

DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE SENSORES BIRD Y TERRA-MODIS: ESTUDIO DE UN CASO PARTICULAR

A. Calle⁽¹⁾, A. Romo⁽¹⁾, J.L. Casanova⁽¹⁾, C. Moclán⁽¹⁾ y D. Oertel⁽²⁾

⁽¹⁾ *Laboratorio de Teledetección. Universidad de Valladolid. (LATUV). Facultad de Ciencias. 47071-Valladolid*
abel@latuv.uva.es

⁽²⁾ *DLR. Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin (Alemania)*
Dieter.Oertel@dlr.de

RESUMEN

La detección de incendios forestales de forma operativa no es una tarea resuelta para la teledetección espacial. En este trabajo se pretende presentar una utilidad diferente relacionada con la detección de incendios, de forma que pueda utilizarse para determinar la potencia energética emitida por un incendio, ofreciendo buenos resultados a pesar de que puedan ser utilizadas diferentes resoluciones espaciales. Se ha estudiado una quema forestal controlada mediante los sensores TERRA-MODIS y BIRD para realizar un análisis a nivel de sub-píxel y determinar, posteriormente, la potencia en MWatts del incendio obteniendo resultados coincidentes.

Palabras clave: Detección de incendios, Potencia emitida, TERRA-MODIS, BIRD.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los incendios forestales mediante técnicas de teledetección espacial se ha reducido a las tareas de cartografía de áreas incendiadas y valoración del riesgo de extensión, en los casos en que se requiere trabajo en tiempo real, en el primer caso y operatividad en el segundo.

La detección de incendios, por otra parte, es una necesidad aún no resuelta hasta que los satélites geostacionarios muestren su capacidad para detectar pequeños incendios y mostrar su utilidad para aportar los avisos de alerta temprana, lo cual será realmente difícil por las dificultades para fabricar sensores térmicos con alta resolución espacial. En este sentido, han sido realizadas simulaciones para determinar el área mínima detectable en función de la temperatura sobre GOES y MSG (*Prins and Schmetz, 1999*). En el caso de este último, y sobre nuestras latitudes, para que un fuego de 600 K sea detectado se necesita una extensión mayor 1.5 ha. y esto sin incluir los efectos de la atenuación atmosférica.

Por otra parte, el intento de establecer un sistema de alerta temprana de incendios mediante satélites polares, lo que resolvería el problema de la resolución espacial, ha sido ya contemplado a través del conocido proyecto FUEGO financiado por la ESA y que pretende la puesta en órbita de 12 satélites polares en tres planos orbitales para trabajar en conjunción y ofrecer resoluciones temporales del

orden de 15 minutos.

Como conclusión más relevante respecto a la panorámica actual de la utilidad de la detección de incendios mediante sensores espaciales podemos señalar que hasta ahora ha servido para la elaboración de mapas de ocurrencia de incendios y obtención de resultados estadísticos.

En lo que se refiere a los sensores utilizados para llevar a cabo la detección de incendios, el más importante ha sido, sin duda, el NOAA-AVHRR debido a su mayor resolución temporal y el tipo de sensores de los que está dotado. La detección mediante AVHRR ha sido desarrollada a través de diferentes algoritmos que podemos clasificar en algoritmos basados en umbrales fijos y algoritmos contextuales, cuyos parámetros han sido adaptados a las diferentes zonas de estudio. La baja resolución espacial, de 1km², de este sensor ha dado lugar al estudio a nivel de sub-píxel, mediante la aplicación de la metodología de *Dozier, 1981*, a partir de la cual es posible determinar simultáneamente la temperatura del fuego y la fracción de área que se encuentra ardiendo. A pesar de las limitaciones de las que adolece este sensor, es inevitable utilizarlo como referencia comparativa para los sensores posteriores como MODIS.

La aparición del sensor MODIS, en 1999, sobre las plataformas TERRA y AQUA, aportando 36 bandas espectrales ha mejorado enormemente las capacidades de la detección de forma que los

algoritmos basados en AVHRR han sido adaptados y mejorados para la operatividad de MODIS (Kaufman and Justice, 1998). El Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV) ha puesto en funcionamiento un receptor TERRA-MODIS que se encuentra ya operativo y trabajando sobre la detección de incendios.

La aparición del satélite experimental BIRD, diseñado por el DLR alemán y cuya finalidad es la detección de incendios, hace pensar en que la búsqueda de un sistema espacial operativo de alerta temprana, terminará siendo una realidad en un futuro no muy lejano (Briess et al., 2003).

