

Comparación Estadística de Métodos Tradicionales de Interpolación e Imágenes NOAA-AVHRR para Valorar el Peligro de Incendio

Inmaculada Aguado

Emilio Chuvieco

Javier Salas

Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

Colegios, 2. 28801. Alcalá de Henares (Madrid).

Resumen

Tradicionalmente, la estimación del peligro de incendio se efectúa a partir de los denominados índices meteorológicos de peligro. Uno de los principales problemas de estos índices proviene de la dificultad de extrapolar la información obtenida en estaciones meteorológicas al resto del territorio. Generalmente, se recurre a la utilización de métodos de interpolación, si bien se han detectado errores en la estimación de algunas variables meteorológicas de elevada variabilidad espacial. Frente a este método de predicción del peligro de incendios se considera cada vez mas la posibilidad de utilizar imágenes de satélite para resolver estos problemas.

En este trabajo presentamos la distribución espacial del índice canadiense DC (*Drought Code*), en la región de Andalucía, siguiendo dos procedimientos. Por un lado, se realizó la interpolación espacial aplicando la inversa de la distancia al cuadrado, y por otro, una interpolación obtenida a partir de ecuaciones de regresión utilizando como variables independientes diferentes medidas procedentes de imágenes NOAA-AVHRR y una variable auxiliar. La comparación de los resultados de ambos métodos de estimación del peligro de incendio parece indicar que las imágenes de satélite pueden ser una herramienta útil para valorar el peligro de incendio.

1. Introducción

Desde el punto de vista de la prevención de incendios forestales, la utilidad de predecir la variación del peligro en un período determinado, reside fundamentalmente en la posibilidad de organizar el servicio de prevención y vigilancia, así como optimizar la localización y preparación de los medios necesarios para la extinción.

Dentro del ámbito de los sistemas de prevención de incendios la utilización de información meteorológica tiene una larga tradición. Una de las líneas de trabajo más desarrollada en el campo de la prevención es el diseño de índices meteorológicos de peligro (IMP), que son instrumentos de predicción que sintetizan a partir de un indicador numérico o cualitativo el efecto de las condiciones meteorológicas pasadas y presentes en el estado hídrico del combustible.

Sin embargo, el empleo de estos índices de peligro plantea una serie de problemas. Por un lado, la red de estaciones meteorológicas no posee, en general, una distribución espacial adecuada para estos fines, ya que en muchos casos estos observatorios se sitúan en lugares alejados de las masas forestales. Por tanto, sería necesario realizar extrapolaciones a partir de mediciones atmosféricas realizadas, posiblemente, lejos del lugar de aplicación. Esto es particularmente complicado en el caso de topografías complejas y con variables como la precipitación o la humedad relativa, que son claves en el momento de determinar el peligro de incendio (Flannigan y Wotton, 1989; Flannigan et al., 1998). Por otro lado, sería necesario extender los valores obtenidos en las estaciones meteorológicas al resto del territorio, puesto que las mediciones realizadas para estos índices tienen carácter puntual (Aguado y Camia, 1998). El resultado, siguiendo métodos de interpolación espacial, es bastante preciso si el número de puntos de observación es elevado y su distribución espacial es adecuada, pero esta situación no suele ser la más frecuente.

Finalmente, otro aspecto no resuelto totalmente en los IMP es la estimación de las condiciones hídricas en los combustibles vivos. Se asume una asociación directa entre estos índices y el estado de la vegetación, pero esto es sólo cierto en el caso de los combustibles muertos, en los que el contenido de humedad está, casi exclusivamente, controlado por las condiciones atmosféricas. En este sentido, se ha comprobado que existe una buena correlación entre el contenido de humedad del combustible muerto medido en el terreno y las estimaciones realizadas a partir de diferentes IMP (Trowbridge y Feller, 1988; Vega y Casal, 1986; Carlson et al., 1996). Sin embargo, las estimaciones del contenido hídrico de la vegetación viva realizadas a partir de estos índices han sido inconsistentes con algunas mediciones realizadas sobre el terreno (Brown et al., 1989 y Trowbridge y Feller, 1988). En espacios mediterráneos, por el contrario, se han observado resultados aceptables en la correlación establecida entre el código de humedad canadiense DC y el contenido de humedad en especies herbáceas y matorrales mediterráneos (Cocero et al., 1998; Viegas et al., 1998). La variación hídrica en combustibles vivos y su estimación, hasta el momento, no ha sido muy estudiada.

Frente a estos problemas, numerosos autores han señalado el interés de utilizar imágenes de satélite para efectuar un seguimiento y valoración del peligro de incendio, principalmente por su capacidad en proporcionar información sobre áreas extensas, a veces inaccesibles, con la frecuencia temporal que requiere esta variable (Paltridge y Barber, 1988; Chadil y Nunez, 1995; Burgan et al., 1998). Por otro lado, a diferencia de los índices meteorológicos que estiman el estado de la vegetación a partir de las condiciones meteorológicas, la información que nos ofrecen los satélites sobre la cubierta forestal es directa y sintetiza la influencia de factores atmosféricos, biológicos y edáficos.

