie, ya que se observan comportamientos dispares en especies recogidas en la misma parcela y comportamientos similares en la misma especie recogida en distintas parcelas. Este hecho es lógico si tenemos en cuenta que la influencia de los parámetros meteorológicos es diversa en cada especie, en función de su propia adaptación al estrés hídrico estival.

En cuanto a las especies muestreadas, el pasto presenta los contenidos de humedad más altos (en primavera) y más bajos (en el verano) de todas las especies analizadas, presentando una clara evolución temporal en su contenido de humedad. Entre las diferentes especies de matorral, podemos hablar de dos grupos diferenciados según su contenido de humedad durante la primavera. El primero lo formarían la jara y el romero, con una humedad más alta durante la primavera que la del brezo, que formaría el segundo grupo y que presenta un contenido de humedad muy bajo al inicio del periodo de estudio. Sin embargo, las tres especies presentan un comportamiento similar durante el verano, con una evolución temporal que no presenta grandes oscilaciones, alcanzando sus mínimos a finales de agosto, para continuar posteriormente con un leve y continuo ascenso durante el mes de septiembre.

Los datos de 1997 (Figura 3), parecen corroborar las tendencias del año 1996. En cuanto a las especies, el pasto vuelve a presentar los contenidos de humedad más altos (en primavera) y más bajos (en el verano) de todos los combustibles analizados, presentando una clara evolución temporal. Sin embargo, llaman la atención los cambios bruscos en su contenido de humedad durante el verano, hecho que puede deberse a las tormentas que se registran en la zona en este periodo. Respecto a la variación interanual hay que señalar que la humedad del pasto en el año 1996 es mucho más elevada en primavera y algo más baja en verano que en el año 1997, pudiendo estar la explicación de este hecho en las diferentes condiciones climáticas en ambos años. Destaca en este sentido la diferencia de humedad que encontramos al inicio del periodo de estudio, circunstancia que tiene su explicación en el hecho de que durante el mes de marzo de 1997 no se registraron precipitaciones en todo el área de Cabañeros.

Respecto a las especies de matorral, volvemos a encontrar la misma situación que en el año anterior: dos grupos diferenciados según su contenido de humedad durante la primavera. El primero formado de nuevo por la jara y el romero, con una humedad más alta durante todo el año que la del brezo, que formaría el segundo grupo y que presenta el contenido de humedad más bajo al inicio del periodo de estudio. Sin embargo, las tres especies presentan un comportamiento similar durante el verano.

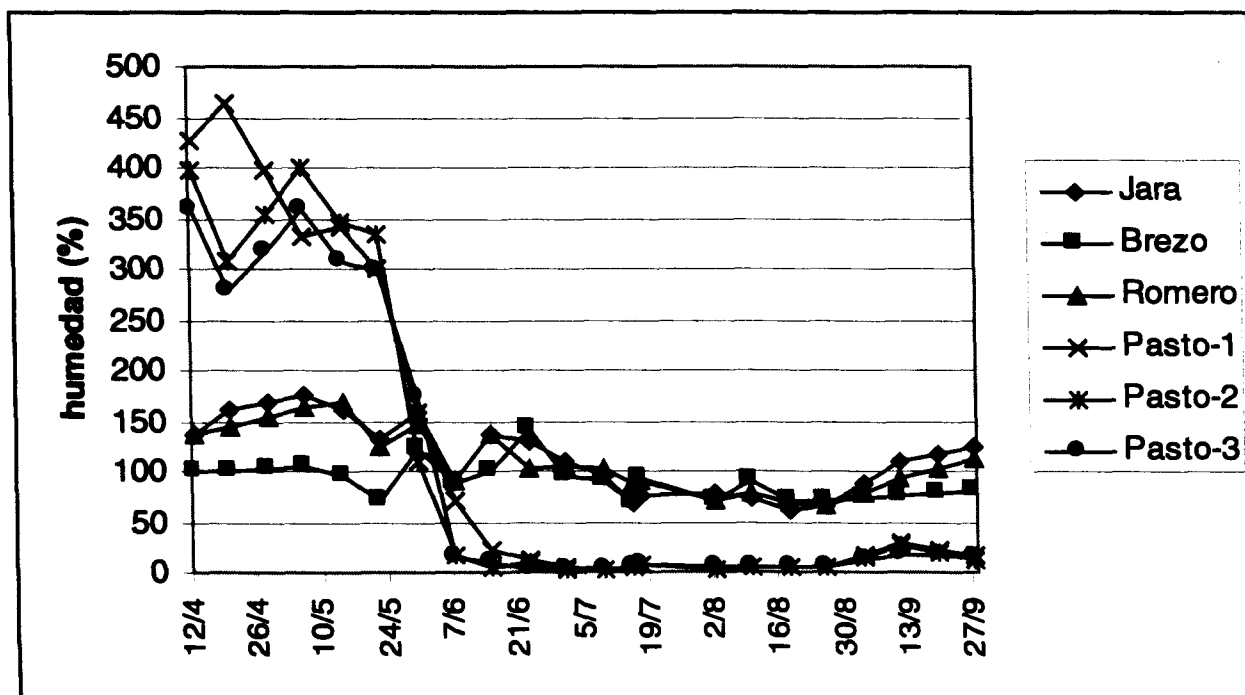


Figura 2. Humedad de la vegetación durante el año 1996

Las hojas de quejigo, por su parte, presentan una evolución temporal similar a las de la jara, con su máximo durante la primavera, para luego producirse un descenso progresivo y continuado hasta finales de septiembre.

Cálculo de índices meteorológicos de peligro

Un índice de peligro es un instrumento de predicción que cuantifica el riesgo de incendio a partir de una serie de factores (permanentes y variables), que condicionan el inicio y propagación del fuego. Los factores permanentes no influyen de forma decisiva en la variación diaria del índice. Son los factores variables los que, medidos o estimados periódicamente, proporcionan la oscilación del índice a corto plazo (Vélez, 1985). La gran variedad de índices meteorológicos existentes combina y pondera de distinta forma estos factores variables. Por tanto, en el momento de decidirnos por la utilización de un índice determinado es necesario disponer de la información meteorológica precisa (Aguado, 1997).

