

ANÁLISIS ESPECTRAL INFRARROJO DE LLAMAS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE INCENDIOS FORESTALES

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

jmaranda@fis.uc3m.es

*LIR-Laboratorio de Sensores, Teledetección e Imagen IR. Dept. Física. Universidad Carlos III de Madrid.
Avda. Universidad, 30. 28911. Leganés (Madrid).*

RESUMEN

En los últimos años, el empleo de cámaras infrarrojas (IR) en aplicaciones relacionadas con los incendios forestales está siendo cada vez más habitual. Las cámaras proporcionan una información con una resolución espacial y temporal única, pero los métodos estándar de la termografía pueden dar resultados erróneos debido a la compleja estructura espectral de la emisión IR del fuego. En este trabajo se ha usado un sistema de imagen bi-espectral, en las bandas del infrarrojo medio y térmico, para estudiar incendios forestales a escala de laboratorio, demostrándose que permite obtener información valiosa sobre la temperatura del fuego y la distribución espacial de sus distintas regiones (llamas, rescoldos con y sin llama, cenizas y fondo). Teniendo en cuenta la transmitancia atmosférica y la pérdida de resolución espacial, se han simulado medidas a larga distancia, concluyendo que las llamas podrían distinguirse de otras regiones del fuego con medidas bi-espectrales incluso a distancia de 1 km.

ABSTRACT

In the last years, infrared cameras have been used increasingly in forest fire related applications. They provide information of unique spatial and temporal resolution, but the standard methods of thermography may give erroneous results due to the complex spectral structure of the IR emission of fire. In this work, a two-band imaging system, operating in the medium IR and thermal IR bands, has been used to study laboratory forest fires, demonstrating that valuable information can be obtained on fire temperatures and on the spatial distribution of the different fire regions (flames, flaming and nonflaming embers, ashes and background). Long distance measurements have been simulated by taking into account atmospheric transmittance and loss of spatial resolution. It is concluded that bi-spectral measurements at a distance of 1 km should still resolve flames from other fire regions.

Palabras Clave: incendios forestales, teledetección infrarroja, espectrometría de imagen IR, procesado bi-espectral IR.

INTRODUCCIÓN

Los sensores IR están siendo cada vez más utilizados, tanto desde satélite como sobre el terreno o aerotransportados (Young, 1994). Sin embargo, estas técnicas han estado casi siempre confinadas a la detección de incendios forestales, dejando pasar por alto sus mucho más amplias aplicaciones a la investigación sobre incendios. Por ejemplo la mayoría de los estudios utilizan termopares, robustos, baratos y fáciles de usar, pero que tienen respuesta lenta, y proporcionan sólo medias puntuales e intrusivas. Por contra, la termografía IR es una técnica no intrusiva capaz de proporcionar temperatura casi instantánea sobre un área de conjunto sin un previo despliegue de una rejilla de sensores. Esta técnica se aplica usualmente a sólidos, considerados cuerpos grises opacos, mientras que la transmitancia de una llama no es cero y su emisión depende fuertemente de la longitud de onda, por lo que la termografía estándar (operando sólo en una banda espectral) puede dar resultados erróneos al

aplicarse a fuegos. Un sistema de imagen con resolución espectral se hace necesario para vencer tal dificultad. La resolución espectral es también una herramienta válida para discriminar las falsas alarmas cuando se usan cámaras para detectar incendios forestales. Los sistemas de imagen *Multi e Hiperspectrales* se utilizan ya en satélite y aerotransportados, pero son extremadamente caros e inabordables para su uso en tierra (Wolfe, 1997).

MEDIDAS EXPERIMENTALES

Espectrómetro bi-espectral de imagen IR

En este trabajo se ha utilizado un sistema de imagen bi-espectral IR desarrollado en nuestro laboratorio (Aranda et alii. 2001) a partir de de dos cámaras IR comerciales de IR medio (3 a 5 μm) y térmico (8 a 12 μm). Este equipo proporciona imágenes simultáneas en ambas bandas, que pueden ser co-registradas y calibradas. Permitiendo así aplicar las técnicas de procesado espectral basadas en la comparación píxel a píxel de ambas bandas

desarrolladas para el análisis de imágenes multibanda de satélite. La aplicación de estas técnicas hace posible la clasificación de diferentes regiones de la escena del fuego (llamas, frente de llama, rescoldo, tierra caliente quemada y fondo) y proporcionan una estimación más realista de sus temperaturas.

El sistema de imagen IR desarrollado se ha utilizado para obtener imágenes de quemas de acícula de pino (*Pinus pinea*) realizadas en el túnel del fuego del CIFOR-INIA (Figura 1).

