## Operacionalidad y capacidades del satélite BIRD en la detección de incendios forestales: comparación con otros sensores

A. Calle, A. Romo, C. Moclán y J. Sanz Correo electrónico: abel@latuv.uva.es Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid

#### RESUMEN

En este trabajo se pretenden presentar las capacidades del satélite experimental BIRD en la detección de los incendios forestales, así como una comparación de los sensores más utilizados en las tareas de detección de hot-spots, que son AVHRR y MODIS. Se muestran resultados obtenidos por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid sobre quemas prescritas en Galicia (España) durante el verano de 2003.

PALABRAS CLAVE: BIRD, MODIS, AVHRR, detección de incendios, parámetros del fuego.

#### ABSTRACT

This work shows the capabilities of experimental BIRD satellite to carry out forest fires detection. Its showed too a comparison among most used sensors on hot-spots detection task: AVHRR and MODIS. Results obtained from Remote Sensing Laboratory of University of Valladolid over prescribed fires on Galicia (Spain) in the summer 2003, are showed.

KEY WORDS: BIRD, MODIS, AVHRR, hots-spots detection, fire parameters.

### 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. Para la realización de las tareas de cartografía, diversos sensores han mostrado sus capacidades como es el caso de LANDSAT-TM (Ortega et al., 2003) o IRS-LISS, y para la determinación del riesgo de extensión, en baja resolución espacial el NOAA-AVHRR (Casanova et al., 1998).

La detección de incendios, por otra parte, es una necesidad aún no resuelta por no disponer de sensores que mezclen adecuadamente la resolución temporal y la resolución espacial en el dominio del espectro térmico. En esta línea, los satélites geoestacionarios aún no han mostrado su capacidad en la detección de pequeños focos de incendios y por ello aún no se encuentran en disposición de ser útiles para aportar los avisos de alerta temprana. La dificultad que entraña la fabricación de sensores térmicos con alta resolución espacial es el principal obstáculo para llevar a cabo esta tarea. Algunos autores han realizado 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. Ello hace que aunque GOES ha mostrado grandes resultados sobre zonas de la Amazonía donde existen incendios muy extensos y de larga duración, sin embargo, aún está por demostrar que MSG pueda realizar la detección sobre nuestras latitudes teniendo en cuenta las condiciones particulares de los incendios que nos afectan.

Por otra parte, el intento de establecer un sistema de alerta temprana de incendios mediante satélites polares, lo que resolvería en 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. Resultados de gran utilidad que han mostrado la panorámica mundial de la ocurrencia de incendios a lo largo de varios años. En este sentido el sensor ATSR y los algoritmos aplicados sobre el, han logrado realizar un ambicioso atlas de ocurrencia de incendios con la participación de varios investigadores y colaboradores (Arino and Rosaz, 1997, 1998, 1999).

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 1km<sup>2</sup>, 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 aportando resultados en tiempo real durante la campaña de verano de 2003.

Los sensores mencionados, son capaces de realizar la detección gracias a disponer de sensores midiendo en el rango espectral de las  $3-4 \mu m$ , pero restringen su resolución espacial a 1 km<sup>2</sup>. Otros sensores con alta resolución espacial como Landsat-TM/ETM+ o TERRA-ASTER no disponen de bandas en dicho rango espectral.

La aparición del satélite experimental BIRD, diseñado por el laboratorio DLR de Alemania, ha introducido algunas mejoras realmente significativas en las capacidades de los sensores térmicos y a pesar de encontrarse en fase experimental ha aportado ya resultados sorprendentes en algunos casos y ello 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).

#### CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA MISIÓN BIRD

El satélite BIRD (Bi-spectral Infrared Detection) fue puesto en órbita el 22 de octubre de 2001 en una órbita polar heliosíncrona de 572 km. y su principal tarea ha sido la caracterización de anomalías térmicas sobre la superficie de la tierra. Entre otros objetivos de la misión que incluían temática orbital, cabe destacar la puesta en funcionamiento de un sensor infrarrojo con un rango radiométrico dinámico.

La carga útil del BIRD está compuesta por dos sensores. El primero de ellos, WAOSS-B (Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner), contiene las bandas VIS (0.6-0.67  $\mu$ m) y NIR (0.84-0.9  $\mu$ m), que con una resolución de 185 metros y un campo de visión de 50° abarcan una línea de barrido de 533 km, con una resolución radiométrica de 11 bits. Sin embargo la generación de índices de vegetación no está asegurada puesto que las bandas no se encuentran perfectamente co-registradas, por lo que los píxeles no son coincidentes.