En nuestro caso, la información meteorológica fue suministrada por la estación que el equipo de la Universidad Complutense de Madrid, dirigido por el Dr. José Manuel Moreno, posee en Quintos de Mora (Toledo) a escasa distancia de Cabañeros. Para este trabajo, hemos utilizado como índices meteorológicos de peligro los empleados por los servicios forestales de Canadá y de España: el FWI (*Fire Weather Index*) y sus subíndices (FFMC, *Fine Fuel Moisture Code*;

DMC, *Duff Moisture Code*; DC, *Drought Code*; ISI, *Initial Spread Index*, y BUI, *Build Up Index*) (van Wagner, 1987) y la Probabilidad de Ignición (PI) y su subíndice HBC (Humedad Básica del Combustible) (Vélez, 1985), respectivamente.

La diferencia entre los índices canadiense y español reside fundamentalmente en el número de variables utilizadas: mientras que la PI utiliza únicamente temperatura y humedad relativa, el FWI incluye también la precipitación y el viento, y posee, además, un efecto acumulativo pues considera los valores de los días precedentes. El índice canadiense, aunque diseñado para unas condiciones climáticas y fitogeográficas diferentes de las mediterráneas, ha demostrado tener una estrecha relación con la ocurrencia de incendios en diferentes países mediterráneos (Viegas et al., 1994). Por otro lado, la posibilidad de contar con subíndices que estiman el contenido de humedad no sólo en los combustibles ligeros sino en los que pierden humedad más lentamente nos permite caracterizar de forma más precisa el peligro de incendio (Aguado, 1997). Por estos motivos se considera oportuna su utilización en este estudio.

La observación de los valores alcanzados por los índices de peligro en el año 1996 nos señala una amplia variación tanto de la Probabilidad de Ignición (Figura 4) como del índice canadiense FWI (Figura 5). A los valores diarios (en línea simple) se les ha superpuesto una línea de tendencia (en línea gruesa), realizada mediante una media móvil, para poder observar mejor la evolución de los índices.

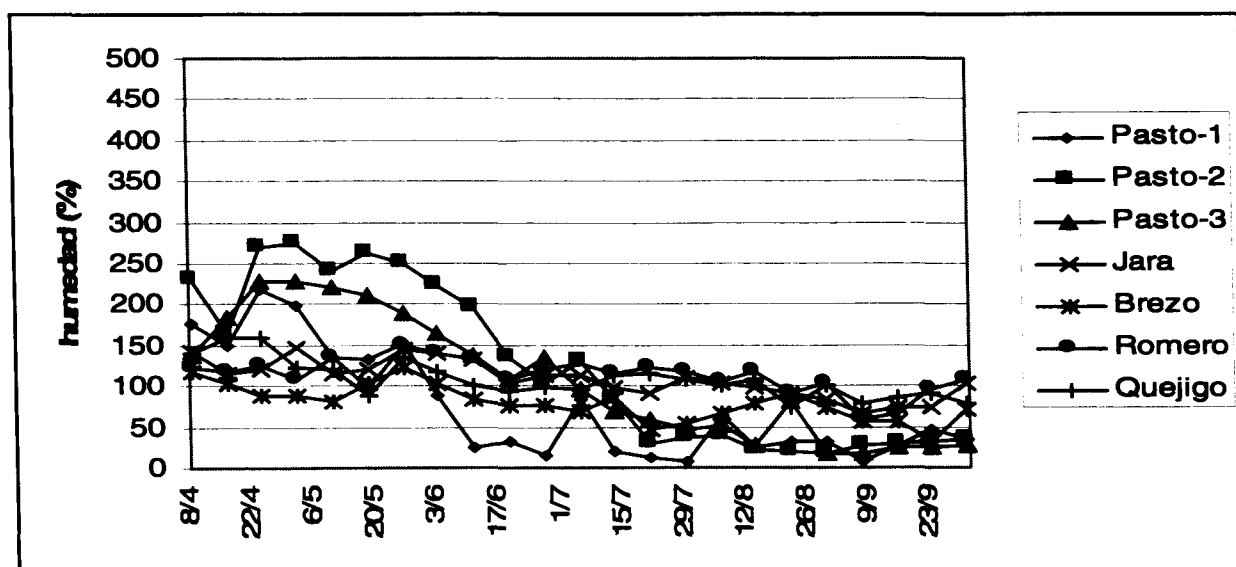


Figura 3. Humedad de la vegetación durante el año 1997

El índice de peligro español presenta una clara evolución estacional, partiendo a principios del mes de abril con el valor más bajo de todo el periodo de estudio. Los valores de peligro se mantienen entre moderados y bajos durante los meses de abril y mayo, puesto que las precipitaciones primaverales hacen que la humedad relativa se mantenga elevada durante este lapso de tiempo. A finales de mayo el índice comienza un ascenso continuado, que nos llevará a mediados de junio donde ya se alcanza el valor máximo de todo el periodo. Estos valores altos del índice se mantendrán durante todo el verano, y sólo se verán interrumpidos por descensos ocasionados por el aumento de la humedad relativa en días concretos debido a las tormentas estivales, hecho que se percibe claramente en la segunda quincena del mes de agosto.

A lo largo del mes de septiembre las condiciones meteorológicas menos extremas, con un periodo de intensas precipitaciones, producen un descenso del índice, que presenta valores moderados y bajos en este final del periodo de estudio.

En cuanto al FWI, su evolución en 1996 es similar. El índice parte de valores muy bajos a principios del mes de abril, para después experimentar un pequeño ascenso durante la segunda quincena del mes. Como consecuencia de las lluvias registradas durante el mes de mayo, el índice vuelve a bajar y se mantiene con valores muy bajos durante prácticamente todo el mes.

Posteriormente, el incremento del peligro de incendio es continuado hasta principios del mes de julio, momento en el que se alcanzan los valores máximos del índice a lo largo de todo el periodo. Desde mediados de agosto y durante el mes de septiembre se observa un acusado descenso en los valores del FWI, para llegar a finales de septiembre con valores de peligro bajos y similares a los del principio de la primavera.

Comparando la evolución de la Probabilidad de Ignición en los dos años de estudio observamos que el valor del índice es, en líneas generales, más bajo en el año 1997 (Figura 6) que en el año 1996. Las elevadas precipitaciones de la primavera de este último año provocan que la PI se mantenga en niveles no muy elevados durante todo el año.