Debido a la frecuencia temporal que requiere el seguimiento de las condiciones de peligro de incendio, uno de los sensores más utilizados en este tipo de estudios ha sido el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo del satélite meteorológico NOAA (*National Oceanic and*

Atmospheric Administration). Su resolución temporal permite disponer, en condiciones óptimas, de dos imágenes diarias, una de ellas en las horas centrales del día, período considerado el más crítico respecto al estrés hídrico. Por otro lado, este sensor posee una adecuada resolución espectral que ofrece información de la región visible, infrarrojo cercano, medio y térmico. Finalmente, la resolución espacial del AVHRR (1,1 Km² en torno al nadir) es adecuada, principalmente para trabajos a escala regional (Cracknell, 1997).

Numerosos estudios que utilizan la teledetección para estimar el peligro de incendio se basan en el análisis de los denominados índices de vegetación (IV). El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), uno de los índices espectrales más utilizados en este contexto, ha sido empleado en diferentes trabajos en la determinación del contenido de humedad (Westman y Price, 1988; Cibula et al., 1992, Deshayes et al., 1998). El NDVI puede definirse como:

$$NDVI_i = \frac{r_{i,IRC} - r_{i,R}}{r_{i,IRC} + r_{i,R}} \quad (1)$$

donde $r_{i,IRC}$ y $r_{i,R}$ indican la reflectividad del píxel i en el infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente.

No obstante, la mayoría de los trabajos encaminados a valorar el peligro de incendio no utilizan el NDVI, como lo hemos definido anteriormente, sino a través de índices derivados del mismo. Algunos autores utilizan el denominado porcentaje de Verdor Relativo que estima las condiciones de vigor vegetal en un área como una función de la variación del verdor estacional en ese área (Eidenshink et al., 1989; Burgan et al., 1998). Por consiguiente, se normaliza el verdor de una zona, en una fecha determinada, con relación a la variación estacional del NDVI en dicha zona. El Verdor Relativo ha ofrecido resultados prometedores en un estudio desarrollado en nuestro país que intentaba relacionar la humedad de diferentes especies vegetales (*Cistus ladanifer* y *Rosmarinus officinalis*) con diferentes índices procedentes del satélite NOAA-AVHRR (Alonso et al., 1996).

En la prevención de incendios forestales, además de los índices de vegetación, se ha utilizado la información procedente de los canales térmicos (Vidal et al., 1994; Desbois y Vidal, 1995; Desbois y Vidal, 1996). Estos métodos presuponen que el peligro de incendio se puede detectar a partir de la temperatura de la cubierta vegetal, debido a la relación existente entre la temperatura superficial y el estrés hídrico. El fundamento físico de esta relación se basa en la asunción de que la transpiración, en condiciones de adecuada disponibilidad hídrica, evapora el agua y enfría las hojas por debajo de la temperatura del aire que las envuelve. Por el contrario, bajo situaciones de abastecimiento hídrico limitado, la transpiración se reduce y la temperatura foliar aumenta debido a que no existe ese efecto de enfriamiento por pérdida de calor latente.

Finalmente, algunos autores han destacado que la combinación de canales térmicos y reflectivos mejora la interpretación de la señal procedente de las bandas térmicas. Nemani y Running (1989) sugieren considerar la pendiente de la relación entre TS y NDVI como un indicador del cociente entre la evapotranspiración actual y potencial; cociente que se puede considerar un indicador del estrés hídrico vegetal, por lo que se ha propuesto por varios autores como un índice de peligro de incendio. En este contexto, la pendiente de TS y NDVI ha permitido en la región mediterránea francesa delimitar varias clases en el riesgo de incendio (Prosper-Laget et al., 1995). En nuestro país Alonso et al. (1996) obtuvieron correlaciones >0,8 entre el contenido de humedad en determinadas especies de matorral y el cociente de NDVI/TS. Por su parte, Vidal y Devaux-Ros (1995) utilizan el índice *WDI* (*Water Deficit Index*), en el ámbito de los incendios forestales para predecir la probabilidad de incendios en los bosques mediterráneos franceses. El WDI es un índice que pretende estimar el estrés hídrico en áreas parcialmente cubiertas de vegetación. Este método se basa en la representación gráfica de la proporción de cubierta vegetal y la diferencia entre la temperatura superficial y temperatura del aire ($TS - T_a$) medidas en cada píxel de la imagen.

2. Hipótesis y objetivos

El intercambio de humedad en el sistema suelo-planta-atmósfera depende en gran medida del contenido de humedad disponible en el suelo. Por consiguiente, si la disponibilidad de agua es limitada diferentes mecanismos fisiológicos restringen el flujo de agua a la atmósfera.