El otro sensor, mucho más importante desde el punto de vista de la detección de hot-spots, que nos ocupa, es el HSRS (Hot Spot Recognition Sensor) compuesto por las bandas MIR (3.4-4.2  $\mu$ m) en el infrarrojo medio y TIR (8.5-9.3  $\mu$ m) en el infrarrojo térmico. En campo de visión en este caso es de 19°, una estrecha banda que corresponde a 190 km a nivel de la superficie terrestre. Su resolución espacial es de 370 m. aunque por tratarse de dos *arrays* de detectores en forma escalonada, los pixeles se encuentran grabados en imagen a 185 km. El sensor HSRS es idóneo para la detección de hotspots por tres razones principales; en primer lugar su adecuada resolución espacial en el térmico, la segunda es la excelente resolución radiométrica de

14 bits. La tercera característica es la utilización de un rango dinámico espectral que impide la saturación de la señal a altas temperaturas; esto es, durante la captación de una escena, se realiza simultáneamente, en el mismo tiempo de muestreo, una segunda exposición que analizará si el detector se encuentra cerca de la saturación, en cuyo caso se realiza una expansión del rango radiométrico manteniendo una resolución en la escala de temperaturas de 0.1-0.2 K (Lorentz and Skrbek, 2001).

El satélite BIRD es un prototipo experimental, de dimensiones muy reducidas y cuyo coste de fabricación ha sido realmente modesto, pero sus capacidades en la detección de fuegos han sido excelentes.

#### DETECCIÓN DE INCENDIOS Y ANÁLISIS SUB-PIXEL

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 el intervalo de 3-4 µm, y en el infrarrojo térmico, en torno a las 11 µm. En el caso del sensor AVHRR las bandas implicadas son 3 y 4 respectivamente, en el caso de MODIS la 23 y 31 y para BIRD son la MIR y TIR. Cuando la temperatura observada es elevada, porque procede de un foco de llama, la radiancia recibida en la banda MIR supera a la de la banda TIR, 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. Bien es cierto que llamas y rescoldos pequeños pueden aportar una radiancia superior en TIR respecto a MIR, pero eso sólo sería detectable mediante sensores de muy reducido campo de visión en que el fuego ocupara el píxel en su totalidad. Esta no sería, en todo caso, la situación real observable desde satélite.

Los algoritmos para la detección de hot-spots están agrupados en dos categorías principalmente. En primer lugar los que utilizan umbrales fijos de temperatura (Kaufman et al, 1990) en la banda MIR y en la diferencia (MIR-TIR) que se asumirá positiva en función de los dicho en el párrafo anterior. Estos algoritmos presentan la dificultad de elegir el umbral fijo adecuado ya que éste puede depender de la época del año y de la zona de análisis; por otra parte los algoritmos contextuales (Lee and Tag, 1990) están basados en la detección de cambios radiométricos bruscos, determinando umbrales de forma dinámica en función de parámetros estadísticos obtenidos en los alrededores del píxel de análisis (media y desviación estándar). Este algoritmo determina umbrales variables de forma automática pero presenta el inconveniente de generar muchas falsas alarmas en las inmediaciones de zonas con cubierta nubosa, si no se ha llevado a cabo un correcto filtrado.

Por lo que respecta al análisis a nivel sub-píxel para la determinación de la temperatura del fuego y área de llama se utiliza la técnica de Dozier (1981). Esta técnica está basada en la resolución del sistema de ecuaciones:

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

donde L<sub>i</sub> es la radiancia obtenida en cada una de las bandas MIR y TIR, T<sub>f</sub> y p son la temperatura del fuego y la fracción del píxel ocupado por el mismo, T<sub>hack</sub> es la temperatura de la zona que no arde y t<sub>i</sub> la transmitancia atmosférica en cada banda. Las restricciones que tiene la aplicación de esta metodología son diversas; por supuesto se asume que la señal radiométrica introducida en dichas ecuaciones no podrá estar saturada. Otro inconveniente es que no se tiene en cuenta el término de reflexión solar, que en el rango espectral del MIR no es nulo. Su aplicación, por tanto, es más recomendada para imágenes nocturnas. Los autores del algoritmos ABBA aplicado al satélite geoestacionario GOES (Prins and Menzel, 1993) introducen un término adicional en las ecuaciones de Dozier referido a la mencionada reflexión. Téngase en cuenta, no obstante, que la contribución de la reflexión solar en el MIR puede reducirse considerablemente desplazando ligeramente la función de respuesta del sensor.