Se inicia el periodo de estudio en abril con valores elevados para esas fechas, valores que sólo se ven alterados por bajadas debidas a un aumento de la humedad relativa. En la segunda parte del mes se produce un descenso acusado debido a un periodo lluvioso, alcanzándose unos valores muy bajos.

En el mes de mayo se observa un predominio de los valores intermedios en el índice: sube poco a poco hasta que en el mes de julio se alcanzan sus valores más altos, aunque encontramos dientes de sierra, debido al aumento de la humedad relativa como consecuencia de tormentas estivales.

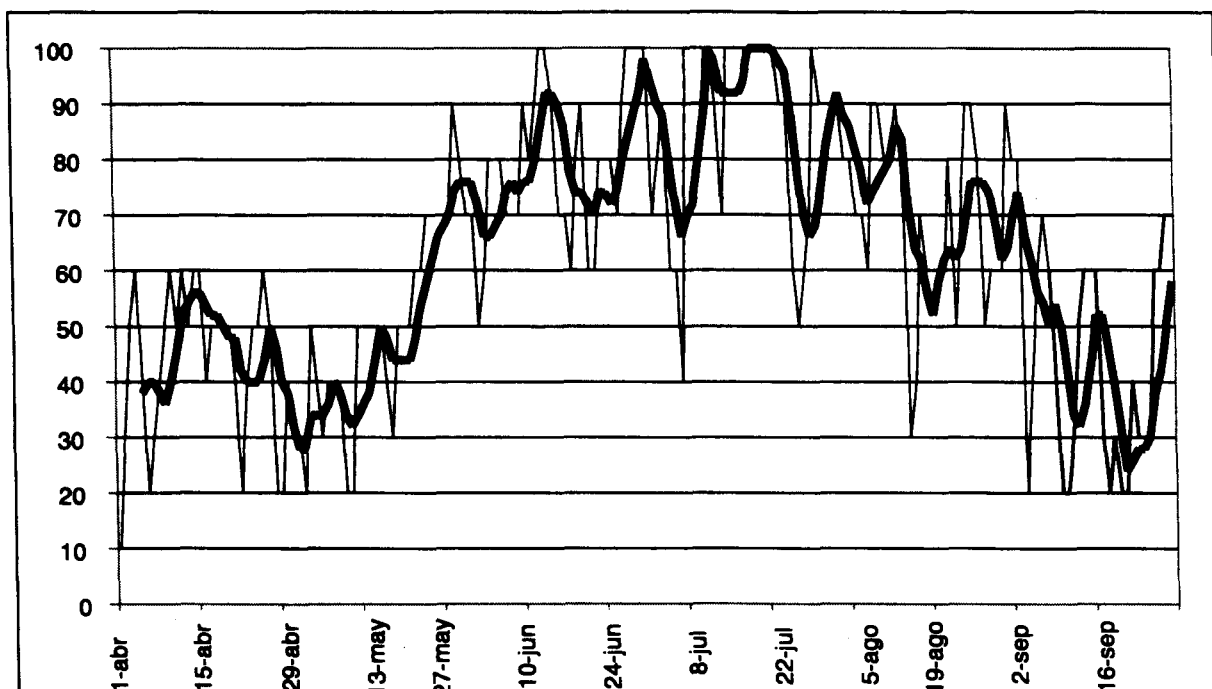


Figura 4. Evolución temporal de la Probabilidad de Ignición durante 1996

La tendencia del índice se presenta parecida durante los meses de agosto y septiembre: valores altos y medios, sólo interrumpidos por valores bajos debido a varias tormentas estivales durante el mes de agosto y a un periodo de precipitaciones intensas en los últimos días del mes de septiembre.

Respecto a la evolución del índice canadiense FWI (Figura 7) hay que decir que, al igual que la PI, presenta variaciones bruscas debido a las variadas precipitaciones que se producen durante el periodo de estudio. Los valores más altos del índice los encontramos a mediados de los meses de agosto y septiembre, mientras que el va-