El objetivo planteado en este trabajo será el análisis de los sensores implicados en la detección de fuegos y determinar, a partir del análisis de sub-píxel la intensidad energética del fuego, parámetro relacionado con la temperatura del fuego y el área ardiente simultánea. Es de esperar que este factor pueda ser un excelente indicador del poder destructivo y la severidad del incendio forestal para realizar estimaciones cualitativas aproximadas de los daños causados.

DESCRIPCIÓN COMPARATIVA DE SENSORES

Todos los algoritmos de detección de incendios forestales desde satélite están basados en la utilización de dos bandas espectrales situadas en el infrarrojo medio, en torno a las 3.7 μm , y en el infrarrojo térmico, en torno a las 11 μm . En el caso del AVHRR son las bandas 3 y 4. Cuando la temperatura observada es elevada, la radiancia recibida en la banda 3 supera a la de la banda 4, lo que no ocurre para temperaturas moderadas. Este resultado físico, puesto de manifiesto a partir de la función de Planck, es el utilizado por los algoritmos de umbrales y algoritmos contextuales para llevar a cabo la detección.

Sin embargo, el canal 3 AVHRR, (3.55-3.93 μm) que está centrado en el máximo espectral de objetos que emiten con una temperatura de 800K, tiene el importante problema de tener un límite de saturación en los 320-331 K (Robinson, 1991). Esta importante dificultad, capacita al sensor para la detección de focos pero le incapacita en la mayoría de los casos para la determinación de la temperatura y área de fuego con la aplicación de la técnica sub-píxel.

La banda equivalente en el sensor MODIS tiene una banda infrarrojo medio, MIR, ligeramente desplazado respecto del anterior, además de presentar una función de respuesta marcadamente más estrecha. Se trata de la banda 23 y la principal

ventaja que se deriva es que se muestra menos afectada por la absorción del vapor de agua, lo que es importante teniendo en cuenta que este gas es el que muestra mayor variabilidad de cara a la determinación de la transmitancia gaseosa. Por otra parte presenta un valor de saturación de 500 K, lo que la hace superar las limitaciones del AVHRR, a pesar de que la resolución espacial sea de 1 km como en aquél.

En el caso del MIR correspondiente al BIRD, la función de respuesta es la más ancha de las mencionadas, extendiéndose en el intervalo [3,4.4 μm]. La figura 1 muestra gráficamente las tres fines de respuesta y el efecto del vapor de agua obtenido mediante el código MODTRAN, para su comparación.

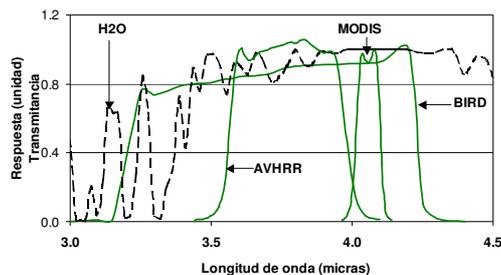


Figura 1. Funciones de respuesta del canal MIR en los sensores AVHRR, MODIS y BIRD, así como la transmitancia espectral del vapor de

Las longitudes de onda centrales de las bandas MIR y TIR, ponderadas mediante la función de respuesta se muestran en la tabla 1.

	AVHRR	MODIS	BIRD
MIR (μm)	3.772 (3)	4.057 (23)	3.792
TIR (μm)	10.789 (4)	11.018 (31)	8.953

Tabla 1. Longitudes de onda central de los tres sensores analizados, calculadas de acuerdo a:

$$\lambda_c = \frac{\int \lambda \cdot \phi(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \phi(\lambda) \cdot d\lambda}$$

A la vista de la tabla 1, la principal diferencia encontrada reside en el sensor TIR del BIRD, muy desplazado hacia longitudes de onda más corta respecto a los otros dos sensores analizados. Este hecho tiene una especial relevancia en lo que se refiere a la elaboración de los algoritmos de detección de incendios. Para mostrarlo, se ha realizado el cálculo de la radiancia emitida por el cuerpo negro a diferentes temperaturas utilizando las fines de respuesta de los sensores, para determinar

cuál es la temperatura a la que se invierte la cantidad de radiancia obtenida sobre las bandas MIR y TIR. Este parámetro es importante para establecer umbrales en los test de detección. En el caso del AVHRR, el punto a partir del cual la radiancia MIR es superior a la TIR sucede a una temperatura aproximada de 475 K; en el caso del MODIS esto sucede a una temperatura ligeramente inferior, de 455 K aproximadamente. Sin embargo el fuerte desplazamiento de la función de respuesta del TIR del BIRD hace que la temperatura de la inversión sea a 515 K. Este hecho se justifica por la mejor resolución espacial del BIRD que es de 370 metros, que al tratarse de un sensor escalonado se traduce en una resolución a nivel de imagen de 185 metros.

