

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE UN FRENTE DE LLAMA A TRAVÉS DE HUMO DENSO Y CLASIFICACIÓN DEL ESCENARIO MEDIANTE CÁMARA MULTIESPECTRAL INFRARROJA.

J.M. Aranda⁽¹⁾, J. Meléndez⁽¹⁾, A.J. de Castro⁽¹⁾, F. López⁽¹⁾, P. Cuiñas⁽²⁾ y J.A. Vega⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Infrarrojo. (LIR-UC3M). Av. Universidad, 30. 28911 Leganés. jmaranda@fis.uc3m.es

⁽²⁾ Centro de Investigaciones Forestales y Ambientales-Lourizán. Departamento de Protección Ambiental – Apartado 127. 36080 Pontevedra.

Tel. 34 91 347 41 96 – Fax 34 986 85 64 20 – email:jvega.cifal@siam-cma.org

Resumen

El estudio del comportamiento de los incendios forestales requiere la medida de sus parámetros físicos característicos. Esta medida, para experiencias en condiciones similares a las reales, presenta importantes dificultades. Recientemente se ha extendido mucho el uso de sistemas ópticos, como cámaras de video y cámaras infrarrojas (IR), que permitirían medir a distancia algunos parámetros, pero en la práctica los resultados se limitan casi siempre a la visualización. Así, en las cámaras de video, el efecto del humo impide a menudo el seguimiento de la propagación y la medida de la altura de llama, mientras que en las cámaras IR, que en principio podrían proporcionar también datos de temperaturas y potencias radiadas, aparecen dificultades debido a la complejidad espectral de la emisión IR de un incendio. En este trabajo se propone un método que permite solucionar estos problemas mediante el uso de una cámara IR a la que se dota de resolución espectral en tres diferentes sub-bandas. Esto permite seguir en tiempo real la evolución del frente de llama a través del humo denso, dato clave para la ayuda a la toma de decisiones en extinción. Usando técnicas de clasificación del escenario, pueden distinguirse las diferentes regiones del incendio (llamas, rescoldos calientes o fríos, fondo), lo que permite dar cuenta de los efectos de la estructura espectral de su emisión y es por tanto la base para la ulterior obtención de parámetros físicos.

Palabras clave: Incendio forestal, cámaras infrarrojas, procesado de imagen, clasificación, imagen bi-espectral

INTRODUCCIÓN

Las experiencias con fuegos forestales, llevadas a cabo en condiciones y a una escala lo más cercana posible a un incendio forestal real, son una práctica común utilizada por los investigadores forestales para estudiar los factores que influyen en el comportamiento del incendio (TRABAUD, 1979, CHENEY, 1995; VEGA et al., 1998.; CRUZ Y VIEGAS 1998; FERNANDES et al. 2000.). Estas experiencias sirven también para la validación de modelos existentes y en desarrollo. Un ejemplo es el modelo físico de Larini y Morvan (LARINI et al. 1998); y sus simulaciones numéricas (MORVAN et al. 2000), llevadas a cabo dentro del proyecto FIRE-STAR. Para este objetivo es crucial la medida de los parámetros físicos característicos del incendio (velocidad de propagación, temperaturas, intensidad lineal del frente, altura de llama, etc.).

Aunque es conceptualmente sencilla, esta medida presenta importantes dificultades sobre el terreno. Los sistemas de imagen IR son una alternativa interesante, pero práctica se encuentran con dificultades que derivan de la complejidad espectral tanto de la emisión un incendio como de la absorción atmosférica. En este trabajo se propone un método que permite superar estas dificultades gracias a la introducción de cierto grado de resolución espectral. Esta se consigue mediante una cámara que trabaja en la banda de IR medio (MIR, de 3 a 5 μm) y está dotada de una rueda con cuatro filtros interferenciales, centrados a distintas longitudes de onda, y que gira a gran velocidad.

El método ha sido puesto a prueba en una quema experimental realizada en el marco del proyecto FIRE-STAR (EVG1-CT-2001-00041), que ha permitido comparar la caracterización del fuego obtenida mediante técnicas “clásicas” con la que proporcionan las medidas IR.