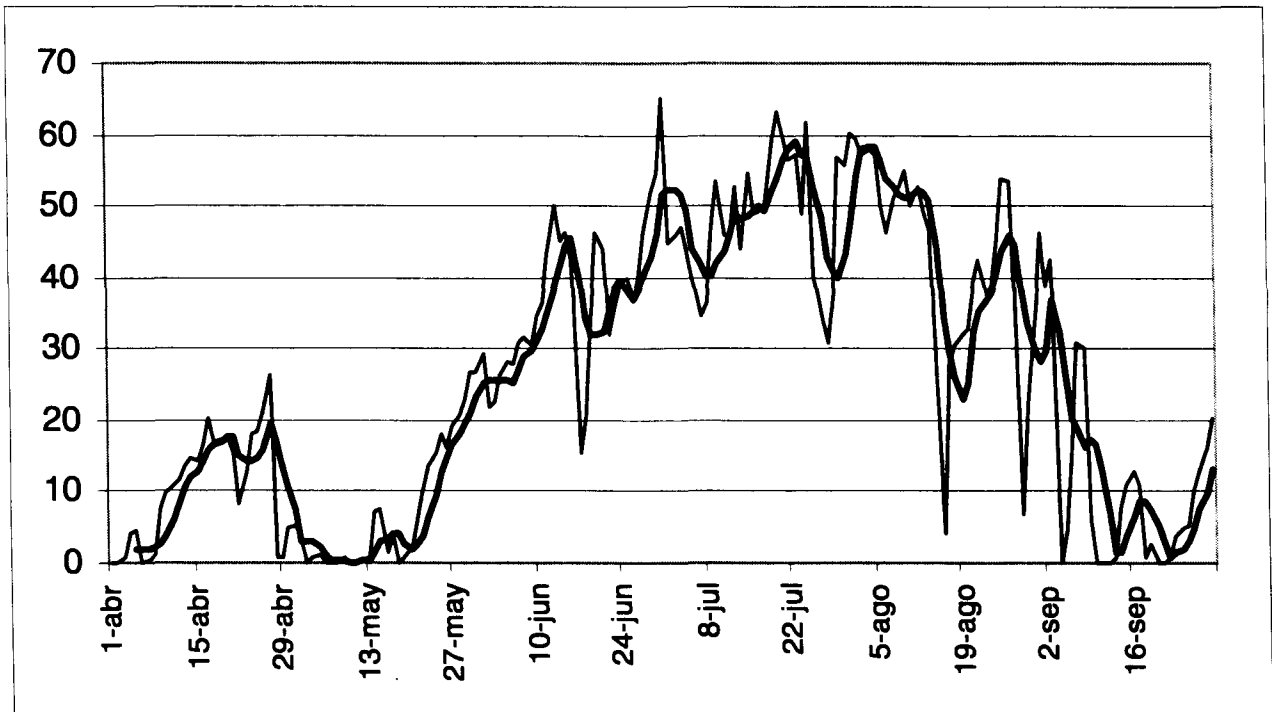


Figura 5. Evolución temporal del FWI durante el año 1996

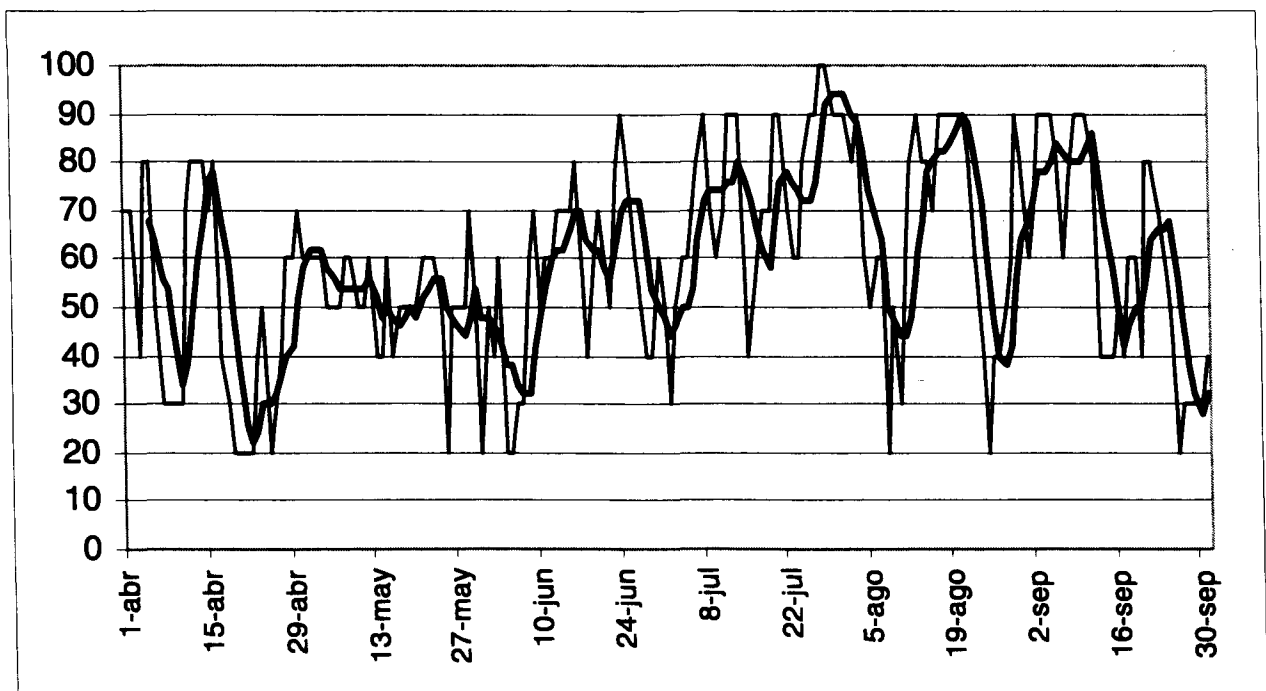


Figura 6. Evolución temporal de la Probabilidad de Ignición durante 1997

lor más bajo lo encontramos durante el mes de mayo, debido a la presencia de precipitaciones continuadas en esas fechas. Al igual que en el caso de la PI, el FWI presenta valores más bajos en el año 1997 que en el año 1996 debido a la diferencia de precipitaciones entre ambos años.

El índice registra varios picos en el periodo de estudio, que se producen en los periodos en los que no se producen precipitaciones. Sin embargo, a lo largo de los meses de verano se observa una tendencia ascendente en el valor del FWI, sólo interrumpido en los días en los que se producen precipitaciones.

El periodo de estudio acaba en el mes de septiembre con continuas subidas y bajadas en el índice, que prácticamente baja a valores en torno a cero debido al periodo de precipitaciones intensas de finales de mes.

Análisis de las imágenes NOAA-AVHRR

El sensor NOAA-AVHRR proporciona un recubrimiento completo del planeta cada 12 horas. Su resolución espacial es de 1,1 x 1,1 km, en el nadir, si bien, dado el gran ángulo de barrido, puede degradarse hasta 2,4 x 6 km en los extremos de la imagen.

Para este trabajo empleamos los dos primeros canales del satélite: rojo (R), entre 0,58 y 0,68 μm , e infrarrojo cercano (IRC), 0,72 a 1,10 μm , que permiten el cálculo de índices de vegetación, relacionados con la actividad fotosintética (Tucker y Sellers, 1986) y el contenido de humedad (Paltridge y Barber, 1988); y los dos canales en el infrarrojo térmico (IRT) (banda 4, de 10,3 a 11,3 μm , y banda 5, 11,5 a 12,5 μm), que hacen posible el cálculo de la temperatura de superficie (Vidal, 1991; Kerr et al., 1992).

Las imágenes NOAA-AVHRR adquiridas para este proyecto fueron recogidas por la estación receptora que la empresa Infocarto posee en su sede de Madrid y por la estación de Dundee en Escocia. Todas ellas corresponden a la pasada diurna del satélite NOAA-14, adquirida aproximadamente a las 14,30 h. Las imágenes de Infocarto incluyen todas las adquisiciones diarias adquiridas entre el 1 de junio y el 30 de septiembre de los años 1996 y 1997. Además, y para obtener una mejor idea de la variedad estacional de cada pixel, también se adquirieron las imágenes correspondientes a los meses de abril y mayo de ambos años a la estación de Dundee, aunque no poseemos la serie completa. A pesar de que se pretendía procesar las imágenes diarias de estos periodos, debido a algunos problemas de recepción o al elevado porcentaje de nubes, algunas debieron descartarse.