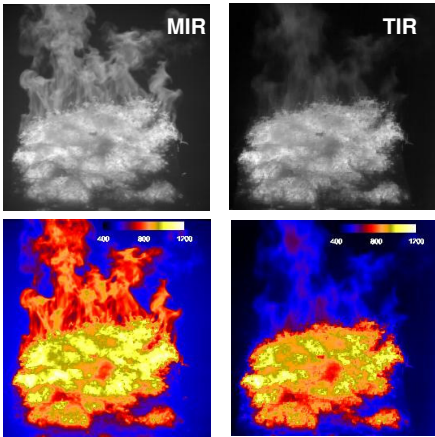


Figura 1.- Arriba: Imágenes simultáneas MIR y TIR obtenidas con el sistema bi-espectral en una quema en el túnel del fuego. Abajo: Las mismas imágenes en falso color y con escala de temperatura en Kelvin.

Temperatura del fuego

Desde el punto de vista de la termografía, la compleja estructura espectral de la emisión IR del fuego puede ser descrita mediante un factor de emisividad espectral $\epsilon(\lambda)$. Si la medida de radiancia no está corregida por la emisividad, una cámara IR supondrá que el objeto es un cuerpo negro y proporcionará una temperatura más baja que la real, denominada temperatura de brillo.

Para una llama (Figura 1) la emisividad es mayor en la región MIR es mayor que en la TIR y por lo tanto:

$$\text{Llama} \quad T_{\text{real}} > T_{\text{brillo}}^{\text{MIR}} > T_{\text{brillo}}^{\text{TIR}} \quad [1]$$

Por otro lado, el suelo y los rescoldos se comportan prácticamente como cuerpos negros, así:

$$\text{Suelo, rescoldo} \quad T_{\text{real}} \geq T_{\text{brillo}}^{\text{MIR}} \geq T_{\text{brillo}}^{\text{TIR}} \quad [2]$$

Clasificación de escenas de fuego

Como se ha visto la baja emisividad de las llamas implica $T_{\text{real}} > T_{\text{brillo}}^{\text{MIR}} > T_{\text{brillo}}^{\text{TIR}}$, lo que significa que las llamas son apenas visibles en las imágenes TIR y en las MIR pueden confundirse con suelo

relativamente frío. Este efecto puede ser una fuente de falsas alarmas, en particular en detección a largas distancias. Sin embargo, las diferentes temperaturas de brillo de las bandas MIR y TIR pueden ser utilizadas con ventaja en la identificación de llamas y, más generalmente, para “clasificar” la escena del fuego en diferentes regiones.

Las técnicas de clasificación son bien conocidas en el campo de la teledetección. En nuestro caso se explican mejor en relación con el dispersograma MIR-TIR (Figura 2). En esta gráfica cada punto representa un píxel de la imagen bi-espectral, siendo su abscisa la temperatura de brillo TIR y su ordenada la temperatura de brillo MIR. Los píxeles con comportamiento de cuerpo negro o gris tendrán sus puntos a lo largo de la diagonal ($T_{\text{MIR}}=T_{\text{TIR}}$). Los píxeles de llama, con $T_{\text{MIR}}>T_{\text{TIR}}$, estarán por encima de esa línea. Para una escena compleja aparecerán en el dispersograma agrupaciones de píxeles (*clusters*), correspondiente a diferentes regiones (“clases”) en la imagen.

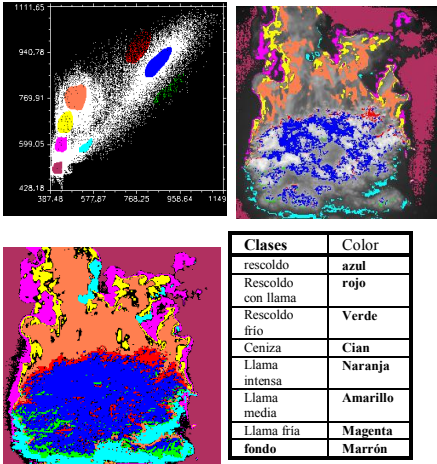


Figura 2.- Arriba: regiones de entrenamiento sobre el dispersograma y correspondencia sobre la imagen MIR. Abajo: mapa de clases y código de colores.

Para clasificar la escena, cada píxel debe ser asignado a una clase específica. Esto puede hacerse, si se conoce la distribución estadística de los píxeles dentro de cada clase, mediante un algoritmo clasificador de máxima verosimilitud (Richards & Jia, 1999). Para el “entrenamiento del clasificador” deben elegirse diferentes regiones de interés constituidas por grupos de píxeles con una distribución estadística similar. Esta elección en teledetección generalmente se realiza sobre la

imagen, debido a la información que se conoce *a priori* de las mismas.