METODOLOGÍA

El campo de estudio fue una quema forestal controlada realizada en la comarca de la Sierra de Francia (Salamanca) en una zona poblada principalmente de matorral de jara. La quema fue realizada durante el mes de abril de 2003, coincidiendo con el paso de tres sensores: LANDSAT-ETM+, TERRA-MODIS y BIRD. El sensor ETM+ aunque visualizó la prueba inicial no está relacionado con el presente trabajo. En el caso de los otros dos, existía una diferencia de paso de 25 minutos aproximadamente y en ambos casos se trataba de una trayectoria con elevación entre 85° y 90°. El tamaño de la parcela era de 12 ha. y el fuego se realizó en dos etapas perfectamente coordinadas para que en el paso de ambos sensores el estado del fuego fuera aproximadamente el mismo, lo que se consiguió como se aprecia en las fotografías que fueron tomadas.

La determinación de la intensidad energética del incendio requiere calcular previamente el área y la temperatura del fuego. Para ello se ha aplicado la metodología de Dozier (Dozier, 1981; Matson and Dozier, 1981) a los sensores MODIS y BIRD para comparar los resultados obtenidos. A lo largo del estudio se ha tomado la aproximación de que la superficie observada es un cuerpo negro por lo que la emisividad espectral ha sido establecida en la unidad. Esta aproximación implica despreciar completamente el término de la radiancia reflejada en la banda MIR, lo que no debiera ser de gran magnitud dado que en relación al AVHRR, en el caso de MODIS la longitud de onda central es mayor. Bajo esta suposición, la radiancia que recibe el sensor en cada una de las bandas MIR y TIR se puede expresar mediante:

$$L_i(T_i) = \tau_i \cdot [f B_i(T_f) + (1-f) B_i(T_{back})] \text{ con } i = MIR, TIR$$

donde el subíndice i se refiere a las dos bandas MIR

y TIR, f es la fracción del píxel que contiene fuego, T_f es la temperatura del fuego, T_{back} es la temperatura de la superficie no afectada por el fuego y τ_i es la transmitancia atmosférica en cada una de las dos bandas a las que se refiere dicha ecuación. La resolución del sistema de las dos ecuaciones anteriores ha sido realizada por métodos numéricos por no ser ecuaciones explícitas y en todos los casos presentados en este trabajo las soluciones han sido convergentes con un error inferior a $1 \cdot 10^{-4}$ en la determinación del parámetro f , lo que resulta absolutamente satisfactorio en el orden de las extensiones manejadas.

La transmitancia para cada una de las bandas MIR y TIR fue determinada mediante el código MODTRAN utilizando un perfil estándar de medias latitudes. A partir de la transmitancia espectral fue determinada una transmitancia central, ponderada para toda la respuesta espectral de las bandas MIR y TIR de cada uno de los sensores MODIS y BIRD, mediante la expresión:

$$\tau_i = \frac{\int \tau(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda}{\int \phi_i(\lambda) d\lambda} \quad i = MIR, TIR$$

Para comprobar los errores cometidos en la determinación de la radiancia utilizando la longitud de onda y transmitancia centrales se ha comparado la resolución de la ecuación de Planck integrada y ponderada mediante la función de respuesta de los sensores y la transmitancia espectral con la transmitancia central y la función de Planck sobre la longitud de onda central, en un intervalo de temperaturas [273-1000 K] obteniendo un error máximo de 0.2%, lo cual justifica plenamente la utilización de dichos valores ponderados en la resolución del sistema de ecuaciones de la radiancia.

Para los dos sensores estudiados el fuego analizado se encontró ocupando más de un píxel, por lo que el análisis sub-píxel fue realizado a todos los píxeles k implicados, obteniendo para cada uno de ellos, una $T_{f,k}$ y una superficie S_k . La superficie final manejada para la determinación de la intensidad del incendio y la temperatura T_f aproximada y ponderada del fuego, fueron determinadas mediante las expresiones:

$$T_f = \frac{\sum_k T_{f,k} \cdot S_k}{S}, \quad S = \sum_k S_k$$

Finalmente, la intensidad energética del incendio ha sido calculada tomando una temperatura del aire de 291 K y la ecuación de transferencia de calor por radiación:

$$I = \sum_k \sigma S_k (T_{f,k}^4 - T_a^4)$$

siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, S_k la superficie del fuego y T_a la temperatura del aire.