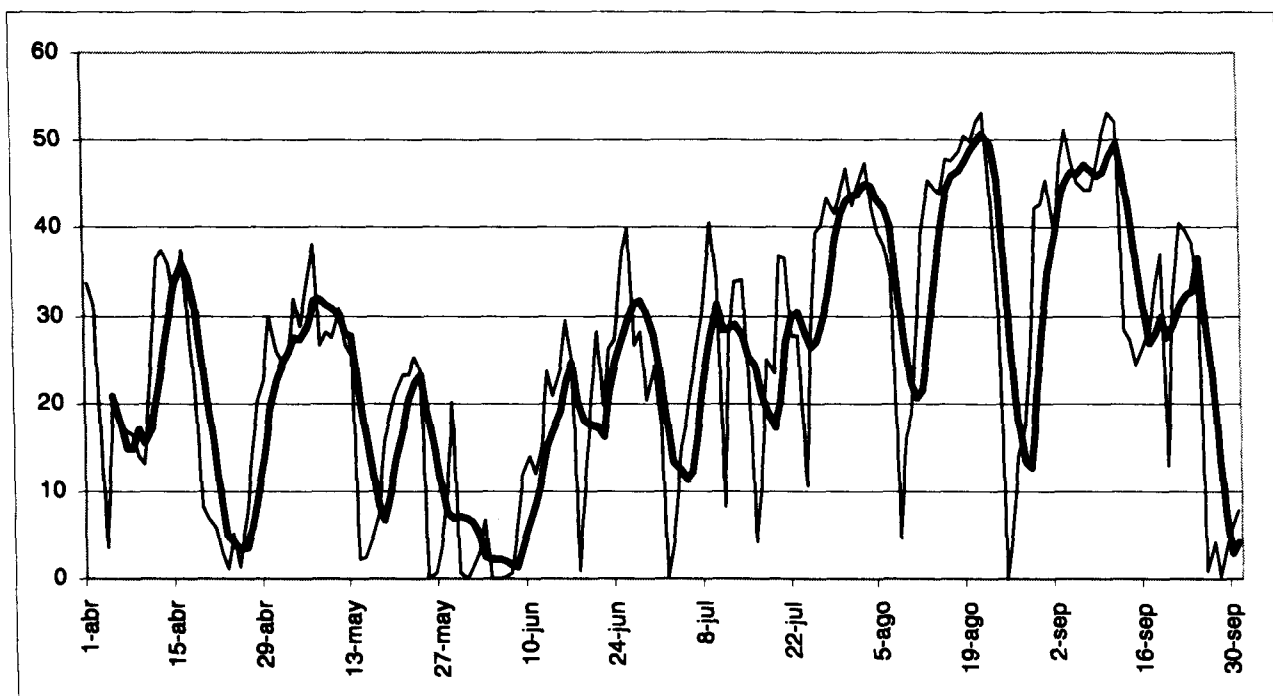


Figura 7. Evolución temporal del FWI durante el año 1997

Las variables derivadas de las imágenes del satélite NOAA-AVHRR que se utilizaron en este proyecto fueron las siguientes:

- (i) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

donde ρ_{IRC} y ρ_R son la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente.

- (ii) Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + \rho_R + l)}(1 + l)$$

donde l es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación. Para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma $l = 0,5$ (para densidades altas, como en la experiencia con radiometría de campo que se explica en el apartado 3,5, se emplea $l = 0,25$).

- (iii) Índice de vegetación global (GEMI) (Pinty y Verstraete, 1992):

$$GEMI = \eta \times (1 - 0,25 \times \eta) - \frac{\rho_{IRC} - 0,125}{1 - \rho_R}$$

donde

$$\eta = \frac{2 \times (\rho_{IRC}^2 - \rho_R^2) + 1,5 \rho_{IRC} + 0,5 \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + 0,5}$$

- (iv) Temperatura de superficie (TS).
 (v) Diferencia entre la Temperatura de Superficie y la Temperatura del Aire (TS-TA).
 (vi) Cociente entre el NDVI y la TS (NDVI/TS).

Análisis de las imágenes Landsat-TM

El sensor Landsat-TM está directamente diseñado para la cartografía temática. Es un equipo de barrido multi-espectral con una resolución espacial de, aproximadamente, 30 x 30 metros y una resolución espectral de 7 bandas. Para la determinación operativa del contenido de humedad, las imágenes TM presentan dos desventajas frente a las NOAA-AVHRR: por un lado su baja frecuencia temporal (una imagen cada 16 días) y por otro su alto coste de adquisición. En contrapartida, dispone de dos bandas en el infrarrojo medio (IRM), más directamente relacionadas con el contenido de humedad que la banda 3 del NOAA-AVHRR (3,55-3,93 μm), ya que las bandas 5 (1,55-1,75 μm) y 7 (2,08-2,35 μm) del TM se sitúan en torno a las longitudes de onda donde se originan los picos de reflectividad (1,6 y 2,2 μm), justo entre las longitudes de onda de absorción del agua (1,4, 1,9 y 2,4 μm) (Knipling, 1970). Además, las imágenes TM

ofrecen mucho mejor resolución espacial que las NOAA-AVHRR, lo que permite localizar mejor las parcelas de muestreo y evita en mayor medida el ruido derivado de la mezcla de cubiertas, mucho más patente en las NOAA-AVHRR.

Para este proyecto se dispuso de tres imágenes TM del área de estudio: una de primavera (16 de abril), otra de verano (21 de julio) y otra de otoño (23 de septiembre), todas ellas de 1997. Además de calcularse los índices expuestos para el caso de las imágenes NOAA-AVHRR se obtuvieron el NDII₅ y el NDII₇, similares al NDVI aunque en vez de utilizar la banda 4 del sensor, correspondiente al IRC, usan las bandas 5 y 7, respectivamente (ambas en el IRM). También se calculó el cociente entre el NDII₅ y la TS.

A la hora de realizar estimaciones de la relación existente entre las imágenes y el contenido de humedad con sólo tres fechas, sólo pudieron establecerse funciones numéricas para el caso del pasto, ya que se contaba con tres parcelas por periodo (en total 9 valores) y para el caso de la jara y el brezo, ya que contábamos con dos parcelas por periodo (en total 6 valores en ambos casos). Mientras que para el caso del quejigo y del romero no se realizó ninguna estimación ya que sólo se disponía de 3 observaciones. Por lo tanto, los datos TM se encuentran muy limitados debido al escaso número de casos.