El código de humedad canadiense DC mide el contenido de humedad en las capas más profundas del suelo. El suelo pierde humedad de forma exponencial, principalmente debido a dos factores: la precipitación y la evapotranspiración. Esta pérdida de humedad es lenta, por tanto este índice está preparado para valorar la variación del peligro de incendio a largo plazo. Debido a que los combustibles vivos obtienen humedad de las capas más profundas del suelo, el DC debería estar más relacionado con el contenido de humedad de los combustibles vivos que otros IMP. Por otro lado, este índice debería estar más relacionado con la información procedente de satélite que otros IMP que miden la humedad en los combustibles muertos, ya que el sensor capta la radiación procedente del dosel arbóreo no de la vegetación muerta depositada en el sotobosque.

De acuerdo con estas premisas el objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología que permita obtener información procedente de la imagen para realizar una estimación del peligro de incendio a partir del código canadiense DC.

3. Área de estudio

Este trabajo pretende realizar una predicción del peligro de incendio a escala regional, para ello se ha elegido como área de estudio la Comunidad Autónoma de Andalucía (87.000 km²). Con el fin de ensayar la metodología propuesta en diferentes ámbitos parecía necesario elegir una zona con una variación suficiente desde el punto de vista bioclimático. Por otro lado, el análisis de los datos comprende la primavera y el verano de los años 1994 a 1997 con el objetivo de contemplar la variación estacional e interanual en los resultados. Aunque en nuestro país el período de incendios se restringe a los meses de Junio a Septiembre hemos considerado conveniente incluir el período primaveral para recoger más adecuadamente la variabilidad espectral de la vegetación y su influencia en las condiciones de peligro de incendio.

La información meteorológica base para estimar el código canadiense DC se obtuvo a partir de 30 estaciones meteorológicas (Figura 1). Dichas estaciones son representativas de las distintas regiones climáticas definidas por el grupo de climatología de la A.G.E (ANAYA, 1996).

El valor diario del DC se obtuvo a partir de los datos meteorológicos procedentes de 30 estaciones automáticas que cumplieren con dos características. Por un lado, era necesario que estuviesen próximas a zonas forestales, y por otro, que tuviesen una serie de observaciones lo más completa posible a lo largo del período de estudio. Las variables procesadas fueron la temperatura del aire registrada a las 14:30 y la precipitación acumulada en las últimas 24 horas. El análisis de los datos meteorológicos se efectuó desde los meses de Febrero a Septiembre con un número variable de estaciones meteorológicas en función de la disponibilidad de datos.

A partir de los datos puntuales de DC se obtuvo una imagen continua del fenómeno para toda la región, después de interpolar espacialmente los valores de las estaciones.

Datos de satélite

Las imágenes utilizadas en este proyecto fueron tomadas por el satélite NOAA-AVHRR 14 en su pasada diurna (en torno a las 14:30 horas). En dos de los años analizados (1994-95) sólo se dispone de imágenes en los últimos 10 días de cada mes durante la primavera, mientras que en el verano (Julio-Septiembre) se han utilizado series diarias de imágenes. Después de seleccionar aquellas imágenes con una calidad geométrica y radiométrica adecuada y descartar algunas imágenes debido a su cobertura nubosa se dispuso de un total de 303 imágenes. Todas ellas fueron corregidas geoméricamente a partir de puntos de control para garantizar el ajuste multitemporal y proyectadas a UTM (huso 30 extendido). Para reducir el efecto de dispersión atmosférica y los problemas derivados del ángulo de observación las imágenes diarias se sintetizaron utilizando la técnica de compuestos de máximo valor (Holben, 1986). Estos compuestos ofrecen a partir de imágenes diarias (10 días en nuestro trabajo) una imagen sintética que retiene el valor máximo de la serie.

Las variables generadas a partir de estas imágenes fueron: NDVI, Verdor Relativo (VERDR), Temperatura de Superficie (TS), la diferencia entre la temperatura de superficie y la del aire (TS-Ta) y el cociente entre el NDVI y la TS (NDVI/TS).

Extracción y análisis de la información

Los datos obtenidos de la imagen proceden de una ventana de 3*3 píxeles centrada sobre cada una de las estaciones meteorológicas, para evitar los posibles errores de la corrección geométrica. El valor representativo de esta ventana fue la mediana, debido a que era más eficaz en reducir los valores anómalos.

Por su parte, el índice meteorológico DC obtenido diariamente en cada estación también se sintetizó en períodos de 10 días para que fuera posible su comparación con la información derivada de la imagen. De este modo se obtuvieron, según el año de estudio, un total de 13 a 17 períodos entre la primavera y el verano.

