

## Índices de Fuego para la detección y seguimiento de Incendios Forestales

J.M. Aranda, J. Meléndez, A.J. de Castro, F. López

Laboratorio de Sensores Teledetección e Imagen Infrarroja (LIR). Dept. Física. Universidad Carlos III, Avda. Universidad, 30, 28911-Leganés. Madrid [jmaranda@fis.uc3m.es](mailto:jmaranda@fis.uc3m.es), [melendez@fis.uc3m.es](mailto:melendez@fis.uc3m.es), [decastro@fis.uc3m.es](mailto:decastro@fis.uc3m.es), [flm@fis.uc3m.es](mailto:flm@fis.uc3m.es)

### Resumen

Las cámaras infrarrojas son cada vez más utilizadas en la detección y seguimiento de incendios forestales desde tierra. Sin embargo, su alta sensibilidad las hace propensas a falsas alarmas. Este inconveniente puede en principio superarse usando información espectral. En este trabajo se muestra cómo una cámara de infrarrojo medio, dotada de una rueda de filtros, permite la obtención de un “índice de fuego” que mejora la detección de incendios. Este sistema mejora también notablemente el seguimiento de los incendios activos, al discriminar las diferentes regiones y permitir la medida de parámetros como la velocidad de propagación y la altura de llama a través de humo denso.

### 1. Introducción

Los incendios forestales son una de las principales amenazas ecológicas en los países mediterráneos. La lucha contra los incendios incluye tareas de prevención, alarma y extinción, así como la gestión de los terrenos quemados. Los sensores infrarrojos (IR) han demostrado ser de utilidad en todas estas etapas. Sensores IR embarcados en satélite se utilizan para elaborar mapas de riesgo hacer el seguimiento de la regeneración de los terrenos tras el fuego e incluso para la detección y monitorización de incendios activos. En este último caso, el sensor más empleado ha sido el AVHRR a bordo de los satélites NOAA, a pesar de no haber sido diseñado para este objetivo, y presentar por eso problemas en sus aplicaciones a incendios forestales [1]. En la actualidad hay abiertos varios programas para desarrollar plataformas espaciales específicas para la detección de incendios forestales y hay resultados de programas piloto como el BIRD [2].

Hasta ahora, la mayor parte de los sistemas de vigilancia que operan sobre el terreno se basan en identificar el humo y trabajan en la banda visible o de infrarrojo cercano. Sin embargo, también aquí hay una clara tendencia hacia el uso de sistemas IR; la mayoría de las veces, por razones económicas, en la banda de infrarrojo térmico (TIR, de 8 a 12  $\mu\text{m}$ ). Dos

ejemplos son el sistema español BOSQUE, desarrollado por Bazán-Faba, y el sistema italiano BSDS, desarrollado por FISIA [3].

Los sistemas IR tienen dos importantes ventajas. Ante todo, la radiación emitida por un incendio en el IR es varios órdenes de magnitud mayor que en el visible, lo que en principio redundaría en sistemas mucho más sensibles, capaces de una alerta más temprana. En segundo lugar, en la fase de extinción, el IR permite visualizar el avance del frente de fuego a través del humo. Sin embargo, la propia sensibilidad de los sistemas IR favorece las falsas alarmas, debidas a reflejos solares, puntos calientes en industrias o vehículos, o incluso al suelo calentado por el sol.

En un trabajo anterior [4] mostramos, a partir del análisis del espectro de emisión de un incendio forestal, Fig. 1, como un sistema IR biespectral puede resolver en buena medida este problema. Se trata de complementar la imagen TIR con otra imagen en la banda de IR medio (MIR, de 3 a 5  $\mu\text{m}$ ) y construir con ambas una imagen de “índice de fuego”, análogo al conocido “índice de vegetación”. Si  $L_M$  y  $L_T$  son, respectivamente, las radiancias en las bandas MIR y TIR, se define el índice de fuego (Fire Index, FI) como:

$$FI = (L_M - L_T) / (L_M + L_T) \quad (1)$$

Dada la intensa banda de emisión de  $\text{CO}_2$  en el MIR, Fig 1, los valores del FI serán bastante mayores para un fuego que para un cuerpo gris. En efecto, medidas experimentales a cortas distancias (unos pocos metros) muestran que un fuego da  $FI \approx 0.5$ . Los cuerpos grises dan valores negativos de FI si su temperatura es menor que  $500^\circ\text{C}$ , y positivos pero inferiores a los del fuego si su temperatura es mayor que  $500^\circ\text{C}$ .