Otras restricciones más difíciles de considerar por el desconocimiento de los parámetros de superficie es que en dichas ecuaciones no se han introducido los valores de emisividad espectral que aunque para el fuego vale la unidad, la superficie no es exactamente un cuerpo negro, aunque se aproxima. Esta aproximación puede justificarse debido a que esta técnica se aplica sobre superficies forestales con valores de emisividad espectral variables en un estrecho intervalo (Wan, 1999) y muy cercanos a la unidad. Finalmente, el sistema de ecuaciones planteado tiene en cuenta las propiedades de absorción de la atmósfera, pero no el término de emisión de la misma.

#### **COMPARACIÓN BIRD, MODIS Y AVHRR**

El planteamiento de realizar una comparación entre los sensores frecuentemente utilizados en la detección de hot-spots debe contemplar no sólo aquellos aspectos relacionados con la detección en sí misma, sino también en lo que respecta al análisis sub-píxel, con la finalidad de determinar parámetros relacionados con el fuego como el área de llama, temperatura y consiguientemente la intensidad energética del fuego. Es de esperar que este último factor pueda ser un excelente indicador del poder destructivo y la severidad del incendio forestal para realizar estimaciones cualitativas aproximadas de los daños causados. Además, aunque el concepto de monitoreo del incendio pueda estar alejado de las posibilidades de las resoluciones espacial y temporal de la teledetección, debemos plantear la extracción de la mayor información posible, que pueda estar a nuestro alcance.

La banda 3 AVHRR, ( $3.55-3.93 \mu m$ ) está centrada en el máximo espectral de objetos que emiten con una temperatura de 800 K tiene el importante problema de tener un límite de saturación en los 320-331 K (Robinson, 1991). Este es un límite tan bajo que un fuego con una temperatura de 1000 K sobre una superficie no reflectiva de 300 K, tan solo necesita una superficie de  $13 \times 13 m^2$  para conseguir la saturación del píxel. Esta importante dificultad, capacita al sensor para la detección de focos pero le incapacita, en la mayoría de los casos para el análisis al nivel sub-píxel.

Las restricciones de este sensor estriban, además, en la dificultad para elegir un umbral fijo adecuado aplicable a los algoritmos de detección, dificultad derivada de su pobre resolución espacial. Para ilustrar este punto tomemos un ejemplo numérico: Tengamos un fuego, cuya temperatura es de 800 K ocupando 75 m<sup>2</sup>; este incendio no satura el píxel AVHRR, pero no podríamos detectarlo si establecemos un umbral para el píxel de un 10% superior a la temperatura del entorno. Sería detectable sólo si el umbral establecido fuera mayor del 20%, superior a la temperatura del entorno; así sería posible la detección y análisis de subpíxel; sin embargo, si ese mismo fuego ocupara 25x25 m<sup>2</sup>, obtendríamos una señal saturada que incapacitaría el cálculo de la temperatura y superficie del fuego. Este ejemplo da una visión clara de la estrecha franja de condiciones área-temperatura para la cual es posible el análisis sub-píxel utilizando AVHRR.

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. Los problemas que presenta esta banda son derivados de las condiciones geométricas de adquisición del sensor: MODIS realiza un barrido consecutivo de 10 líneas de 1 km (20 de 500 metros y 40 de 250 metros), lo que provoca un solapamiento de los bloques en los extremos de la imagen; este efecto es conocido como *bow-tie* y tiene como consecuencia reducir el campo de visión para la detección, de  $\pm 55^{\circ}$  que es el nominal, a  $\pm 45^{\circ}$ como campo efectivo.

Otra dificultad que no presentaba el sensor AVHRR se refiere a que la respuesta de las bandas térmicas en MODIS es triangular y de una longitud de base de 2 km por lo que existe un solapamiento entre píxeles adyacentes de 1 km. Esta disposición geométrica da lugar a que un incendio dado, por muy pequeño que sea, aparezca en dos píxeles consecutivos. Los algoritmos de detección realizan un test de confidencialidad para reducir los puntos afectados pero los resultados se encuentran aportados en términos de probabilidad (Kaufman and Justice, 1998).