Se seleccionaron 3 períodos, considerados como representativos de la variación estacional del DC, con el fin de facilitar el análisis de los datos y la interpretación de los resultados. El primer compuesto corresponde al final de la primavera (MAY), momento en que el índice ha recogido durante un tiempo suficiente el efecto de las condiciones meteorológicas que influirán en el período de incendios. El segundo período analizado, corresponde a la primera decena del mes de Julio (JUL), cuando el peligro de incendio suele ser elevado debido a la combinación de elevadas temperaturas y a la escasez de precipitaciones. El tercer período, a finales del verano (SEPT), posee generalmente un peligro de incendio más acusado por efecto de la acumulación de las condiciones meteorológicas habidas a lo largo del verano. En cada período el valor del índice puede descender por efecto de las

tormentas estivales, este hecho introduce una cierta variabilidad espacial dentro de la tendencia general.

Los datos obtenidos para el DC en cada estación fueron sometidos a un análisis de correlación con las variables de satélite antes señaladas. Este análisis fue realizado desde el punto de vista espacial para determinar si las grandes diferencias espaciales influyen en las relaciones entre ambos tipos de información, así como temporal para observar las relaciones entre el comportamiento temporal del DC y el de las variables de satélite. Los análisis de correlación fueron realizados con los datos de las imágenes para todos los períodos disponibles en los años 1994-97.

Finalmente, la estimación del DC a partir de las imágenes de satélite se realizó a partir de las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas para los 3 períodos señalados anteriormente. Se utilizó un método exclusivo de selección de variables significativas entre los dos tipos de información, tomando como variable dependiente el DC y las independientes las variables de satélite mas una variable auxiliar que considera el efecto de la duración del día en la estimación del DC.

5. Resultados

La estimación del DC con el método de interpolación espacial por la inversa de la distancia indicó que dicho índice alcanza sus valores más bajos en el primer período (finales de mayo) y su mayor intensidad en septiembre (Figura 2). Los valores máximos y mínimos varían en función de los años, siendo los años 1994 y 1995 los que presentan valores de peligro más elevados. En el período de septiembre, en estos años, la mayoría de la región alcanza valores superiores a 1050, mientras que en esta misma fecha el año 1997 no supera valores de 900 o incluso encontramos en las Sierras de Cazorla y Segura o en las serranías del norte de Huelva valores inferiores a 750. En este año, 1997 y también en el 1996 observamos valores de peligro bastante bajos durante el período de Julio, fruto de un verano más húmedo de lo habitual.

La precisión del método, evaluada en función del porcentaje de variación alcanzado por la diferencia entre valor observado y estimado respecto del valor observado para algunas estaciones reservadas para la verificación, fue satisfactoria (en el 60% de los casos menor al 20% y sólo el 20% del total de los datos tienen errores superiores al 30%). Se observa una ligera tendencia hacia la infraestimación de los valores, así mismo se aprecia que los errores mayores se producen durante la primavera, momento en que el peligro de incendio todavía no es elevado.

En cuanto a los resultados obtenidos de los análisis de correlación, el análisis espacial realizado entre los datos de los 12 períodos demostró que el DC está más relacionado con el NDVI y el cociente NDVI/TS, es decir, las variables que sufren una variación estacional más lenta a lo largo de la primavera y el verano. Si analizamos esta relación en función de los períodos incluidos no encontramos una tendencia clara, si bien en los años 1994 y 1995 las correlaciones más altas se producen en el período de julio, probablemente debido a que fueron años extremadamente secos y existía poca variación entre las distintas zonas de la región. Con respecto a las correlaciones temporales, la variable correlacionada de manera significativa con el DC es nuevamente el NDVI, sobre todo en los años 1995 a 1997 con un total del 80 % de las estaciones que superan el nivel de confianza del 95%. Unos resultados similares fueron obtenidos en un trabajo anterior, si bien el número de estaciones utilizadas en ese caso era menor y el período de estudio comprendía sólo 2 años (Aguado et al., 1998). La explicación podría encontrarse en que el NDVI tiene una oscilación lenta acorde con las variaciones a largo plazo del índice canadiense. El cociente NDVI/TS también presenta correlaciones significativas para la mayoría de las estaciones en los años 1996 y 1997.

Las buenas correlaciones obtenidas entre el DC obtenido a partir de los datos meteorológicos y las variables derivadas de satélite permitieron estimar el DC a partir de los datos de la imagen de satélite, para lo cual se aplicó el análisis de regresión múltiple previamente señalado. Se realizaron varios ensayos con el objetivo de obtener una ecuación válida para el mayor número posible de observaciones. La exploración de los datos nos indicó la presencia de la situación comentada en los mapas anteriores, es decir, dos años con valores más elevados de DC (1994-1995) y los años restantes con valores más bajos. El ajuste por años mejoraba cuando se relacionaban estos dos grupos por separado (r^2 corregido = 0,78 para los años 1994-1995 y r^2 corregido = 0,81 en los años 1996 y 1997). Ahora bien sería difícil indicar al comienzo de la estación de incendios las características del año en curso para aplicarle una ecuación u otra. Por esta razón, se intentó el ajuste con una ecuación de regresión obtenida a partir de todos los períodos considerados en el estudio (mayo-julio-septiembre) y todos los años (1994-1997). El ajuste continuaba siendo aceptable (r^2 corregido = 0,73) si bien existía una tendencia a infraestimar los valores más altos del índice, lo cual podría ser un problema para la utilización del índice desde un punto de vista operativo. En todos los análisis de regresión las variables seleccionadas fueron el Verdor Relativo, la Temperatura de Superficie y el número de horas solares.

