

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

**David COCERO, Inmaculada AGUADO, Ana CAMARASA, David RIAÑO,
Patrick VAUGHAN, Emilio CHUVIECO, Montserrat GÓMEZ, María del Pilar
MARTÍN y Francisco Javier SALAS.**

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá,
C/ Colegios, 2. 28801, Alcalá de Henares.

1. 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.

Durante los últimos años, se ha producido un gran incremento del uso de las imágenes de satélite en las labores de prevención de incendios, basado en la relación existente entre la información 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.

A ello se uniría la humedad del combustible, clave en la aparición y desarrollo del incendio, que está determinada por el tipo de vegetación y su estado fenológico, así como por las condiciones meteorológicas presentes.

Para la verificación de este hecho, considerado como hipótesis de partida, hemos establecido un esquema de trabajo que permita obtener y relacionar las tres variables involucradas: humedad del combustible, imágenes de satélite e índices meteorológicos.

El objetivo principal de la presente comunicación es presentar los primeros resultados del análisis integrado entre estas tres variables que se ha realizado en el marco del proyecto europeo MEGAFiReS. Se presentan las relaciones encontradas entre la humedad de la vegetación medida en terreno, la información captada por imágenes de satélite (concretamente NOAA-AVHRR) y los índices meteorológicos de peligro de incendio.

2. El empleo de imágenes AVHRR en la previsión del peligro de incendios

En la actualidad, la mayoría de los índices de peligro de incendio están basados en datos meteorológicos tales como la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento (Van Wagner, 1987; Carrega, 1991). Sin embargo, la estimación diaria del contenido de humedad de la vegetación para grandes áreas presenta varias dificultades. La principal es que las medidas directas requieren un costoso muestreo espacial y no pueden ser generalizadas para todas las áreas forestales. Además, los índices de peligro actuales, calculados a partir de datos procedentes de estaciones meteorológicas, no pueden ser extrapolados espacialmente debido a la dispersión geográfica de los observatorios.

Por ello, varios autores han indicado el interés de las imágenes de satélite, y especialmente de los datos NOAA-AVHRR, para efectuar un seguimiento del contenido de humedad de la vegetación. El principal interés de estos datos es proporcionar, con una gran frecuencia temporal y sobre grandes áreas, una exhaustiva información bien distribuida espacialmente de la humedad del combustible. Desde el punto de vista operacional el uso de los datos procedentes del satélite NOAA-AVHRR presenta varias ventajas. La principal es su resolución temporal (dos imágenes diarias) y su buena resolución espectral (puesto que ofrece información del espectro óptico en las regiones del visible y de los infrarrojos cercano, medio y térmico).

Los dos primeros canales del satélite (rojo, entre 0.58 y 0.68 μm , e infrarrojo cercano, 0.72 a 1.10 μm) permiten el cálculo de índices de vegetación, relacionados con la biomasa verde, la actividad fotosintética (Tucker y Sellers, 1986) e, indirectamente, el contenido de humedad (Paltridge y Barber, 1988); mientras que los dos canales en el infrarrojo térmico (banda 4, de 10.3 a 11.3 μm , y banda 5, 11.5 a 12.5 μm) hacen posible el cálculo de la temperatura de superficie (Vidal, 1991; Kerr *et al.*, 1992). Además, su resolución espacial (1,1 kilómetros en el nadir) permite una integración de las variaciones locales y proporciona una respuesta media bien adaptada a escalas globales (López *et al.*, 1991).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, varios estudios han mostrado el interés de la teledetección para cartografiar el estado hídrico de la vegetación de cubiertas agrícolas (Malingreau y Belward, 1989; Jackson *et al.*, 1983; Vidal y Perrier, 1990; Lagouarde y Brunet, 1991; Seguin *et al.*, 1991, etc.), haciendo referencia algunos de ellos a la estimación del estrés hídrico de los bosques mediterráneos (López *et al.*, 1991;

Vidal *et al.*, 1994; Chuvieco y Martín, 1994; Prosper-Laget *et al.*, 1995; Illera *et al.*, 1996, Vidal y Devaux-Ros, 1995).

A la hora de estimar el estado hídrico de la vegetación podemos distinguir cuatro tipos diferentes de métodos. El primero, en el que se incluyen la mayoría de los mismos, está basado en el estudio de series multitemporales de índices de vegetación, especialmente el NDVI (Paltridge y Barber, 1988; López *et al.*, 1991; Gouyet *et al.*, 1991), o índices derivados de él (Burgan y Hartford., 1993; Alonso *et al.*, 1996).

Un segundo método está basado en el dinamismo térmico de la vegetación como indicador del estrés hídrico. En este apartado, los datos del infrarrojo térmico son combinados con datos meteorológicos –especialmente con la temperatura del aire– para estimar la evapotranspiración de la vegetación (Seguin, 1990; Vidal *et al.*, 1994, Desbois y Vidal, 1996).