Sin embargo, el FI tiene algunos inconvenientes: no discrimina bien los reflejos solares, y pierde eficacia a largas distancias. A esto hay que añadir que obtener una imagen de FI exige el uso de dos cámaras IR que proporcionen imágenes *corregistradas, simultáneas, y calibradas* en un rango dinámico muy amplio, lo cual es un problema técnico difícil.

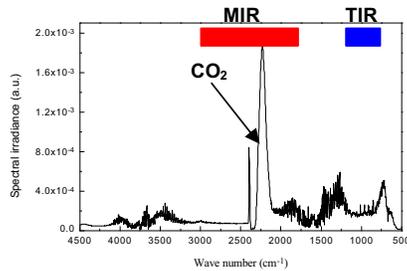


Figura 1: Espectro de emisión de un incendio forestal. La escala horizontal corresponde a números de onda:  $\lambda(\mu\text{m})=1000/n^\circ$  de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ).

Un índice alternativo propuesto en [4] es el “índice de fuego de IR medio” (Medium IR Fire Index, MFI) que compara la radiación en dos subbandas del IR medio, una de ellas (M1) en la región en la que emite el  $\text{CO}_2$  y otra (M2) en longitudes de onda más cortas fuera de esa región:

$$\text{MFI} = (L_{M1} - L_{M2}) / (L_{M1} + L_{M2}) \quad (2)$$

El MFI tendrá valores altos en las regiones de llama, al igual que el FI. Pero a diferencia de éste, tendrá valores bajos para cuerpos grises calientes y más altos para cuerpos grises fríos y fondos. El estudio teórico de [4] mostraba que el MFI discrimina muy bien los reflejos solares y pierde menos eficacia a largas distancias que el FI.

Desde el punto de vista práctico, el MFI tiene una importante ventaja: puede obtenerse con una sola cámara. La cámara debe estar dotada de una rueda con al menos dos filtros pasobanda, que gire a gran velocidad para que las imágenes en las subbandas sean casi *simultáneas*. El uso de una sola cámara, además de ser más económico, proporciona directamente imágenes *corregistradas* y simplifica mucho la *calibración*. Por otra parte, montando más de dos filtros en la rueda pueden obtenerse imágenes multiespectrales.

En este trabajo se estudia experimentalmente la eficacia del MFI para la detección de incendios a varias distancias. Se ha empleado una cámara que proporciona imágenes en tres subbandas MIR. Se muestra también cómo un sistema trispectral puede mejorar la detección, empleando del análisis de componentes principales (PCA).

## 2. Equipo experimental y medidas

Se ha utilizado una cámara IR Thermosensorik 384M, con un rango de trabajo de 1.5 a 5  $\mu\text{m}$ , que emplea un array de 384 x 288 detectores CMT refrigerado por ciclo Stirling. La cámara está dotada

de una rueda giratoria con cuatro filtros. Uno de ellos (F1) corresponde a la banda completa y los otros están centrados, respectivamente, en: F2 = 4,8  $\mu\text{m}$  (2083  $\text{cm}^{-1}$ ), F3 = 4,2  $\mu\text{m}$  (2381  $\text{cm}^{-1}$ ), y F4 = 3,6  $\mu\text{m}$  (2778  $\text{cm}^{-1}$ ), todos con una anchura a mitad de altura de 0,4  $\mu\text{m}$ . Se ajustó la sensibilidad de la cámara para obtener una buena relación señal-ruido en las bandas F2, F3 y F4, por lo que las imágenes en la banda completa (F1) estaban saturadas. Hemos utilizado F2 como banda  $L_{M1}$  y F4 como banda  $L_{M2}$ .

La cámara adquiría imágenes a razón de 150 por segundo, con un tiempo de integración de 40  $\mu\text{s}$ . Se han realizado tres ensayos a tres distancias distintas (Tabla I).

Tabla 1: Resumen de los datos de los ensayos

Distancia (m)	Combustible	Carga ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	Tamaño aprox.(m)
Corta (7 m)	acícula de pino	2.00	0.8 x 6
Medía (180 m)	hojarasca y matorral	4.84	60 x 80
Larga (650 m)	hojarasca y matorral	4.66	80 x 110

La Fig 2 muestra el aspecto visible de una de las quemadas, a una distancia de 180 m. La quema avanzaba alejándose del punto de observación (en la imagen, hacia arriba), pero el humo no permite distinguir ningún detalle.