La experiencia se ha llevado a cabo en el monte Cabalar, en el municipio de A Estrada (Pontevedra). (42° 38' 30" N; 8° 29' 40" W). Se ha elegido una parcela con pendiente suficiente para asegurar las cotas inferior y superior de la parcela, coincidieran cerca de la parte inferior y superior del encuadre de las cámaras respectivamente. La vegetación elegida está formada por una cubierta uniforme y continua (cobertura de vegetación 100%) de matorral de tojo (*Ulex europaeus* y *Ulex gallii*); como principales especies acompañantes se encuentran: *Erica umbellata*, *Erica cinerea*, *Daboecia cantabrica*, *Agrostis curtisii*, y *Pteridium aquilinum*. Esta vegetación es representativa de un matorral muy frecuente en gran parte del terreno forestal de esta provincia y es

el tipo de vegetación con más superficie afectada por los incendios forestales. (Xunta de Galicia 2001).

LAS MAGNITUDES FÍSICAS DE UN INCENDIO FORESTAL Y SU MEDIDA

Las principales magnitudes físicas de un incendio son: la *posición y velocidad de propagación del frente* del incendio; la *longitud y ángulo de llama*; las *temperaturas* en diferentes posiciones y la *intensidad lineal del frente*, es decir, la potencia calorífica liberada por el frente por unidad de longitud (unidades: kW·m⁻¹).

Para una propagación estacionaria (v constante), la intensidad lineal es (BYRAM, 1959):

$$I = \Delta w \cdot h \cdot v$$

Donde Δw es la carga de combustible consumida por el fuego (kg · m⁻²), h es el calor de combustión del combustible (kJ kg⁻¹) y v es la velocidad de avance del frente (m s⁻¹). Es claro que $\Delta w \cdot h$ es el *calor liberado por unidad de área quemada* (q , medido en kJ m⁻²), de modo que $I = q \cdot v$

Los métodos estándar para medir estos parámetros son como sigue:

- La velocidad de propagación y la altura de llama se miden por inspección visual.
- Las temperaturas son medidas con termopares
- La intensidad lineal del frente se calcula con las ecuaciones anteriores, lo que requiere conocer h (conocido para la mayor parte de las especies vegetales) y Δw (estimado a partir de dos inventarios, uno previo y otro posterior a la quema).

Estos métodos son sencillos conceptualmente, pero en la práctica tienen algunos inconvenientes. La determinación visual de la posición del frente no es muy precisa, y a menudo es muy difícil por el efecto del humo. Los termopares son baratos y fáciles de usar, pero no son muy adecuados para medidas de campo. En primer lugar, proporcionan sólo medidas puntuales; para medir temperaturas para todo el fuego hay que desplegar por anticipado una red de estaciones de medida en el área que se va a quemar, lo que resulta muy trabajoso. Además, son sensores intrusivos, que produce una alteración en el fuego y tiene un tiempo de respuesta lento. Estos efectos pueden minimizarse, pero al precio de usar termopares muy finos y por tanto muy frágiles. Por otra parte, las medidas de parámetros energéticos (intensidad lineal del frente y calor desprendido por unidad de área) requieren inventarios de combustible que son tediosos y tienen un coste considerable.

Los métodos IR pueden ser una alternativa interesante, pues proporcionan, con una excelente resolución espacial y temporal:

- *visualización* del frente de llama a través del humo.
- una medida directa de la *radiancia* (W/m²sr) emitida por cada punto del campo de visión de la cámara en la banda espectral de trabajo de la cámara (si se usa una cámara calibrada).
- *temperatura de brillo* (temperatura que tendría el objeto en caso de emitir como un cuerpo negro)

Además, la radiancia integrada sobre el área y el ángulo sólido proporciona la potencia emitida, que está relacionada con la intensidad del frente de fuego

SISTEMA DE IMAGEN INFRARROJA

Aunque el esquema planteado para las medidas IR en el apartado anterior es sencillo, aparecen dificultades debido a que la emisión IR de un incendio, lejos de ser similar a la de un cuerpo negro, tiene una acentuada estructura espectral (Figura 1). La emisión tiene dos componentes: un fuerte pico en la región entre 4 y 5 micras, debido a la emisión del CO₂ de la llama, y una componente continua, debida a los rescoldos calientes. Esta estructura pasa inadvertida para una cámara IR, que no tiene resolución espectral. El calibrado ordinario de las cámaras IR se hace para cuerpos negros o grises, y da por tanto resultados erróneos ante un objeto con una emisión compleja como la de un incendio.