RESULTADOS

Relación entre FMC e índices meteorológicos

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados de la correlación de Pearson para los años 1996 y 1997, respectivamente, entre el FMC y los diversos índices meteorológicos de peligro. En general las correlaciones con el año 1996 son mucho mejores que con el año 1997. Esta diferencia puede ser debida a que el año 1997 estuvo influenciado por la existencia de muchas tormentas veraniegas, hecho que produce que los índices meteorológicos fluctúen mucho.

Puede observarse con claridad que el DC (Drought Code) presenta las mejores correlaciones con el FMC, especialmente con el pasto y la jara. Este subíndice del sistema canadiense intenta estimar la cantidad de agua retenida en el suelo y está asociado con los combustibles pesados (25 Kg/m²). Pensamos que este mejor ajuste con el FMC de la vegetación viva se debe

a tratarse del código más relacionado con las tendencias a largo plazo de la variación atmosférica, puesto que las especies vivas son menos dependientes de cambios súbitos en las condiciones atmosféricas.

El resto de los índices presentan correlaciones más bajas que el DC, especialmente en algunas parcelas de pasto, brezo y quejigo. En cuanto a los índices finales, FWI y PI, los resultados apuntan a que el índice canadiense está más relacionado con la FMC que el español.

Relación entre FMC e imágenes de satélite

Relación entre FMC e imágenes NOAA-AVHRR

Las tendencias observadas a partir del análisis de la correlación de Pearson (tablas 3 y 4) pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- La TS presenta correlaciones negativas con todas las especies, obteniéndose las correlaciones más altas en el caso del pasto. Este hecho es lógico si tenemos en cuenta que cuanto más alta sea la temperatura mayor será la evapotranspiración y menor la humedad.

- Tendencias similares hemos encontrado con la variable TS-TA, que está correlacionada significativamente con todas las especies, excepto una parcela de brezo en 1996 y una de romero en 1997, aunque con valores algo más bajos que en el caso de la TS.
- El cociente NDVI/TS presenta las mejores correlaciones con la FMC de todas las variables del AVHRR. Estas correlaciones son significativas para el pasto (siendo las más altas), la jara, el quejigo y el brezo. En el caso del pasto (Figura 8) se representan las líneas de regresión de cada una de las parcelas, observándose unas tendencias similares, con lo que se demuestra que puede realizarse una correlación entre el FMC y NDVI/TS, independientemente de la parcela y del año. Esta misma prueba se podría realizar con el resto de índices, pero se escoge éste porque es el que, como se ha mencionado antes, ofrece las mejores correlaciones.
- De todos los índices de vegetación, el SAVI y el GEMI presentan mejores correlaciones que el NDVI para la mayoría de las especies, pero las diferencias entre ellos son, generalmente, pequeñas.

Tabla 1. Correlaciones entre el FMC y los índices meteorológicos de peligro para el año 1996

	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	HBC	PI
Pasto (1)	-0.49	-0.58	-0.77	-0.60	-0.62	-0.67	0.60	-0.65
Pasto (2)	-0.61	-0.57	-0.74	-0.66	-0.61	-0.70	0.64	-0.68
Pasto (3)	-0.58	-0.58	-0.76	-0.65	-0.62	-0.70	0.62	-0.66
Jara (4)	-0.45	-0.60	-0.82	-0.57	-0.66	-0.64	0.53	-0.58
Romero (4)	-0.51	-0.65	-0.88	-0.56	-0.72	-0.65	0.49	-0.52
Brezo (5)	0.02	-0.22	-0.56	-0.07	-0.28	-0.12	-0.03	0.00
Jara (5)	-0.53	-0.73	-0.85	-0.64	-0.79	-0.72	0.57	-0.61

*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.

Tabla 2. Correlaciones entre el FMC y los índices meteorológicos de peligro para el año 1997

	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	HBC	PI
Pasto (1)	-0.24	-0.11	-0.60	-0.42	-0.31	-0.40	0.44	-0.35
Pasto (2)	-0.45	-0.53	-0.83	-0.55	-0.69	-0.63	0.44	-0.49
Pasto (3)	-0.31	-0.44	-0.82	-0.39	-0.62	-0.50	0.34	-0.33
Jara (4)	-0.50	-0.61	-0.81	-0.57	-0.74	-0.67	0.38	-0.46
Brezo (4)	-0.35	-0.32	-0.64	-0.34	-0.47	-0.42	0.23	-0.25
Romero (5)	-0.50	-0.59	-0.68	-0.57	-0.67	-0.65	0.35	-0.41
Jara (5)	-0.37	-0.52	-0.78	-0.50	-0.65	-0.59	0.30	-0.33
Brezo (5)	-0.25	-0.28	-0.62	-0.37	-0.43	-0.40	0.18	-0.13
Quejigo (6)	-0.16	-0.23	-0.67	-0.34	-0.41	-0.37	0.29	-0.07

*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.

Relación entre FMC e imágenes TM

Las tendencias (Tabla 5) que hemos encontrado son similares a las que presentan las imágenes NOAA-AVHRR, aunque con la peculiaridad de que los canales situados en el infrarrojo medio mejoran mucho las relaciones con el FMC:

- La TS y la TS-TA sólo son significativas para el caso del pasto. Hay que recordar en este caso que se trata de un número mucho más pequeño de observaciones que las disponibles para los datos AVHRR.
- Las correlaciones con el NDVI, el SAVI y el GEMI también son sólo significativas para el caso del pasto, aunque son mucho más altas que en el caso de la TS y de la TS-TA.
- El NDII₅, el NDII₇ y el NDII₅/TS ofrecen las mejores correlaciones. El NDVI/TS mejora algo los resultados del NDVI, mientras

que el NDII₇/TS empeora los resultados del NDII₇.

Relación entre los resultados de TM y NOAA-AVHRR

Se compara la relación entre el FMC y el NDVI/TS de los dos satélites (Figura 9). El NDVI/TS no presenta los mejores resultados en el caso de TM, pero es de entre los mejores el único comparable con las imágenes NOAA-AVHRR. El número de observaciones de TM es bajo, además sólo se dispone de datos de FMC en torno al 25% y al 200%. Pese a esto se puede observar que las tendencias son significativamente diferentes entre ambos satélites. En principio TM permite discriminar mejor entre distintos valores de NDVI/TS, al presentar una pendiente más baja. Una pequeña variación en NDVI/TS no va a suponer un gran salto en el FMC.