La principal ventaja que presenta la banda MIR MODIS respecto a AVHRR es su límite de saturación radiométrico, de 500 K, lo que facilita este sensor no sólo para la detección sino para la determinación de la temperatura y área del fuego, en un intervalo de condiciones mucho más amplio que en el AVHRR. En este mismo orden de cosas, cabe destacar que la función de respuesta de la banda MODIS-23 es mucho más estrecha (anchura de 0.15 mm contra 0.55 mm del AVHRR-3) y se encuentra ligeramente desplazada hacia longitudes de onda mayores (la longitud de onda central es de 4.06 mm en vez de 3.77 mm del AVHRR) lo que provoca que se muestre 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. Además este desplazamiento reduce en un 40% (Kaufman and Justice, 1998) la contribución de reflectancia solar en esta zona del espectro, por lo que no se necesita un término adicional corrector en las ecuaciones de Dozier.

En el caso del MIR correspondiente al BIRD, la función de respuesta es la más ancha de las mencionadas (anchura de 1.1mm), extendiéndose en el intervalo [3,4.4 mm]. La Figura 1 muestra gráficamente las tres fnes de respuesta MIR y el efecto del vapor de agua obtenido mediante el código MOD-TRAN, 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 agua.

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:

$$\lambda_{\rm C} = \frac{\int \lambda \cdot \phi(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \phi(\lambda) \cdot d\lambda}$$

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, hemos realizado el cálculo de la radiancia emitida por el cuerpo negro a diferentes temperaturas utilizando las fnes 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. El precio que debe pagar la banda BIRD-TIR es que en el entorno de las 8.9  $\mu$ m es mayor la absorción atmosférica que en el entorno a las 11 $\mu$ m donde se encuentran AVHRR-4 y MODIS-31.

#### OPERACIONALIDAD DEL BIRD EN LA DETECCIÓN DE HOT-SPOTS

A lo largo de la primavera verano de 2003, el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV) ha realizado el análisis en tiempo real de imágenes BIRD sobre Galicia, para obtener de forma casi instantánea mapas de hotsspots referenciados a la demarcación territorial de Concejos y Parroquias, necesidades éstas planteadas por la Administración local.

#### Metodología

La metodología seguida para la obtención de resultados en cada una de las escenas fue la que se explica a continuación, teniendo en cuenta que todos los procesos estaban encaminados a resolverse en tiempos de proceso lo más cortos posible, de forma que finalmente, el resultado de todos los productos era generado en tiempos aproximados en torno a los 25 minutos tras la recepción de la imagen BIRD.

1. Recepción de la escena: En primer lugar tuvo lugar la recepción de la imagen desde el DLR en Alemania. Las bandas BIRD eran NIR, MIR y TIR, con espacios de almacenamiento de 110 Mbytes, 54 Mbytes y 54 Mbytes respectivamente. La Figura 2 representa un *quick-look* de la banda NIR característico de todas las escenas que fueron procesadas a lo largo de la campaña.

2. Co-registración de las bandas: Este era un primer paso del procesado que hubo que resolver en nuestro Laboratorio. Para obtener las funciones polinómicas de transformación entre las bandas MIR y TIR, que funcionaran con coeficientes fijos, se analizaron previamente escenas de diferentes





Figura 3. Detalle de superposición de las bandas MIR y TIR para mostrar los resultados de la co-registración automática desarrollada.

partes del mundo, para corroborar la validación de dichos coeficientes fijos; así, fueron utilizadas imágenes de China, Rusia y España, estableciendo una correlación polinómica de grado 3 a través de más de 450 puntos de control. Los resultados fueron claramente satisfactorios como lo muestra la Figura 3 en la que se reproduce el canal TIR de las rías altas gallegas, y con una superposición en detalle de la banda MIR.

Figura 2. Quick look **BIRD-NIR** 

3. Georreferenciación: Las correcciones geográficas se realizaron mediante ajuste polinómico de puntos de control tomando como referencia una imagen base de NDVI obteni-

da por MODIS remuestreada a 250 metros. La imagen base, que representaba un escenario libre de cobertura nubosa, sirvió para agilizar este proceso en cada escena, que no podía hacerse de forma automática.