Un tercer grupo de investigaciones está orientado a la combinación de índices de vegetación con datos térmicos (Nemani y Running, 1989; Prosper-Laget *et al.*, 1995; Illera *et al.*, 1996, Vidal y Devaux-Ros, 1995).

Finalmente, los datos de radar, que son sensibles al contenido de agua, pueden ser un interesante método para el seguimiento de la humedad del combustible.

3. Metodología

El área elegida para abordar el proyecto 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 el 1 de abril al 30 de septiembre del año 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.

3.1. Medidas de la humedad del combustible

Para el presente proyecto se consideraron de interés el pasto, el matorral y el arbolado como tipos de combustible forestal. Planteamos como hipótesis que el primero determina la probabilidad de ignición de una masa forestal, mientras los dos segundos su 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, localización de las parcelas, toma de muestras y trabajo de laboratorio (Brown *et al.*, 1989; Trowbridge y Feller, 1988; Viegas *et al.*, 1990).

En total se tomaron muestras en seis parcelas, con los siguientes tipos de combustible: pasto, jara, brezo, romero y quejigo. 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).

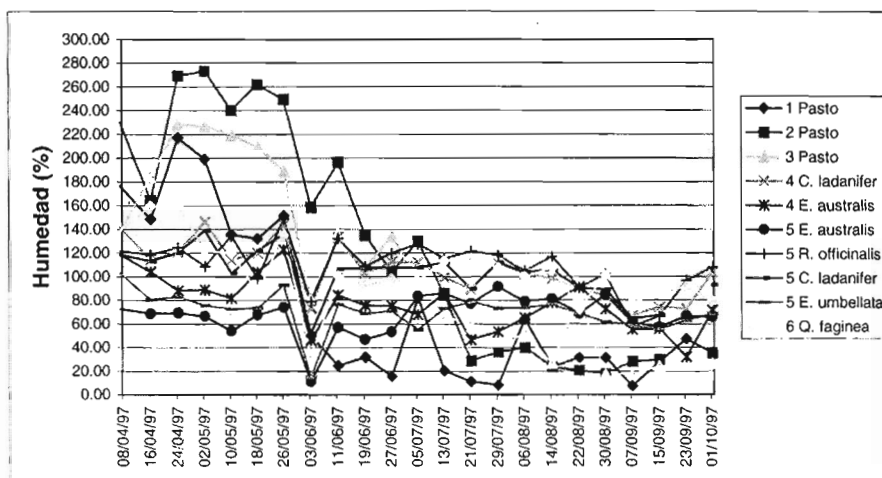
Las muestras se pesaron en campo, se secaron en estufa, a 60°C durante cuarenta y ocho horas, y se pesaron de nuevo con las misma balanza. Con esta información se calculó el contenido de humedad de la vegetación, definida como el peso del agua en función del peso seco:

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

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. Como puede observarse en el gráfico 1, la evolución del contenido de humedad a lo largo del período de estudio muestra una clara tendencia estacional para los pastizales y, en menor medida, algunas especies de matorral, como la jara y el romero. Los valores varían desde 280 % para el pasto en primavera, hasta el 10 % para esa misma cubierta en verano.

3.2. Cálculo de índices meteorológicos de peligro En nuestro caso, restringimos el análisis de los datos meteorológicos a los proporcionados 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.

Gráfico 1: Contenido de humedad de la vegetación



De los índices meteorológicos más comunes en nuestro entorno, hemos seleccionado para este proyecto los empleados por los servicios forestales de Canadá y de España: el *Fire Weather Index* (FWI) (Van Wagner, 1987) y la *Probabilidad de Ignición* (PI) (Vélez, 1985), respectivamente, así como sus sub-índices. La diferencia entre ambos 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.

3.3. Análisis de las imágenes NOAA-AVHRR

Todas las imágenes adquiridas para este proyecto corresponden a la pasada diurna del satélite NOAA-14, adquiridas aproximadamente a las 14,30 h. Incluyen todas las imágenes diarias adquiridas entre el 1 de junio y el 30 de septiembre, y las imágenes correspondientes a varios días de abril y mayo.

Las variables derivadas de las imágenes de satélite que se utilizaron en este proyecto fueron las siguientes: (i) Índices espectrales de vegetación (NDVI); (ii) Índices espectrales de vegetación (SAVI); (iii) Índices espectrales de vegetación (GEMI); (iv) Temperatura de superficie (TS); (v) Diferencia entre la Temperatura de Superficie y la Temperatura del Aire (TS-TA); y (vi) Cociente entre el NDVI y la TS (NDVI/TS).