Tabla 3: Correlación de Pearson entre el FMC y los derivados de las imágenes de satélite NOAA-AVHRR (1996)*

	TS	NDVI	TS-TA	SAVI	GEMI	NDVI/TS
Pasto (1)	-0.77	0.91	-0.71	0.93	0.90	0.96
Pasto (2)	-0.73	0.76	-0.66	0.88	0.86	0.95
Pasto (3)	-0.79	0.57	-0.70	0.62	0.50	0.93
Jara (4)	-0.73	0.45	-0.67	-0.03	-0.36	0.76
Romero (4)	-0.74	0.35	-0.70	-0.04	-0.33	0.74
Brezo (5)	-0.22	0.11	-0.18	-0.17	-0.16	0.22
Jara (5)	-0.79	-0.03	-0.80	-0.63	-0.69	0.61

*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.

Tabla 4: Correlación de Pearson entre el FMC y los derivados de las imágenes de satélite NOAA-AVHRR (1997)*

	TS	NDVI	TS-TA	SAVI	GEMI	NDVI/TS
Pasto (1)	-0.79	0.69	-0.74	0.74	0.76	0.89
Pasto (2)	-0.76	0.54	-0.58	0.67	0.68	0.75
Pasto (3)	-0.79	0.40	-0.68	0.52	0.49	0.74
Brezo (4)	-0.58	0.32	-0.59	0.70	0.58	0.65
Brezo (5)	-0.40	0.22	-0.58	0.26	0.01	0.47
Jara (4)	-0.61	0.46	-0.59	0.63	0.44	0.63
Jara (5)	-0.59	0.17	-0.68	0.50	0.30	0.58
Romero (5)	-0.46	0.37	-0.41	0.48	0.32	0.52
Quejigo (6)	-0.61	0.36	-0.58	0.22	-0.03	0.61

*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.

CONCLUSIONES

Como hemos visto a lo largo de los epígrafes previos resulta complicado establecer tendencias consistentes para estimar la humedad de la vegetación. No obstante, podemos apuntar algunas ideas que sirvan para plantear hipótesis que continúen esta línea de trabajo.

En cuanto a los índices meteorológicos de peligro, el código DC es el índice meteorológico relacionado con el FMC de las plantas vivas, más que los índices finales FWI y PI, ya que como quedó explicado anteriormente estaría más relacionado con la humedad de la vegetación de las plantas vivas que los otros índices.

Respecto a las imágenes de satélite cabría hacer las siguientes consideraciones:

- Las tendencias esperadas entre el FMC y las imágenes de satélite se confirman en prácticamente todos los casos, siendo ne-

gativas para la TS y la TS-TA, y positivas con los índices de vegetación.

- Parece claro que la evolución multitemporal de la humedad del pasto puede ser correctamente estimada con los datos de satélite. Varias razones pueden explicar esta tendencia. En primer lugar, el pasto es la única cobertura anual de las analizadas, por lo que es la más afectada por los cambios estacionales. En segundo lugar, el pasto presenta el más alto porcentaje de materia verde. Por último, el pasto presenta la cobertura más homogénea de todas las analizadas.
- Los canales situados en el IRM del sensor TM presentan una mayor sensibilidad a las variaciones de humedad de la vegetación que el canal situado en el IRC, aspecto que también hemos tenido ocasión de comprobar en otros análisis con espectroradiometría de campo.
- Al hallar el cociente entre el NDVI, el NDII₅ y el NDII₇ con la TS sólo se mejoran los resultados para el caso del NDVI. Este hecho puede ser debido a que el IRC utilizado para calcular el NDVI se encuentra influenciado

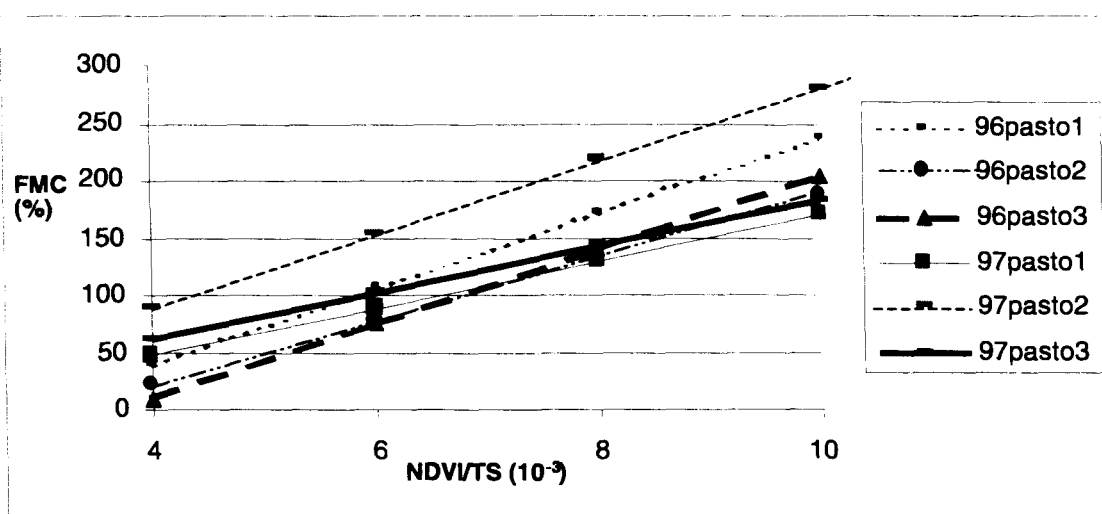


Figura 8. Líneas de regresión entre NDVI/TS y FMC para las imágenes NOAA-AVHRR por parcelas de pasto y por año

Tabla 5: Correlación de Pearson entre el FMC y los derivados de las imágenes Landsat-TM (1997)

	NDVI	NDII ₅	NDII ₇	SAVI	GEMI	TS	TS-TA	NDVI/TS	NDII ₅ /TS	NDII ₇ /TS
Pasto (1,2 y 3)	0.97	0.97	0.95	0.95	0.84	-0.80	-0.78	0.98	0.95	0.95
Leña (4 y 5)	0.72	0.89	0.90	0.61	0.33	-0.35	-0.27	0.69	0.91	0.88
Brezos (4 y 5)	0.67	0.94	0.94	0.75	0.56	-0.55	-0.48	0.83	0.93	0.69

*las correlaciones significativas al nivel 0,05 aparecen en negrilla.