Finalmente, los mejores resultados se obtuvieron al considerar una ecuación de regresión común para todos los años que variaba según el período considerado. De este modo dispusimos de 3 ecuaciones (mayo, julio y septiembre) para realizar la estimación de DC en cada uno de esos períodos.

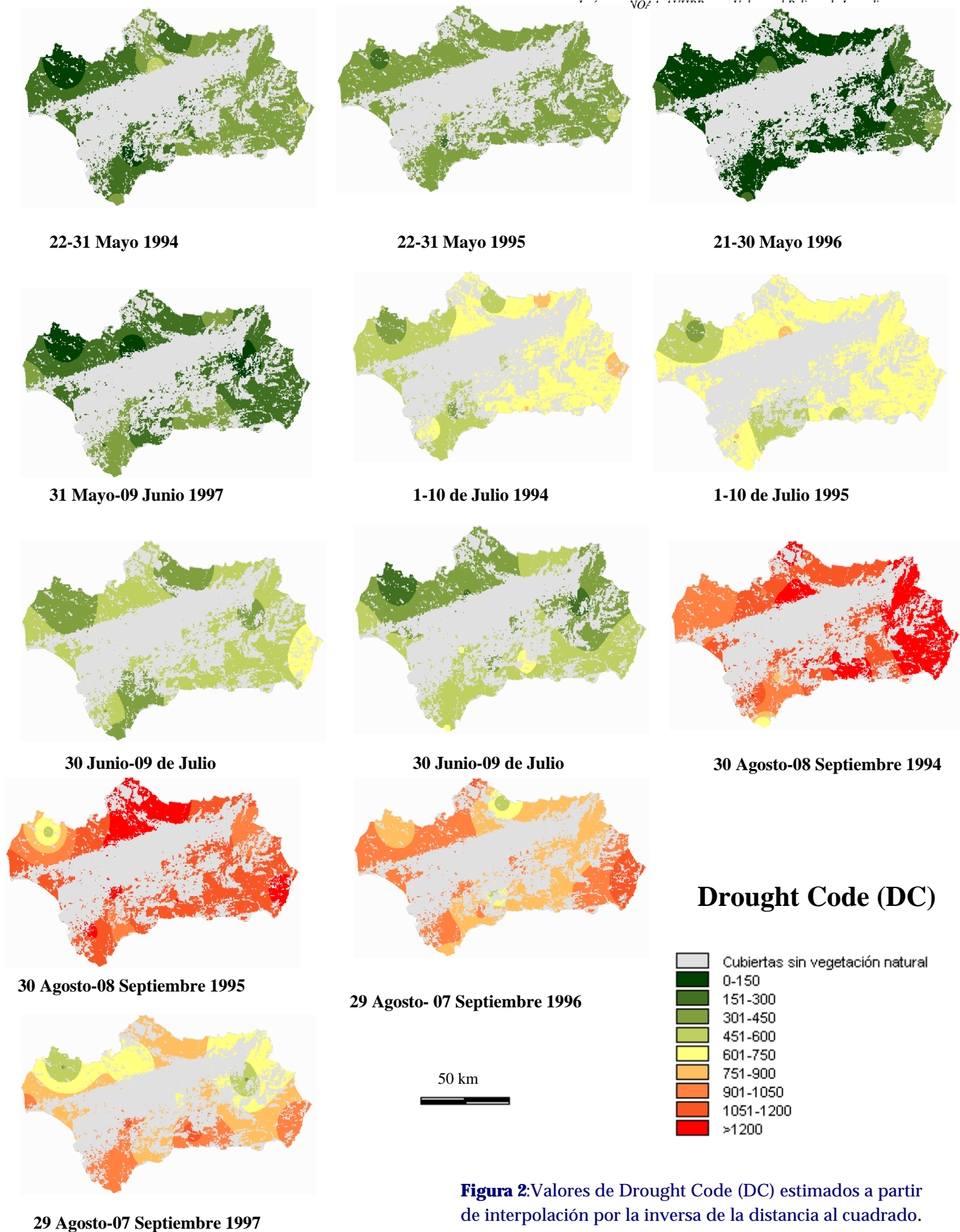


Figura 2: Valores de Drought Code (DC) estimados a partir de interpolación por la inversa de la distancia al cuadrado.