4. Mapas de hot-spots: La detección de hot-spots se restringió a la zona de Galicia. Cada día de análisis se aplicaron dos tipos de algoritmos de detección; uno de ellos basado en umbrales fijos de la forma:

a)  $T_{MIR} > [325 \text{ K}, 340\text{K}]$ 

b)  $(T_{MIR}^{-}-T_{TIR}^{-}) > 15 \text{ K}$ c)  $T_{TIR}^{-} > 265 \text{ K}$ 

El test c) se refiere al filtro de cobertura nubosa, y el paso a), el más importante se trata de un umbral adaptativo en el intervalo señalado. El valor utilizado era elegido en función de la temperatura de superficie promedio en la región. El valor de 340 K fue utilizado durante los días de calor extremo sufridos en toda la península.

El otro de los algoritmos utilizados era contextual, con un análisis de entorno de 9x9 píxeles estableciendo los umbrales MIR y (MIR-TIR) en el valor promedio más 4 veces la desviación estándar de los valores analizados en la matriz. El algoritmo contextual sólo fue aplicado durante los días sin cobertura nubosa por el peligro de obtener un gran número de falsas alarmas. Los mapas de hot-spots eran aportados con valores de temperatura, píxeles afectados en cada incendio, coordenadas en la proyección UTM-29N y situación administrativa en Parroquia y Concejo.

5. Otros productos: Se procesaban igualmente otros productos de valor añadido como composición RGB=MIR-NIR-TIR para la interpretación de la imagen y archivos vectoriales del mapa de incendios.

#### Resultados y Validación

La validación de los resultados exigiría disponer de informes detallados de la ocurrencia de fuegos a lo largo de la campaña en las horas del paso del satélite BIRD. Esta información no se encuentra disponible debido a que en Galicia los fuegos registrados son de dimensiones muy reducidas en la mayoría de los casos y pueden desarrollarse en intervalos cortos de tiempo, que no necesariamente coincidirían con el paso del satélite. Por ello, para analizar la metodología aplicada y el sensor que estamos utilizando se recurrión a realizar quemas controladas.

La Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia organizó 17 quemas controladas el día 30 de mayo de 2003, en las cuatro provincias gallegas coincidiendo con el paso del satélite BIRD: 5 en Lugo, 4 en la Coruña, 4 en Orense y 4 en Pontevedra. Los frentes de fuego de dichas quemas estuvieron comprendidos entre 10 y 100 metros. Además, durante ese día existía un incendio no prescrito y que tenía las dimensiones más grandes de los mencionados. Por otra parte, el satélite TERRA tenía una órbita ligeramente desplazada temporalmente respecto al BIRD por lo que también podemos introducir los resultados de MODIS en este análisis.

Los resultados obtenidos en la detección de las quemas test se pueden resumir en la Figura 4 a) y b).

La Figura 4 a) representa, sobre la banda MIR del día de análisis, los resultados de la detección de los



Figura 4. a) resultado de la detección BIRD, de quemas prescritas, utilizando algoritmo basado en umbrales fijos. b) mismos resultados utilizando un análisis contextual.

hot-spots, tras aplicar un algoritmos de umbrales fijos, explicado en en epígrafe anterior. Sobre la misma figura, se representan además todos los pixeles afectados por cada una de las quemas establecidas. El listado de los hotspots asociados a cada uno de los grupos es: #1: 4 hs, #2: 7 hs, #3: 4 hs, #4: 5 hs, #5: 13 hs, #6: 5 hs, #7: 2, hs , #8: 5 hs, y #9: 2 hs. El grupo 5 es el más grande y cabe destacar que tras la comprobación posterior de resultados se verificó que este incendio no estaba en la lista de las quemas prescritas y que se trataba de un incendio real, a partir de la información facilitada por la Administración Local. Además es importante señalar que este fue el único incendio detectado por el sensor TERRA-MODIS, cuya trayectoria estaba ligeramente desplazada temporalmente respecto a BIRD. Este es un importante resultado de comparación de las capacidades mostradas por los sensores BIRD y MODIS en la detección de focos pequeños. Este resultado en forma de mapas de hot-spots fue aportado por el LATUV a la Administración Local teniendo total desconocimiento del número de quemas en escena ni de su localización geográfica.