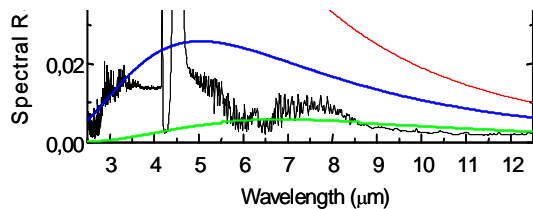


Figura 1.- Radiancias espectrales para tres cuerpos negros (BB) a diferentes temperaturas comparadas con la radiancia experimental medida para un incendio.

Por otra parte, los instrumentos con resolución espectral, como el espectrorradiómetro con el que se obtuvo la medida de la Figura 1, no tienen resolución espacial y por tanto no sirven para el estudio de un fenómeno dinámico y heterogéneo como el fuego. Aunque existen instrumentos (llamados espectrómetros de imagen) que combinan la resolución espacial y la espectral, su precio y complejidad son prohibitivos.

Esta situación nos ha llevado a explorar las posibilidades de instrumentos más asequibles, que combinen la resolución espacial con cierto grado de resolución espectral. En trabajos anteriores (ARANDA et al, 2003) se ha utilizado un “sistema de imagen bi-espectral” formado por dos cámaras sincronizadas, una en la banda MIR (de 3 a 5 μm) y otra en la banda TIR (de 8 a 12 μm).

En este trabajo se ha usado también “sistema de imagen multispectral” que consiste en una sola cámara (Thermosensorik 384M) que opera en la banda MIR y a la que una rueda de filtros interferenciales que gira a gran velocidad confiere resolución espectral.

La rueda tiene cuatro filtros: uno de ellos (F1) corresponde a la banda espectral completa de la cámara (de 1,5 a 5 μm); los otros están centrados, respectivamente, en: F2 = 4,8 μm , F3 = 4,2 μm , y F4 = 3,6 μm . El atractivo de este sistema radica en que usar una sola cámara es más barato, técnicamente más sencillo, y simplifica el calibrado y el procesado de las imágenes, además de tratarse de un sistema más robusto y más adecuado por eso para las medidas de campo.

METODOLOGÍA DEL FUEGO EXPERIMENTAL

La simulación de un incendio se ha llevado a cabo en una parcela rectangular de 60 x 80 m, con una orientación de 67° N y una pendiente del 20 %, con los lados más cortos (60 m) paralelos a las líneas de nivel. Sobre el lado situado a cota inferior, se realizó la ignición mediante antorchas de goteo, de manera que se produjo un fuego a favor de la pendiente y del viento a lo largo del eje mayor de la parcela.

La carga de combustible presente dentro de la parcela ha sido cuantificada por medio de un doble muestreo, realizándose inventarios de combustible en el exterior de la parcela (para no alterar la vegetación del interior), consistentes en la recolección del material vegetal en varios cuadrados de 16 m², en lugares representativos de la carga existente en la zona del ensayo. En el laboratorio se procedió a la separación del combustible en dos grupos de tamaño: GI (fracción con tamaño comprendido entre 0 y 0,6 cm de diámetro) y GII (material con diámetro comprendido entre 0,6 y 2,5 cm). A su vez cada grupo de tamaño se separó según su condición de vegetación muerta, o seca y viva, o verde. Posteriormente fue secado en estufa a 100 °C durante 24 horas para hallar el peso seco. Con los datos obtenidos se construyeron ecuaciones predictoras de relaciones alométricas para utilizar en el doble muestreo.