## 3. Resultados y Discusión

Usando el filtro de 3,6  $\mu\text{m}$ , Fig. 3, se aprecia perfectamente la región quemada y la posición del frente. La señal de las llamas, sin embargo, es muy débil, lo que perjudicaría la detección de incendios incipientes. En contraste, las llamas son muy visibles en la imagen obtenida con el filtro de 4,8  $\mu\text{m}$ , Fig. 4, hasta el punto de que, al proyectarse contra el fondo no quemado, enmascaran la posición del frente.

Finalmente, la imagen de MFI muestra un buen contraste entre las llamas (brillantes) y la zona de rescoldo (oscura), Fig. 5.



Figura 2: Aspecto visible de un instante de la quema a 180 m.

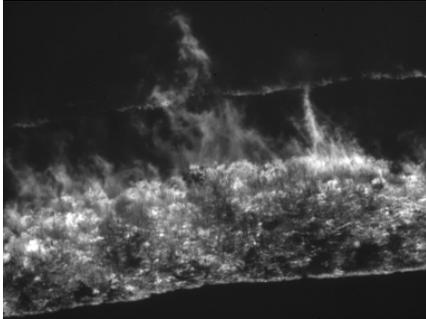


Figura 3: La misma escena en la banda de 3,6 μm.

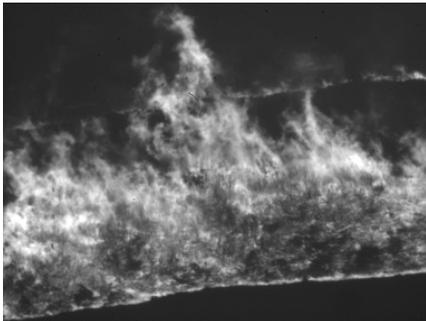


Figura 4: La misma escena en la banda de 4,8 μm.

Puede entenderse este comportamiento del MFI examinando la Fig. 6, que muestra, con trazo continuo, los valores teóricos de MFI en función de la distancia, para una llama y para cuerpos negros a dos temperaturas. Estos valores se han obtenido a partir de

los espectros de cuerpo negro (teórico) y de de la llama de un incendio a 10m (experimental), simulando con el programa MODTRAN la transmisión atmosférica (se obtuvieron también valores para un reflejo solar, que no se muestran por ser el MFI menor que -0.6 para todas las distancias).

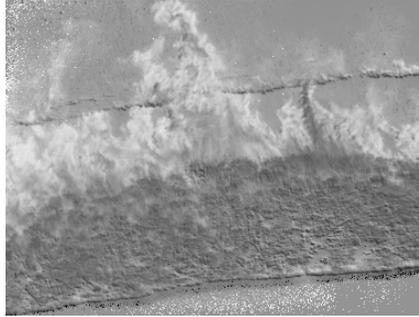


Figura 5: La imagen de MFI para la misma escena.

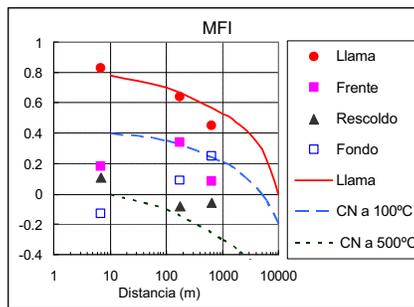


Figura 6: Valores teóricos (línea continua) y experimentales de MFI en función de la distancia.

En esta misma figura se muestran los valores de MFI obtenidos experimentalmente con el sistema de imagen MIR para distintas regiones de las tres quemadas estudiadas. Se aprecia que hay un buen acuerdo con la predicción teórica para las regiones de llama. En las regiones de rescoldo y frente hay una importante contribución de cuerpo negro a alta temperatura, lo que da valores bajos de MFI, pero también una proporción variable de llama, más acentuada en el frente, que tiende a elevar estos valores. Hay pues bastante variabilidad, pero los resultados siempre se encuentran entre las líneas de cuerpo negro de 100 y 500°C. Las regiones de fondo deberían comportarse como un cuerpo negro a temperatura ambiente, dando valores más elevados de MFI. Los valores obtenidos son algo más bajos de lo previsto, pero pueden explicarse teniendo en cuenta

que las cámaras están configuradas para detectar niveles altos de radiancia, y que cualquier error en el nivel medido del fondo se amplifica al calcular el MFI.