Posteriormente y con el ánimo de analizar y depurar algoritmos se realizó un test contextual, mencionado en el apartado de metodología, obteniendo los resultados resumidos en la Figura 4 b). Entonces fueron obtenidos dos grupos adicionales 10 y 11 de hot-spots, que como se aprecia eran de más reducido tamaño al tener sólo dos píxeles afectados. Estos grupos fueron validados correctamente en la lista de coordenadas de quemas test. Sin embargo, se obtuvieron tres puntos más, que no

figuraban en la lista de quemas prescritas, marcados con el signo "?" en la figura, por lo que podría tratarse de falsas alarmas. Esto estaría provocado por el hecho de que el dispositivo de alerta de fuegos debe ser lo más rápido posible y se omitió el procesado de filtrado de cobertura nubosa. Este es el inconveniente de los algoritmos contextuales, a pesar de que en el proceso de validación detectó dos grupos más que con umbrales fijos.

El resto de las quemas prescritas no fueron detectadas por encontrarse bajo las nubes, que como se aprecia en la imagen, ocupaban gran parte del territorio.

#### Monitoreo de incendios

El monitoreo de incendios es un tarea muy alejada de las posibilidades de la teledetección, si entendemos por tal la extracción de información acerca de la progresión del incendio y su dirección de propagación. Ello es debido a que la captación del hotspot es instantánea, en primer lugar, y hasta ahora la resolución espacial del térmico sólo aportaba uno o dos puntos afectados en el caso de incendios no muy grandes.

El sensor BIRD, sin embargo, es capaz de realizar la detección de pequeños incendios y además aportar varios pixeles afectados, como se ha visto en el anterior apartado, por lo que mediante la diferenciación de temperaturas es posible determinar la dirección de propagación de pequeños focos.

Para mostrar los resultados de esta temática, podemos analizar una quema prescrita en la provin-

cia de Salamanca, el la Sierra de Francia, realizada en el marco del proyecto REMFIRESAT. Se trataba de 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. Al tratarse de una quema de una extensión de fuego aproximada de 1.5 ha. el resultado de la detección con MODIS fue de un solo píxel afectado (dos en realidad por la configuración de la respuesta del térmico, pero uno sólo tras la realización del test de confidencia). Los resultados de la detección en BIRD se resumen en la Figura 5, en la que se representa en primer lugar la fotografía real del incendio tomada a pie de tierra, para apreciar que se trataba de un incendio dinámico con desplazamiento debido a la fuerte acción del viento durante la quema. En la parte derecha de la figura se representa la temperatra coloreada de los pixeles afectado por el fuego, sobre los que se ha realizado un proceso de interpolación espacial para la determinación de las líneas isotermas y con ello la visualización de la trayectoria del fuego; obsérvese cómo el gradiente de temperatura de la parte izquierda, que es la dirección de propagación, es mucho más acentuado que en otras direcciones. Finalmente se representa el perfil de temperaturas de un transecto para corroborar los anteriores resultados.

En las tareas de monitoreo de incendios también están contempladas la determinación de la temperatura y superficie del fuego, así como la determinación posterior de la intensidad energética del mismo. 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



\* Figura 5. Análisis de una quema controlada mediante el sensor BIRD.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

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. La resolución del sistema de las dos ecuaciones de Dozier 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 1.10-4 en la determinación del parámetro f, lo que resulta 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:

$$\tau_{i} = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot \phi_{i}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \phi_{i}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad i = \text{MIR, TIR}$$

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:

$$T_{f} = \frac{\sum_{k} T_{f,k} \cdot S_{k}}{S} , S = \sum_{k} S_{k}$$

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:

$$I = \sum_{k} \sigma S_{k} \left( T_{f,k}^{4} - T_{a}^{4} \right)$$

siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann, S<sub>k</sub> la superficie del fuego y T<sub>a</sub> 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.

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<sub>f</sub> 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.

En el caso del sensor MODIS a la zona afectada la fue aplicada 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.



Figura 6. Variaciones del resultado de Tf e Intensidad en función de la temperatura de superficie, para el píxel MODIS más afectado.

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. 6.

#### CONCLUSIONES

El sensor BIRD se presenta como el sensor más capacitado para realizar la detección de focos pequeños de incendios. Sus capacidades, derivadas de su excelente resolución espacial en el térmico, así como la aplicación de un rango dinámico de calibración radiométrica mejoran ostensiblemente las capacidades de AVHRR y MODIS en la tarea de análisis de sub-píxel. Al tratarse de un satélite experimental, su frecuencia temporal es muy baja, y su reducido campo de visión no satisfacen la obtención de resultados diariamente.