El mismo procedimiento de inventario de combustible fue utilizado para conocer la carga de combustible remanente después del fuego, pero en este caso se realizó en el interior de la parcela quemada haciendo innecesaria la utilización del doble muestreo.

La humedad de los distintos grupos de combustibles y del suelo ha sido hallada por medio de la recolección de muestras en los diferentes tramos en los que se dividió la parcela, su envasado en recipientes herméticos y su posterior secado en estufa del laboratorio a 100 °C hasta peso constante.

La altura y cobertura de la vegetación y el porcentaje ocupado por las diferentes especies presentes fueron medidos mediante dos transectos lineales paralelos al eje mayor de la parcela. (Canfield, 1941, modificado). El matorral tenía una altura media de 121 cm y una cobertura del 100%. La hojarasca, presente de forma bastante continua, tenía una altura media de 5 cm. La carga media de combustible total (matorral y hojarasca) antes de quemar era de 5377 g/m² y después de quemar el combustible total remanente fue de 1706 g/m². La humedad del combustible medida momentos antes de la quema fue la siguiente: hojarasca 42%, matorral GI verde 161 % y matorral GI seco 11%.

Las principales variables meteorológicas fueron medidas y registradas por medio de una unidad móvil de meteorología automática registrándose los siguientes valores medios: velocidad del viento a 6m de altura: 3 m/s; temperatura ambiente: 30,2 °C; humedad relativa del aire: 34%.



Figura 2.- (Izquierda) Las cámaras montadas sobre un trípode en los ensayos de campo. (Derecha) Un momento de la quema observado a 220 m de distancia, en la banda visible

La velocidad de propagación del fuego, longitud de la llama y ángulo que forma con la horizontal se midieron tomando como referencia jalones de longitud conocida, clavados verticalmente en el suelo, a distancias determinadas a lo largo del recorrido del frente de fuego. La progresión del fuego fue grabada en vídeo para el posterior análisis de las imágenes. En el cálculo de las intensidades lineales del frente de fuego (BYRAM, 1959), se utilizaron los siguientes valores del poder calorífico inferior: Ulex, 19010, J/g; Ericáceas, 20966 J/g.

Las temperaturas alcanzadas durante el paso del fuego fueron medidas mediante 24 termopares de 0,1 mm de diámetro, tipo K con funda de inconel de un diámetro externo de 1 mm, colocados en 12 puntos de medición a 2 niveles, uno en la parte inferior de la hojarasca y el otro a media altura de la copa del matorral. Las temperaturas fueron registradas con una frecuencia de un dato por segundo para cada termopar y almacenadas en la memoria de un datalogger automático.

Se obtuvieron imágenes IR a lo largo de toda la quema, tanto con el sistema bi-espectral como con el multi-espectral (Figura 2, izquierda), desde un punto de observación a 220 m del centro de la parcela. Una cámara ordinaria de vídeo fue colocada junto a las cámaras IR, para proporcionar un registro visible de las quemaduras, aunque las imágenes de esta banda no están calibradas ni están sincronizadas con las imágenes IR.

La Figura 2 muestra a la derecha una imagen visible de la quema. El incendio avanzaba alejándose del punto de observación (de abajo a arriba de la imagen), pero el humo impide ver ningún detalle. Esta densidad de humo se mantuvo durante la mayor parte de la quema.