Este resultado no es el mismo que si se considera la temperatura del fuego ponderada y su superficie total en vez de la contribución individual de todos los píxeles implicados.

RESULTADOS

Lógicamente, la diferente resolución de los sensores utilizados ha dado lugar a que el número de píxeles afectados por el incendio fue diferente. En el caso de BIRD han sido considerados 9 píxeles afectados sobre los que se ha realizado el análisis sub-píxel. La temperatura de superficie utilizada ha sido obtenida mediante el promedio de píxeles circundantes a los afectados. Las temperaturas de fuego obtenidas en los píxeles involucrados se encontraron comprendidas en el intervalo [571, 977 K] y proporcionaron una temperatura ponderada aproximada del incendio, T_f de 727 K, con una superficie total afectada de 1.02 ha. Este resultado, aunque ligeramente diferente, es concordante con el resultado obtenido por el DLR utilizando su propia metodología (Zhukov, 2003), de 775 K y 1.22 ha. y ligeramente superiores, en ambos casos, según las estimaciones aportadas por el personal forestal de campo en lo referente a la superficie de fuego.

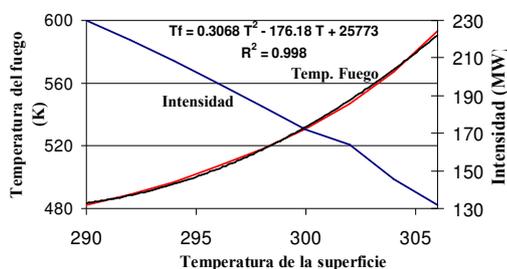


Figura 2: Variaciones del resultado de T_f e Intensidad en función de la temperatura de superficie, para el píxel MODIS más afectado

En el caso del sensor MODIS resultaron afectados 2 píxeles y les fueron aplicados el procedimiento, encontrando temperaturas del fuego de 601 K y 719 K, y una superficie total afectada de 2.65 ha. Si damos por válido el valor aportado por BIRD, encontramos una temperatura más baja, de 634 K y un área afectada más elevada. Esta diferencia no debería ser extraña teniendo en cuenta la comparación de dos sensores absolutamente diferentes en la resolución espacial y el fuerte efecto que sobre ello produce la PSF (Point Spread Function) del sensor. Baja resolución espacial sobrevalora la superficie de fuego e infravalora la temperatura. Esto indujo a pensar que la magnitud

que contabiliza el efecto conjunto de superficie y temperatura, esto es, la intensidad, podría ser similar para los dos sensores. En efecto, el valor de la intensidad del incendio aportado por el DLR usando BIRD fue de 245 MWatts prácticamente idéntico al valor de 241.5 MWatts obtenido en el análisis del sensor MODIS.

En el análisis cabe destacar la gran importancia que tiene el valor introducido para la temperatura de la superficie, cuyas variaciones se encuentran en relación parabólica con las obtenidas para el fuego. Pequeños errores en la adopción de la temperatura de superficie del sistema redundan en errores mucho más grandes en la temperatura del fuego. Ver fig.2.

CONCLUSIONES

La principal conclusión desprendida de este análisis es la utilidad de la metodología para la determinación de la intensidad emitida por un incendio. Sensores de diferente resolución espacial aportan diferentes valores de la superficie y temperatura de fuego, parámetros con no demasiada información por separado, pero los resultados son coincidentes en el parámetro de intensidad. Éste puede ser un valioso indicador del poder destructivo de un incendio

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto REMFIRESAT, financiado por la ESA, con la colaboración de las empresas INSA y Globalcom y de la Junta de Castilla y León.

REFERENCIAS

- Briess, K., H. Jahn, E. Lorenz, D. Oertel, W. Skrbek and B. Zhukov, 2003, Fire recognition potential of the bi-spectral Infrared Detection (BIRD) satellite, Int. Jour. Rem. Sens., 24, 4 : 865 - 872
- Dozier, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. Rem. Sens. Env., 11: 221-229.
- Kaufman, Y. and Justice, C. 1998. MODIS Fire Products. MODIS Science Team. EOS ID#2741.
- Matson, M. and Dozier, J. 1981. Identification of subresolution high temperatures sources using a thermal IR sensor. Photo Engr. and Remote Sensing, 47(9), pp. 1311-1318.
- Prins, E and Schmetz, J. 1999. Diurnal fire active detection using a suite of international geoestacionaty satellites. GOF C Forest Fire Monitoring and Mapping Workshop, JRC, Ispra.
- Robinson, J.M., 1991. Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. Int. Journal of Remote Sensing, 12, pp.3-24.
- Zhukov, B. 2003. Comunicación personal del DLR