Las variables independientes que seleccionaba el modelo de regresión eran nuevamente VERDR, TS y número de horas solares, lo cual indica la solidez de estas medidas para estimar el índice canadiense. Los resultados mostraron que en cada una de estos períodos el valor de r^2 es más bajo, si bien estas ecuaciones reducen de forma importante el valor medio de los residuales. La comparación de los valores observados y estimados según esta ecuación, para todos los años y períodos, alcanza una correlación de 0,90 (Figura 3).

La aplicación de la ecuación correspondiente a cada período permitió obtener una imagen continua de los valores de DC estimados a partir de las variables procedentes de la imagen (VERDR, TS) y la variable auxiliar número de horas solares (Figura 4). Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$DC_{\text{estim_mayo}} = 3548,01 + 0,61 \cdot \text{VERDR} + 17,06 \cdot \text{TS} - 276,79 \cdot \text{durac_dia} \quad (2)$$

$$DC_{\text{estim_julio}} = 7567,67 - 1,61 \cdot \text{VERDR} + 7,13 \cdot \text{TS} - 503,05 \cdot \text{durac_dia} \quad (3)$$

$$DC_{\text{estim_sept}} = 53103,46 - 1,15 \cdot \text{VERDR} + 8,46 \cdot \text{TS} - 4139,49 \cdot \text{durac_dia} \quad (4)$$

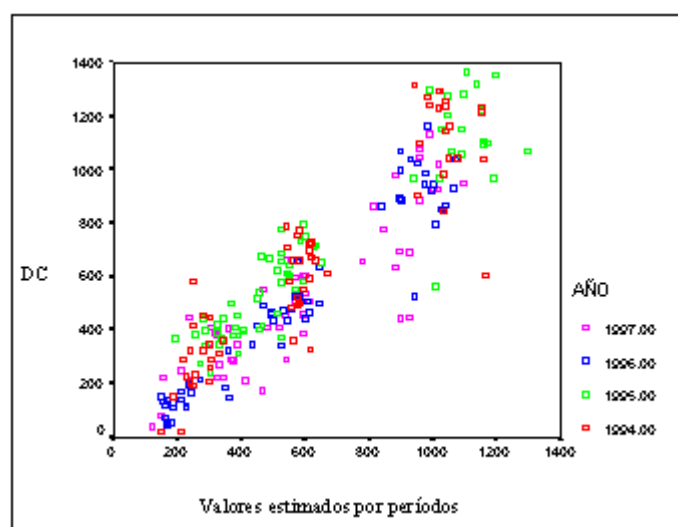


Figura 3: Dispersión valores observados y estimados del índice canadiense DC obtenido a partir de distintas ecuaciones en cada período.

En la figura 4 se puede observar como los valores de DC se incrementan a medida que avanzamos en la estación de incendios, de este modo los valores más elevados se registran en el período de septiembre. En este período, en los años 1994 y 1995 se encuentran nuevamente los valores máximos, la mayor parte de la región registra valores entre 900-1200. Por el contrario, los años 1996 y 1997 presentan valores de peligro más bajos, el sector oriental de la región presenta los valores más bajos (700-900).

El nivel de precisión de las ecuaciones obtenidas fue valorado a través del porcentaje de variación entre el valor obtenido de DC con datos meteorológicos (valores observados) y el obtenido a partir de las ecuaciones de regresión (valores estimados). Los resultados varían según el período considerado, de este modo los porcentajes de variación mayores se obtienen en el primer período (finales de mayo), donde el 55% de las observaciones efectuadas en las estaciones de verificación poseen un porcentaje de variación superior al 30%. En general, en este período se produce una infraestimación de los valores de DC.

Las estimaciones mejoran a medida que avanza el verano y en el segundo período (principios de julio) el 65% de las observaciones poseen un margen de error en la estimación inferior al 20%.

Como sucedía en el período anterior, la ecuación de regresión infraestima los valores del índice canadiense. Si analizamos los resultados por años, observamos que en esta fecha los mayores residuales se alcanzan en el año 1995. En la serie de imágenes presentada se puede observar la infraestimación del DC en este año.

El último período (finales de agosto-principios de septiembre) ofrece las mejores estimaciones, todas las observaciones poseen una variación inferior al 20% y en el 47% de ellas la diferencia entre valores observados y estimados es inferior al 10%. En general, como sucede con otros períodos se produce una infraestimación de los valores del DC.

En resumen, los resultados permiten predecir con una aproximación aceptable el peligro de incendio en la región. La elevada variación existente entre los valores estimados y observados en el comienzo de la estación de incendios hace necesario seguir investigando, si bien se trata de un momento en que la incidencia de incendios en esta región no es muy acusada.