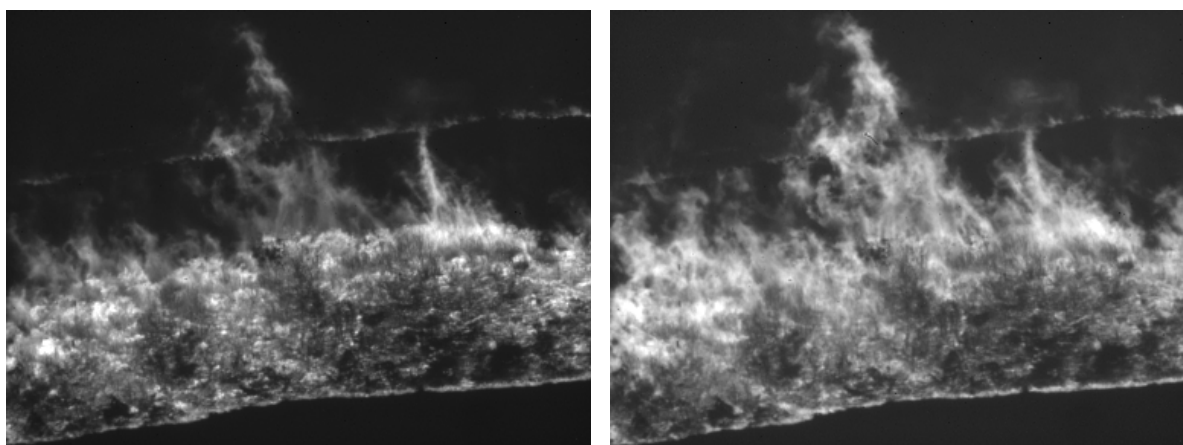


Figura 3.- Aspecto de la quema en dos bandas IR: a la izquierda, F4 (3,6 μm), y a la derecha F2 (4,8 μm). Ambas imágenes son simultáneas con la Figura 2 (derecha)

La Figura 3 muestra el aspecto de la quema en dos bandas IR: a la izquierda, F4 (3,6 μm), y a la derecha F2 (4,8 μm). La imagen es simultánea con la figura 2 (derecha). Se observa que el humo es inapreciable en ambas bandas IR. Sin embargo, las llamas aparecen mucho más intensas en la banda F2 que en la F4, debido a que aquella recoge la emisión del CO_2 . La observación del incendio en la banda F4 permite pues seguir con gran precisión el avance del frente. Además, a partir de cualquiera de estas imágenes, mediante su correspondiente calibración, se pueden obtener imágenes de temperatura de brillo.

La visualización de las llamas a través del humo es también útil para medir su altura, lo que a menudo es imposible en las imágenes en la banda visible. Esto puede hacerse sobre la imagen en la banda F2, pero puede ser difícil distinguir la llama del rescoldo. Puede obtenerse una separación mejor entre rescoldo y llama combinando la información de varias bandas. Esto puede hacerse mediante un “índice de fuego” (BRIZ et al, 2003) o con una técnica, estándar en teledetección, llamada análisis de componentes principales. En esta técnica, se forman, a partir de las imágenes originales, otras que son combinación lineal de ellas y que redistribuyen de forma óptima la varianza (Richards & Xia, 1999). En el instante que estamos estudiando, se encuentra que las dos primeras componentes principales son:

$$\text{PC1} = 0.54 \cdot \text{F2} + 0.35 \cdot \text{F3} + 0.76 \cdot \text{F4}$$

$$\text{PC2} = 0.83 \cdot \text{F2} - 0.07 \cdot \text{F3} - 0.56 \cdot \text{F4}$$

La primera es una media ponderada de las tres bandas, mientras que la segunda refleja fundamentalmente el contraste entre F2 y F4. Las correspondientes imágenes se muestran en la Figura 4 (se ha aplicado una paleta de colores para visualizar mejor los contrastes).

Se aprecia que PC2 resalta de manera muy eficaz las llamas, lo que permite medir su altura con facilidad y delinear con precisión el frente. Naturalmente, esta altura IR es mayor que la altura visible, por lo que sería necesario realizar experiencias para encontrar un factor de conversión entre un parámetro y otro (en el caso de la figura, la altura IR era de 17 m y la altura visible de aproximadamente 5 m).