Hasta aquí se han utilizado sólo dos bandas de las tres que proporciona nuestra cámara. Una manera de usar la información espectral completa es mediante el análisis de componentes principales. Para la escena estudiada, se encuentra que las dos primeras componentes principales son:

$$PC1 = 0.54 * F2 + 0.35 * F3 + 0.76 * F4 \quad (3)$$

$$PC2 = 0.83 * F2 - 0.07 * F3 - 0.56 * F4 \quad (4)$$

Claramente, la 2ª componente principal (PC2) es similar al MFI, pero, como se aprecia en la Fig. 7, resalta mejor aún las llamas.

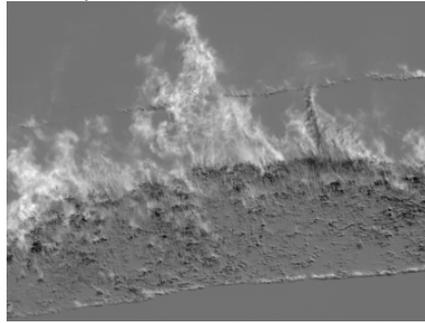


Figura 7: Imagen de PC2 para la escena de las figuras anteriores.

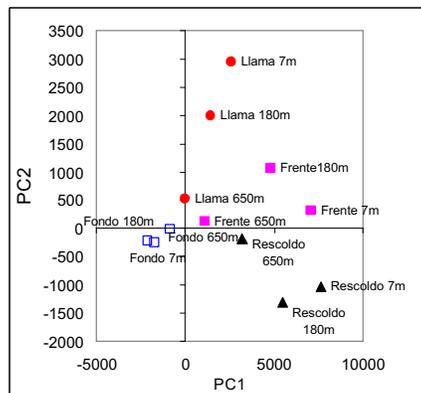


Figura 8: Valores de las dos primeras componentes principales para distintas regiones y distancias.

Combinando PC1 y PC2 puede lograrse una separación óptima de las diferentes regiones, como se

aprecia en la Fig. 8. Se aprecia como se deteriora la capacidad de separación del método a medida que aumenta la distancia.

#### 4. Conclusiones

En un trabajo anterior [4] se introdujo en concepto de *índice de fuego*, en dos variantes FI (bandas MIR-TIR) y MFI (dos subbandas MIR). En este trabajo se obtienen de manera experimental imágenes de MFI desde tierra para incendios a tres distancias distintas, demostrándose cómo, al resaltar las llamas frente a otro tipo de objetos calientes, MFI mejora el rechazo de falsas alarmas, y permite monitorizar el avance del incendio y medir parámetros como velocidad de avance y altura de llamas. Se está trabajando actualmente para automatizar el cálculo de estos parámetros a partir de secuencias de imágenes de una quema, incorporando la información topográfica. Se espera que esto permita medir la energía radiativa del incendio (Fire Radiative Energy, FRE).

#### 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer su colaboración en las quemas a José Antonio Vega y Pedro Cuiñas (CIF-Lourizán) y a Carmen Hernando y Mercedes Guijarro (CIFOR-INIA).

#### 6. Referencias

- [1] Li, ZQ; Fraser, R; Jin, J; Abuelgasim, AA; Csiszar, I; Gong, P; Pu, R y Hao, W. "Evaluation of algorithms for fire detection and mapping across North America from satellite" *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, 108 (D2),4076-4076, 2003
- [2] Wooster, M.J., Zhukov, B. y Oertel, D. "Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products" *Remote Sensing of Environment* 86, 83-107, 2003
- [3] Ollero, A., Martínez-de Dios J.R., y Arrúe, B. "Integrated systems for early forest fire detection". *3<sup>rd</sup> International Conference on Forest Fire Research*. Luso-Coimbra, Nov 16-20, 1998.
- [4] Briz, S., de Castro, A.J., Aranda, J.M., Meléndez, J. y López, F. "Reduction of false alarm rate in automatic forest fire infrared surveillance systems" *Remote Sens Environ* 86, 19-29, 2003.