En nuestro caso, este procedimiento de entrenamiento no es práctico debido a que no existen zonas de entrenamiento bien definidas en una escena de fuego, y tampoco se dispone de información *a priori*, para el caso de un fuego real. La solución adoptada para salvar este inconveniente, dada la fácil interpretación del dispersograma en dos dimensiones, es realizar el entrenamiento sobre el dispersograma. En la Figura 2 (arriba) se muestran las regiones de entrenamiento sobre el dispersograma y su correspondencia sobre la imagen MIR. Abajo se muestra el mapa de clases obtenido mediante la clasificación por máxima verosimilitud y la tabla con la correspondencia de las clases y el código de colores empleado.

Efectos de la distancia

El procedimiento descrito ha permitido identificar regiones fiablemente en imágenes de fuego adquiridas a corta distancia (en el caso de la Figura 1 la distancia fue de 10 m). La mayoría de las aplicaciones de clasificación de incendios (por ejemplo, la evaluación de las prestaciones de los sistemas IR de alarma de incendios o la validación de los nuevos satélites específicos para el fuego) son, sin embargo, para imágenes a largas distancias. En esta sección se simularán los efectos de la distancia sobre las imágenes de la Figura 1.

Hay dos tipos de efectos de la distancia: cambios en la radiancia debidos a la atmósfera (degradación radiométrica de las imágenes) y pérdida de la resolución espacial (degradación espacial de las imágenes). La atmósfera atenúa la radiación del fuego por absorción y scattering, y añade a ello su propia emisión. Esta emisión puede despreciarse para los píxeles calientes, por lo que la atenuación será descrita por un factor de transmisión. Este factor se ha calculado para un camino de 1 km en las rangos espectrales MIR y TIR, mediante el software “MODTRAN” (Ontar, 1996). La característica principal del espectro de transmitancia es la fuerte absorción del CO₂ atmosférico en 4.2 μm . Debido a esto, la atenuación con la distancia es mayor para la cámara MIR., y dentro de la banda MIR, la atenuación es mayor para las llamas (cuya emisión es debida principalmente al CO₂ caliente) que para los rescoldos (que son emisores tipo cuerpo gris)

Por tanto, para simular los efectos de la distancia, diferentes transmitancias deben ser utilizadas para las imágenes TIR y MIR, y para diferentes regiones dentro de la imagen MIR. Hemos reagrupado las clases (Figura 2) en tres categorías: llama, rescoldo

con llama (frente de llama y reavivamientos) y cuerpos grises. Para cada una de estas regiones se ha calculado una transmitancia promedio (Tabla 1) a partir de la transmitancia espectral y de la radiancia emitida por la región, medida con un espectrorradiómetro.

Tras aplicar el factor de transmitancia la temperatura de brillo descenderá en ambas bandas, pero este decrecimiento será algo mayor en la MIR, y más pronunciado para la región con llama. Por tanto, la atenuación cambiará la forma del dispersograma, conduciendo los puntos en la rama de llama a la región de cuerpo gris ($T_{\text{MIR}} \approx T_{\text{TIR}}$).

Banda espectral	Clase	Transmitancia (1 km)
MIR (3 – 5 μm)	$\tau_{\text{prom_llama}}$	0.2426
	$\tau_{\text{prom_llama+rescoldo}}$	0.4617
	$\tau_{\text{prom_MIR}}$	0.5476
TIR (8 – 12 μm)	$\tau_{\text{prom_TIR}}$	0.7259

Tabla 1.- Transmitancias promedio para un camino óptico de 1 km, para la banda TIR y para las tres diferentes regiones consideradas en la banda MIR.

A estos efectos radiométricos de la distancia debemos añadir la pérdida de resolución espacial. Las imágenes originales, con un tamaño de 256 x 256 píxeles, han sido degradadas espacialmente para simular la resolución espacial que proporcionaría a 1km, con nuestro sistema, una lente con focal de 250 mm. Este es un valor razonable para un sistema de vigilancia por imagen. (Figura 3).

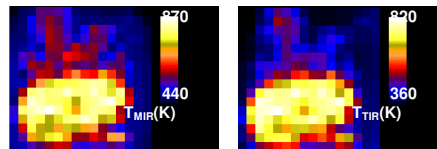


Figura 3.- Imágenes de la Figura 2 degradadas espacial y radiométricamente a 1 km de distancia.