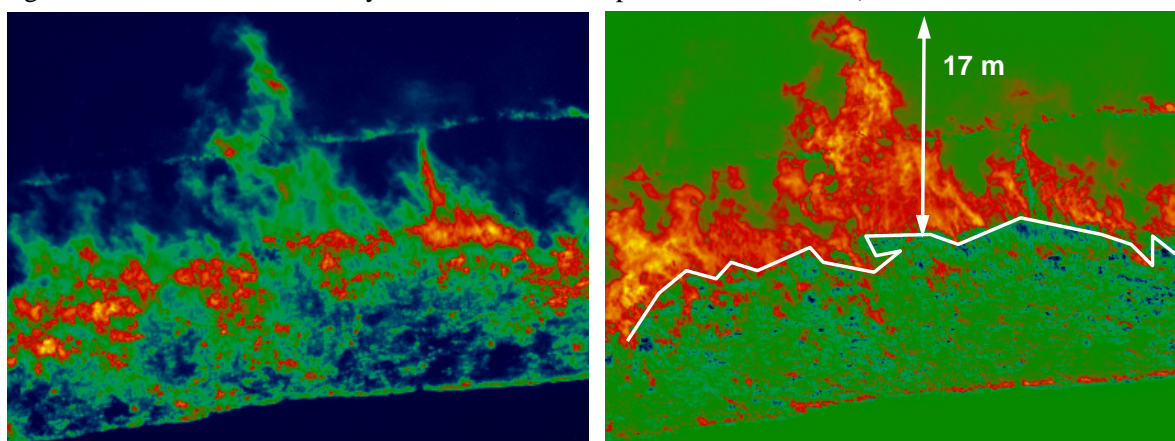


Figura 4.- (izquierda) Imagen de PC1 (derecha) Imagen de PC2, en la que se ha marcado la posición del frente de llama y su altura.

CLASIFICACIÓN DE REGIONES DEL FUEGO

Si se quiere delimitar con más precisión las distintas regiones del incendio o estimar otros parámetros físicos, es necesario un proceso previo de “clasificación”. Clasificar una escena es asignar cada pixel de la imagen una “clase” específica, esto es, a una región con propiedades físicas más o menos homogéneas. Se trata de un

problema estándar en teledetección desde satélite, y se han desarrollado muchas potentes técnicas matemáticas para clasificar escenas a partir de imágenes multispectrales.

En el estudio de los incendios, la clasificación proporciona un método objetivo de identificar las distintas regiones que pueden distinguirse en un incendio (llama, rescoldo con llama, rescoldo sin llama, cenizas, fondo...) Esto tiene una aplicación directa para, por ejemplo, identificar el frente del incendio o para localizar puntos de reignición en un área de rescoldos. Pero además, la clasificación es un punto de partida necesario para poder medir con técnicas IR muchos parámetros de interés, debido a que permite dar cuenta de la heterogeneidad de las diferentes regiones.

Dada una imagen bi-espectral, con bandas B1 y B2, para clasificar la escena el primer paso es construir un "dispersograma B1-B2". Se trata de una gráfica en la que cada punto corresponde a un pixel de la imagen bi-espectral, siendo su abscisa el valor de ese punto (en temperatura de brillo u otra magnitud) en la banda B2 y su ordenada el valor en la banda B1. Para una escena compleja, cada región con propiedades radiativas más o menos homogéneas generará un cúmulo más o menos compacto de puntos en el dispersograma. Cada uno de éstos se corresponde con una clase.

En nuestro caso, se ha usado este método con diversos dispersogramas: MIR-TIR (banda obtenidas del sistema bi-espectral), F2-F4, F3-F4 y PC2-PC1. Se ha encontrado que el último caso es el que proporciona los mejores resultados.

Un ejemplo del dispersograma PC2-PC1 para un instante de la quema se muestra en la Figura 5 (izquierda). Hay un pequeño cúmulo muy denso de puntos (en rojo) y dos ramas bastante pobladas y claramente diferenciadas (en verde). Cada una de estas regiones debe corresponder en principio a una clase.

En la Figura 6 se muestra el resultado de esta clasificación para tres instantes sucesivos de la quema (la imagen de abajo a la izquierda es la que corresponde a la Figura 5, las demás tienen dispersogramas similares). Se aprecian en amarillo las llamas y en azul los rescoldos calientes (hay que advertir que la ignición comenzó por arriba, en contra de la pendiente, pero este fuego no progresaba y después se prendió la parcela por su lado inferior; esta línea de ignición fue la que se propagó por toda la parcela).