4. RESULTADOS

4.1. Relación entre humedad de la vegetación e imágenes de satélite

Las correlaciones esperadas entre la humedad del combustible y las imágenes de satélite deberían ser negativas para la temperatura de superficie (TS) y las variables derivadas de ella (diferencia entre la temperatura de superficie y la del aire: TS-TA) y positivas con el índice de vegetación (NDVI) y las variables similares (SAVI, GEMI y el cociente entre el NDVI y la TS).

En el análisis de los datos (tabla 1) se confirman las correlaciones esperadas:

- La temperatura de superficie presenta correlaciones negativas con todas las especies, obteniéndose las correlaciones más elevadas en el caso del pasto.
- Tendencias similares hemos encontrado con la variable TS-TA, que está correlacionada significativamente con todas las especies, aunque con valores algo más bajos que en el caso de la TS.
- El cociente NDVI/TS presenta las mejores correlaciones con la humedad del combustible de todas las variables de satélite. Estas correlaciones son significativas para el pasto, la jara, el quejigo y el brezo.
- De todos los índices de vegetación, el SAVI presenta mejores correlaciones que el NDVI para la mayoría de las especies, pero las diferencias entre ellos son, generalmente, pequeñas. Por su parte, el GEMI presenta unos valores intermedios entre los dos índices anteriores.

Tabla 1: Correlación de Pearson entre humedad de la vegetación e imágenes de satélite

	NDVI	SAVI	GEMI	TS	TS-TA	NDVI/TS
Pasto (1)	0.713	0.765	0.784	-0.765	-0.694	0.889
Pasto (2)	0.589	0.722	0.722	-0.768	-0.572	0.776
Pasto (3)	0.406	0.521	0.484	-0.762	-0.643	0.725
Cistus ladanifer (4)	0.498	0.628	0.412	-0.594	-0.676	0.624
Erica umbellata (5)	0.360	0.279	0.009	-0.409	-0.580	0.464
Rosmarinus officinalis (5)	0.423	0.451	0.268	-0.475	-0.403	0.492
Cistus ladanifer (5)	0.703	0.684	0.522	-0.615	-0.581	0.678
Erica australis (5)	0.645	0.810	0.738	-0.580	-0.588	0.658
Quercus faginea (6)	0.388	0.269	0.001	-0.603	-0.590	0.603

4.2. Relación entre humedad del combustible e índices meteorológicos

Nuestra hipótesis de partida era que el DC (Drought Code), subíndice del sistema canadiense que intenta estimar la cantidad de agua retenida en el suelo y está asociado con

los combustibles pesados (25 Kg/m^2), estaría más relacionado con la humedad de la vegetación de las plantas vivas que los otros índices, incluso que los índices finales FWI y PI, puesto que las especies vivas son menos dependientes de la variación atmosférica a corto plazo.

La tabla 2 muestra los resultados de la correlación de Pearson. Como suponíamos, el DC presenta las mejores correlaciones con la humedad del combustible, especialmente con el pasto y la jara. 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 humedad del combustible que el español; mientras que la humedad básica del combustible (HBC), índice intermedio en el sistema español, presenta valores intermedios entre los dos.

Tabla 2: Correlación de Pearson entre humedad de la vegetación e índices meteorológicos

	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	HBC	PI
Pasto (1)	-0.202	-0.070	-0.576	-0.385	-0.274	-0.358	0.421	-0.330
Pasto (2)	-0.413	-0.497	-0.819	-0.516	-0.660	-0.598	0.428	-0.475
Pasto (3)	-0.236	-0.369	-0.790	-0.324	-0.558	-0.425	0.308	-0.293
Cistus ladanifer (4)	-0.360	-0.509	-0.775	-0.492	-0.639	-0.579	0.292	-0.323
Erica umbellata (5)	-0.213	-0.246	-0.610	-0.333	-0.403	-0.367	0.168	-0.106
Rosmarinus officinalis (5)	-0.454	-0.546	-0.672	-0.533	-0.636	-0.611	0.335	-0.385
Cistus ladanifer (5)	-0.478	-0.584	-0.813	-0.547	-0.717	-0.644	0.369	-0.447
Erica australis (5)	-0.336	-0.298	-0.640	-0.327	-0.459	-0.401	0.228	-0.242
Quercus faginea (6)	-0.116	-0.186	-0.649	-0.303	-0.374	-0.332	0.276	-0.049

5. 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.

Parece claro que la evolución multitemporal de la humedad del pasto puede ser correctamente estimada con los datos de satélite, preferentemente por la TS o por el cociente NDVI/TS. 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 la más alta proporción entre materia verde y materia leñosa y, por tanto, puede ser fácilmente discriminado por los

datos de satélite. Consecuentemente, el verdor y la amarillez del pasto es claramente representada tanto en los índices de vegetación como en la temperatura de superficie.