Es claro que la llama puede distinguirse todavía visualmente en la imagen MIR. Construyendo el dispersograma (Figura 4, izquierda), la información puede ser apreciada cuantitativamente. Los agrupamientos son obviamente mucho menos densos que en la Figura 2. Las máximas temperaturas han decrecido y la rama de llama se ha encogido hacia la línea del cuerpo gris. Sin embargo las regiones de entrenamiento pueden todavía ser designadas en el dispersograma. En aras de la claridad, los puntos seleccionados para el entrenamiento se muestran sobre una gráfica aparte (Figura 4). La Figura 4 muestra a la izquierda los correspondientes “píxeles de entrenamiento” y a la derecha las clases proporcionadas por un clasificador de máxima

verosimilitud operando sobre ellas. Los píxeles negros no han sido clasificados por el algoritmo

Puede concluirse de todo ello que, apesar de la pérdida de estructura en el dispersograma, es posible todavía clasificar la imagen, e incluso distinguir clases con llama. Este es un interesante resultado, considerando que la mayoría de los estudios de fuego a largas distancias ignoran la emisión de las llamas. Por ejemplo, el bien conocido método de Dozier (Dozier 1981) atribuye la diferencia en la temperaturas MIR y TIR en las imágenes AVHRR a la presencia de un punto caliente de tamaño subpíxel y calcula el tamaño y la temperatura del punto caliente asumiendo que la temperatura del fondo es conocida y que todos los emisores son cuerpos negros. Este procedimiento está justificado en imágenes de satélite, con el fin de dar una primera estimación de los parámetros del fuego, pero cuando se analizan imágenes adquiridas a distancias más cortas, como las de sistemas en tierra o de plataformas aerotransportadas, debería considerarse la posibilidad de que las diferencias de temperatura en las bandas MIR y TIR indiquen la presencia de llamas, más que una inhomogeneidad subpíxel.

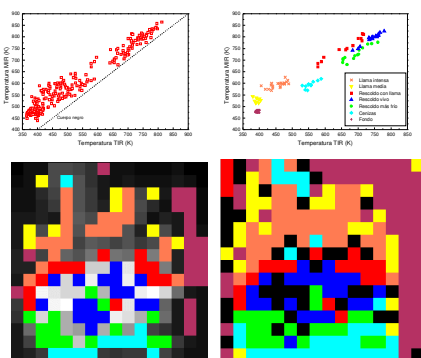


Figura 4.- Arriba: (Izquierda) Dispersograma de las imágenes de la Figura 3. (Derecha) Selección de "píxeles de entrenamiento" Abajo: (Izquierda) Posición sobre la imagen de los píxeles de entrenamiento (Derecha) Mapa de clases.

La simulación descrita en esta sección respalda los resultados reportados en (Aranda *et alii.*, 2001), donde la observación de un incendio forestal desde un helicóptero con el sistema de imagen bi-espectral aquí descrito, a una distancia de alrededor de 1.5 km, todavía permitió resolver la posición del frente de llama. Esta posibilidad puede reducir significativamente la tasa de falsa alarma en los sistemas de alarma de detección de incendios forestales.

CONCLUSIONES

Un sistema de imagen bi-espectral construido a partir de dos cámaras comerciales MIR y TIR ha sido utilizado para el estudio de laboratorio de incendios forestales a cortas distancias (10 m). Las diferencias entre las temperaturas de brillo MIR y TIR proporcionan información muy útil para clasificar la escena en diferentes regiones (llamas, rescoldos con y sin llama, cenizas y fondo). Esta clasificación tiene interés en sí misma, pero es también un primer paso necesario para simular con exactitud los efectos de la distancia sobre las imágenes de incendios. Esta simulación muestra que, si la resolución espacial es suficientemente buena, las llamas pueden ser resueltas frente a otras regiones del incendio a distancias de 1 km o más.

REFERENCIAS

- Aranda, J.M.; Meléndez, J.; de Castro, A.J. and López, F. "Forest fire studies by medium infrared and thermal infrared thermography". Proceedings of Thermosense XXIII, Rozlosnik, A.E. and Dinwiddie, R.B eds, SPIE Proc. **vol.** 4360, **pp.** 161 – 168, Orlando, 2001.
- Dozier, Jeff. "A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution". Remote Sensing of Environment **vol.** 11, **pp.** 221-229, 1981
- Ontar Corporation. "PcModWin3 Manual", Ontar Corporation, North Andover, Massachusetts, January, 1996.
- Richards, J.A.; Jia, Xiuping. "Remote Sensing Digital Image Analysis". 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1999.
- Wolfe, William L. "Introduction to Imaging Spectrometers". SPIE Optical Engineering Press, 1st ed, Bellingham, Washington (USA) 1997
- Young, R. "Utilization and Application of Infrared Techniques in Forest Fire Detection and Suppression Operations", in *Infrared Methodology and Technology*, X.P.V. Maldague editor, Gordon and Breach Science Publishers, pp453-468 (1994)

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al CIFOR-INIA su colaboración en las medidas del túnel del fuego. Este trabajo ha sido financiado con el proyecto de la Comunidad de Madrid nº 07M/0037/2000; y los proyectos europeos: FIRESTAR EVG1-CT-2001-00041 y EUFIRELAB EVR1-CT-2002-40028