En la aplicación del análisis de subpíxel, se observa que 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.

#### AGRADECIMIENTOS

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 y Proyecto DEMO-BIRD financiado por la ESA.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ARINO, O. AND ROSAZ, J. 1997, 1998 and 1999. World ATSR fire atlas using ERS-2 ATSR-2 data. Proceedings of the Joint Fire Science Conference, Boise, Idaho, 15-17 June 1999, edited by L.F. Neuenschwander, K.C. Ryan and G.E. Gouberg. University of Idaho and the International Association of Wildland Fire; pp. 177-182.
- 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.
- CASANOVA, J. L., CALLE, A. AND GONZÁ-LEZ-ALONSO F. 1998. A Forest Fire Risk Assessment obtained in real time by means of NOAA satellite images. Forest Fire Research. III. International Conference on Forest Fire Research and 14<sup>th</sup> Conference on Fire and Forest Meteorology. Volume I: 1169-1179.

- DOZIER, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Rem. Sens. Env.* 11: 221-229.
- KAUFMAN, Y. J., TUCKER, C. J. AND FUNG I. 1990. Remote sensing of biomass burning in the tropics. *Journal of Geophysical Research*. 95: 9927-9939.
- KAUFMAN, Y. AND JUSTICE, C. 1998. MODIS Fire Products. MODIS Science Team. EOS ID#2741.
- LEE, T. M. AND TAG, P. M. 1990. Improved detection of hot-spots using the AVHRR 3.7 mm channel. *Bull. American Meteorology Society.* 71: 1772-1730.
- LORENTZ, E. AND SKRBEK, W. 2001. Calibration of a bi-spectral infrared push-broom imager. Proceedings of SPIE, Infrared Spaceborne Remote Sensing IX, San Diego, 29 july-3 August 2001, 4486, 90-103.
- MATSON, M. AND DOZIER, J. 1981. Identification of subresolution high temperatures sources using a thermal IR sensor. *Photo Engr. and Remote Sensing*. 47(9): 1311-1318.

- ORTEGA, Y., CALLE, A., GONZÁLEZ-ALON-SO, F. DELGADO, J. A. 2003. Análisis de las técnicas de cartografía de incendios forestales mediante teledetección de alta resolución espacial. Teledetección y Desarrollo Regional. Ed. X Congreso Nacional de Teledetección. Pp. 167-170.
- PRINS, E. M. AND MENZEL, W. P. 1993. Application of the GOES VAS Automated Biomass Burning Algorithm (ABBA) in South America: A trend analysis from 1983-1991.
- PRINS, E AND SCHMETZ, J. 1999. Diurnal fire active detection using a suite of international geoestationaty satellites. GOFC 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: 3-24.
- WAN, Z. 1999. MODIS land-surface temperature. Algorithm theoretical basis document.
- ZHUKOV, B. 2003. Comunicación personal del DLR.

# NOTICIAS

LIBRO: RECENT ADVANCES IN QUANTI-TATIVE REMOTE SENSING, Editor: José A. Sobrino, Servicio Publicaciones Universitat de Valencia, ISBN: 84-370-5515-6, 1000 pp.

Este libro contiene las comunicaciones al primer congreso Internacional Recent Advances in Quantative Remote Sensing, organizado por la Unidad de Cambio Global de la Universitat de Valencia, que se celebró en el Auditorio de Torrent (VALEN-CIA), durante los días 16 al 20 de Septiembre del 2002. El congreso reunió a más de 200 congresistas de un total de 25 países. El alto nivel científico de los asistentes queda claramente reflejado en la publicación. El libro incluye un total de 133 trabajos repartidos en 5 temas: Espectro solar, Sinergia, Infrarrojo Térmico, Microondas, Proyectos recientes y Misiones de Observación de la Tierra. El caracter puntero de los trabajos publicados será sin duda de gran utilidad para la comunidad científica tanto nacional como internacional en teledetección.

Aquellos interesados en adquirir el libro contactar con el Servicio de Publicacions de la Universitat de Valencia (Tf: 96 3864115, e-mail: <u>publicacions@uv.es</u>).