Si solamente se considerase el verano, la correlación de la humedad del combustible y los datos de satélite decrecería, puesto que el pasto se comporta de manera similar a la vegetación muerta a partir de un cierto nivel de sequedad. Dos de las tres parcelas de pasto muestreadas reducen drásticamente su coeficiente de correlación cuando solamente se considera el periodo comprendido entre junio y septiembre.

En cuanto a los índices meteorológicos de peligro, el código DC es la variable meteorológica más relacionada con la humedad del combustible 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.

En consecuencia, parece razonable realizar un análisis integrado satélite-meteorología para elaborar índices más ajustados al riesgo, siguiente objetivo de nuestro trabajo.

6. 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).

7. REFERENCIAS

ALONSO, M., CAMARASA, A., CHUVIECO, E., KYUN, I.A., MARTIN, 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*, 4-4, pp. 9-21.

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

BURGAN, R. E. y HATFORD, R.A. (1993): Monitoring vegetation greenness with satellite data, USDA Forest Service, INT-297, Ogden.

CARREGA, P. (1991): A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. *International Journal of Wildland Fire*, 1 (2), pp. 79-86.

CHUVIECO, E. y MARTIN M.P. (1994): Global Fire mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, pp. 563-570.

DESBOIS, N. y VIDAL, A. (1996): Real Time monitoring of vegetation flammability using NOAA-AVHRR thermal infrared data. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 4-4, pp. 25-32.

- GOUYET, J.F., KING, C., LE GLEAU, H., MALON, J.F., PHULPIN, T. y VALETTE, J.C. (1991): Apport des données satellitaires NOAA-AVHRR dans le suivi de la végétation forestière. *Proc. 5th Int. Coll. - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-18 January 1991. ESA SP-319, May 1991, pp. 625-630.
- ILLERA, P., FERNANDEZ, A., CALLE, A. y CASANOVA, J.L. (1996): Evaluation of fire danger in Spain by means of NOAA AVHRR images. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 4-4, pp. 33-43.
- JACKSON, R.D., HATFIELD, J.L., REGINATO, R.J., IDSO, S.B., y PINTER, P.J. JR. (1983): Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural and Water Management*, 7, pp. 351-362.
- KERR, Y.H., LAGOUARDE, J.P. e IMBERNON, J. (1992): Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split-window algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 41, pp. 197-209.
- LAGOUARDE, J.P. y BRUNET, Y. (1991): Suivi de l'évapotranspiration journalière à partir des données NOAA-AVHRR lors de la campagne HAPEX-MOBILHY. *Proc. 5th Int. Coll. - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-18 January 1991. ESA SP-319, May 1991, pp. 569-572.
- LÓPEZ, S., GONZÁLEZ, F., LLOP, R. y CUEVAS, M. (1991): An evaluation of the utility of NOAA-AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp 1841-1851.
- MALINGREAU, J.P y BELWARD, A.S. (1989): Vegetation monitoring using AVHRR data at different resolutions. *Proc. of the 4th NOAA-AVHRR data users meeting*, pp. 141-144.
- NEMANI, R.R. y RUNNING, S.W. (1989): Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28 (4), pp. 276-274.
- PALTRIDGE, G. W. y BARBER, J. (1988): Monitoring Grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA - AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 25, pp. 381-394.
- PROSPER-LAGET, V., DOUGUEDROIT, A. y GUINOT, J.P. (1995): Mapping the risk of forest fire occurrence using NOAA satellite information. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 4 (3-XII), pp. 30-38.
- SEGUIN, B. (1990): La température de surface d'un couvert végétal et son état hydrique. Possibilités d'application à la surveillance des forêts par satellite. *Revue Forestière Française*, XLII, pp. 106-111.
- SEGUIN, B., LAGOUARDE, J.P. y SAVANE, M. (1991): The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 35, pp. 141-148.
- 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, *Can. J. For. Res.*, 18, pp. 128-131.
- TUCKER, C.J. y SELLERS, P.J. (1986): Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11), pp. 1395-1416.
- 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, en *Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales*, Madrid, ICONA, pp. 15-19.

VIDAL, A. y PERRIER, A. (1990): Irrigation monitoring by following the water balance from NOAA-AVHRR thermal IR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, pp. 949-954.

VIDAL, A. (1991): Atmospheric and emissivity corrections of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (12), pp. 2449-2460.

VIDAL, A., PINGLO, F., DURAND, H., DEVAUX-ROS, C. y MAILLET, A. (1994): Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forests from NOAA thermal IR. *Remote Sensing of Environment*, 49, pp. 296-303.

VIDAL, A. y DEVAUX-ROS, C. (1995): Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, pp. 207-224.

VIEGAS, D.X., VIEGAS M.P. y FERREIRA, A.D. (1990): "Characteristics of some forest fuels and their relation to the occurrence of fires", *International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. B.03-1 a 13.