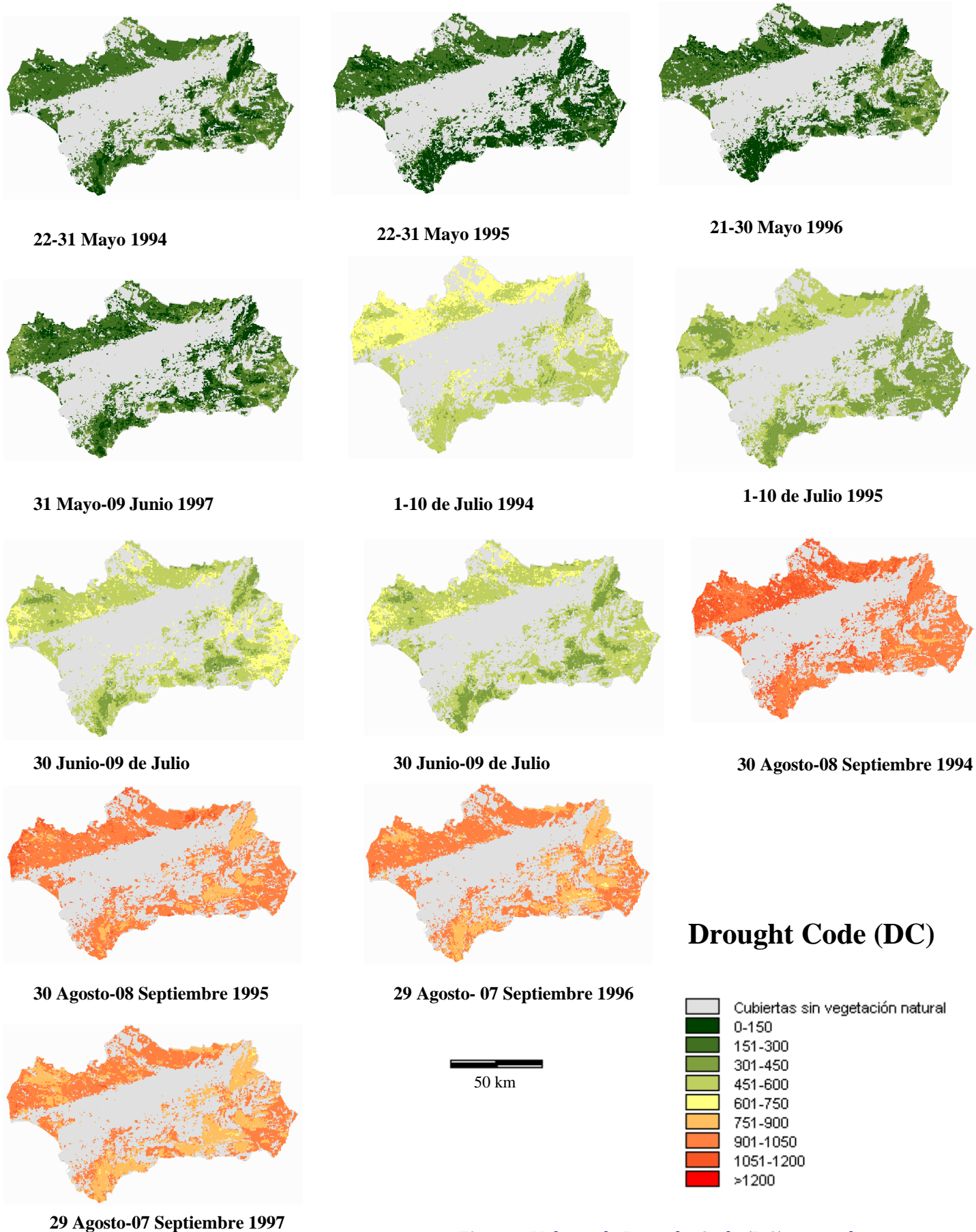


Figura 4: Valores de Drought Code (DC) estimados a partir de la ecuación de regresión múltiple.

6. Conclusiones

El método que utilizan los servicios forestales canadienses o estadounidense para estimar espacialmente el peligro de incendio está basado en la interpolación de los índices meteorológicos por la inversa de la distancia, por tanto, en nuestro trabajo fue el método seleccionado. Hemos obtenido resultados satisfactorios con esta técnica de interpolación, como lo demuestra la verificación en las estaciones test (60% de las observaciones con un porcentaje de variación entre los valores observados y estimados del 20%). Por su parte, la estimación del índice canadiense a partir de las ecuaciones de regresión obtenidas de las imágenes de satélite ofrecen un porcentaje de variación algo más favorable en el período de Julio y las mejores estimaciones en el último período donde todas las observaciones poseen una variación inferior al 20%, y en el 47% de ellas los residuales son inferiores al 10%. Por tanto, los resultados obtenidos han mostrado la utilidad de la teledetección en la determinación de índices meteorológicos de peligro de incendio a escala regional.

Las correlaciones entre el DC y la información obtenida de las imágenes de satélite demostraron que ambos tienen un aspecto en común, el cual está relacionado con la estimación del contenido de humedad del combustible. El índice DC intenta predecir la cantidad de combustible disponible para la ignición considerando una serie de variables meteorológicas que influyen en el contenido de humedad del suelo. La imagen nos proporciona información relacionada con el vigor de la vegetación, mucho más dependiente del contenido de humedad del combustible.