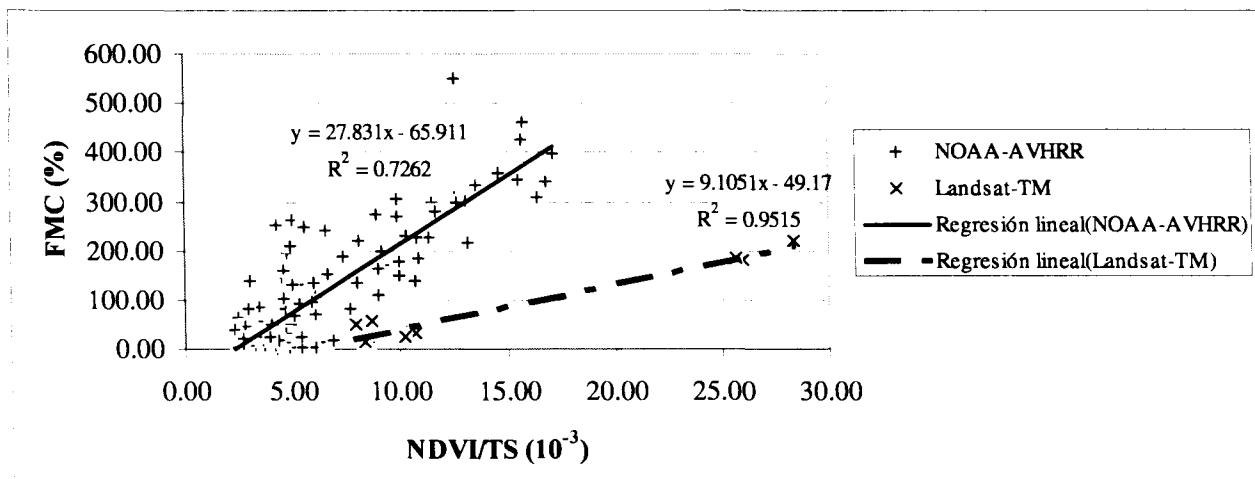


Figura 9: Líneas de regresión entre NDVI/TS y FMC para las imágenes NOAA-AVHRR (del conjunto de todas las parcelas de pasto y de los dos años 1996 y 1997) y Landsat-TM (del conjunto de todas las parcelas de pasto para el año 1997)

por la morfología de los diferentes tipos de plantas, aspecto que puede ser tenido en cuenta al utilizar la TS. Sin embargo, los canales situados en el IRM no se encuentran tan influenciados por la forma de las plantas (especialmente el área foliar), con lo que la incorporación de la TS sólo añade ruido a la hora de estimar la humedad de la vegetación.

- Los índices derivados de las imágenes de satélite que estimarían mejor la humedad de la vegetación serían el NDII₅ y el NDII₇, seguidos por el cociente entre el NDVI y la TS.

Por todo lo expuesto anteriormente, parece razonable realizar un análisis integrado entre las imágenes de satélite y los índices meteorológicos de peligro para elaborar índices más ajustados al riesgo, siguiente objetivo de nuestro trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto europeo Megafires (ENV4-CT96-0256), financiado por el programa de Medioambiente y Clima de la Comisión Europea (DG-XII). También se ha obtenido financiamiento parcial de la CICYT (AGF96-2094-CE). Deseamos también expresar nuestro agradecimiento al director del P.N. de Cabañeros, D. José Jiménez, así como al resto del personal del Parque, por su colaboración y apoyo para realizar las campañas de medición de humedad en el terreno. Asimismo, en estas campañas han participado Montserrat Gómez, Pilar Martín, Javier Salas, Patrick Vaughan e Inmaculada Aguado, a quien también expresamos nuestro reconocimiento.

REFERENCIAS

Aguado, I. (1997). Utilización de índices meteorológicos e imágenes de satélite NOAA en la previsión del peligro de incendios forestales. Memoria de Licenciatura. Departamento de Geografía. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.

Alonso, M., Camarasa, A., Chuvieco, E., Cocero, D., Kyun, I., Martín M. P. y Salas, F.J. (1996). Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 4: 9-24.

Brown, J. K., G. D. Booth y D. G. Simmerman (1989). Seasonal Change in Live Fuel Moisture of Understory Plants in Western U.S. Aspen. *10th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Ottawa, Canada: 406-412.

Carrega, P. (1991). A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. *International Journal of Wildland Fire* 1: 79-86.

Carter, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany* 78: 916-924.

Chladil, M. A. y Nunez, M. (1995). Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania. The application of remote sensing and empirical models for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire* 5: 165-171.

Cohen, W. B. (1991). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1865-1876.

- Hartford, R. A. y Rothermel, R. C. (1991). *Fuel Moisture as Measured and Predicted During the 1988 Fires in Yellowstone Park*. Missoula, MT, USDA, Forest Service.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**: 295-309.
- Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P. y Imbernon, J. (1992). Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved Split Window algorithm. *Remote Sensing of Environment* **41**: 197-209.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* **1**: 155-159.
- Paltridge, G. W. y Barber, J. (1988). Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* **25**: 381-394.
- Pinty, B. y Verstraete, M. M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* **101**: 15-20.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. y Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Greenbelt, MD, USA, NASA/GSFC.
- Trowbridge, R. y Feller, M. C. (1988). Relationships between the moisture content of fine woody fuels in lodgepole pine slash and the Fine Fuel Moisture Code of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Canadian Journal of Forest Research* **18**: 128-131.
- Tucker, C. J. y Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* **7**: 1395-1416.
- Van Wagner, C. E. (1985). Drought, Timelag and Fire Danger Rating. *8th National Conference on Fire and Forest Meteorology*, Detroit; Michigan, Society of American Foresters.
- Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa, Canadian Forestry Service.
- Vélez, R. (1985). Aplicación de la predicción del peligro para la prevención de los incendios forestales. *Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales*. Madrid, ICONA: 15-19.
- Vidal, A. (1991). Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing* **12**: 2449-2460.
- Viegas, D. X., Sol, B., Bovio G., Nosenzo, A. y Ferreira, A. (1994). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. *2nd Int. Conf. on Forest Fire Research*. Coimbra: 571-590.
- Viegas, D. X., Viegas, T. P. y Ferreira, A. D. (1990). Characteristics of some forest fuels and their relation to the occurrence of fires. *International Conference of Forest Fire Research*. Coimbra: B.03: 1-13.