Los resultados de estos análisis confirman nuestra hipótesis inicial, debido a que los índices meteorológicos que estiman la humedad en combustibles más pesados, poseen una tendencia marcadamente estacional y están claramente relacionados con los datos de satélite, especialmente los índices espectrales de vegetación. Esta similitud, a pesar de las distintas características meteorológicas en los años considerados y de la variabilidad espacial que ofrecen las estaciones meteorológicas, supone un argumento sólido para el uso de la información de satélite en la estimación de índices meteorológicos de peligro y, por consiguiente, para valorar el grado de humedad en las capas profundas del suelo y la humedad disponible para la vegetación.

No obstante, somos conscientes de que los modelos habrían sido calibrados con mayor precisión al disponer de una red de estaciones meteorológicas más densa que permitiese considerar algunos espacios con una alta variabilidad espacial.

7. Bibliografía

- Aguado, I., E. Chuvieco, et al. (1998): Estimation of Meteorological Fire Danger Indices from Multitemporal Series of NOAA-AVHRR data. III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Coimbra, ADAI.
- Aguado, I, Camia, A (1998): Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendios. Serie Geográfica. 7: 49-58
- Alonso, M., A. Camarasa, et al. (1996): Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. EARSSEL Advances in Remote Sensing **4**(4): 9-24.
- Brown, J. K., G. D. Booth, et al. (1989): Seasonal Change in Live Fuel Moisture of Understory Plants in Western U.S. Aspen. 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, Ottawa, Canada.
- Burgan, R. E., R. W. Klaver, et al. (1998): Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. International Journal of Wildland Fire **8**(3): 159-170.
- Carlson, J. D., R. E. Burgan, et al. (1996): Using the Oklahoma Mesonet in developing a near-real time next generation fire danger rating system. 22nd Agricultural and Forest Meteorology.
- 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
- Cibula, W. G., E. F. Zetka, et al. (1992): Response of Thematic Mapper bands to plant water stress. International Journal Remote Sensing **13**: 1869-80.
- Cocero, D., I. Aguado, et al. (1998): Estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos del peligro de incendio. Tecnología Geográfica para el siglo XXI. VIII Coloquio del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección., Barcelona.
- Cracknell, A. P. (1997): The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). London, Taylor & Francis.
- Desbois, N. y A. Vidal (1995): La Télédétection dans la prévision des incendies de forêts. Ingénieries-EAT **1**: 21-29.
- Desbois, N. y A. Vidal (1996): Real time monitoring of vegetation flammability using NOAA-AVHRR thermal infrared data. Remote Sensing of Environment **4**: 25-32.
- Deshayes, M., E. Chuvieco, et al. (1998): Evaluation of Different NOAA-AVHRR derived indices for fuel moisture content estimation: interest for short-term fire risk assessment. III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Coimbra, ADAI.
- Eidenshink, J. C., R. H. Haas, et al. (1989): Integration of remote sensing and GIS technology to monitor fire danger in the Northern Great Plains. Proc. Challenge for the 1990's GIS, Ottawa.
- Flannigan, M. D., B. M. Wotton, (1989): A study of interpolation methods for forest fire danger rating in Canada. Canadian Journal of Forest Research. 19:1059-1066.
- Flannigan, M. D., B. M. Wotton, et al. (1998): A study on the interpolation of fire danger using radar precipitation estimates. International Journal of Wildland Fire **8**(4): 217-225.

- Holben, B. N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing **7**: 1417-1434.
- Nemani, R. R. and J. W. Running (1989): Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. Journal of Applied Meteorology **28**: 276-284.
- Paltridge, G. W. and J. Barber (1988): Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. Remote Sensing of Environment **25**: 381-394.
- Prosper-Laget, V., A. Douguédroit, et al. (1995): Mapping the risk of forest fire occurrence using NOAA satellite information. EARSeL Advances in Remote Sensing **4**(3): 30-38.
- Turner, (1972): The Drought Code Component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Canadian Forestry Service. Ottawa. Research Paper 1316.
- Trowbridge, R. and M. C. Feller (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.
- Vega, J. A. and M. Casal (1986): Contraste de estimadores de humedad del combustible forestal fino muerto en montes arbolados de Galicia (NW de España). Seminario sobre métodos y técnicas para la prevención de incendios forestales, Valencia.
- Vidal, A. and C. Devaux-Ros (1995): Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index. Agricultural and Forest Meteorology **77**: 207-224.
- Vidal, A., F. Pinglo, et al. (1994): Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR. Remote Sensing of Environment **49**: 296-303.
- Viegas, D. X., J. Piñol, et al. (1998): Moisture content of living forest fuels and their relationship with meteorological indices in the Iberian Peninsula. III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Coimbra, ADAI.
- Westman, W. E. and C. V. Price (1988): Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **26**: 11-20.