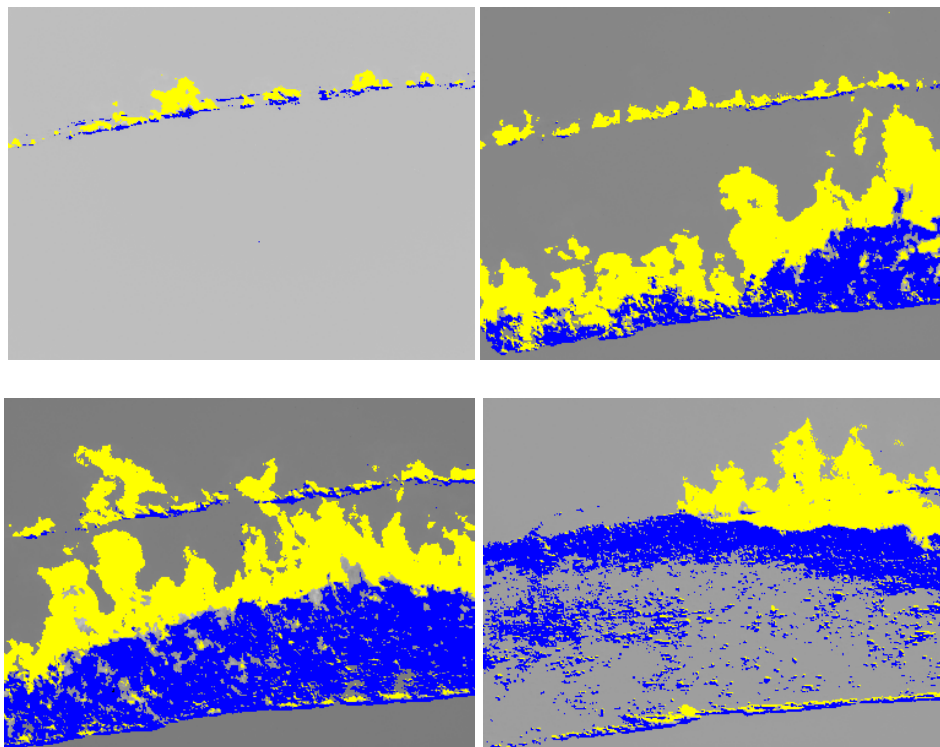


Figura 6.- De izquierda a derecha y de arriba abajo, imágenes clasificadas de cuatro instantes de la quema (el rescoldo caliente aparece en azul, las llamas en amarillo, rescoldo frío y fondo en gris)

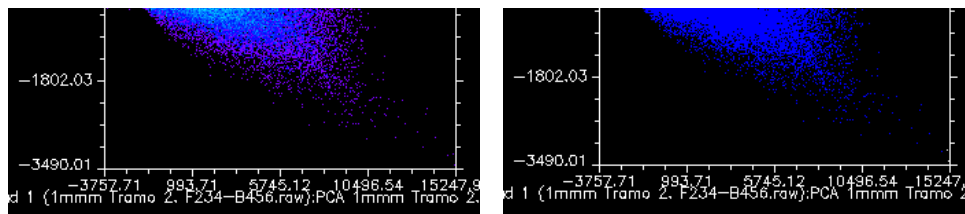


Figura 5.- (Izquierda) Dispersograma PC2-PC1 para un instante de la quema. Los colores, de azul a rojo, indican densidad creciente de puntos. (Derecha) Asignamos colores distintos a las dos ramas del dispersograma.

Una vez clasificada la escena, es posible corregir los efectos atmosféricos para cada clase (ya que la absorción para la radiación de las llamas es mayor que para la de los rescoldos) y estimar la potencia emitida, según el procedimiento explicado en (Aranda et al, 2003).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un método para medir los principales parámetros físicos de un incendio forestal mediante el uso de una cámara IR dotada de resolución espectral en tres diferentes sub-bandas. Esto permite seguir en tiempo real la evolución del frente de llama a través del humo denso, estimar la altura de llama infrarroja y, mediante técnicas de clasificación, distinguir las diferentes regiones del incendio (llamas, rescoldos calientes o fríos, fondo). Esto último permite dar cuenta de los efectos de la estructura espectral de su emisión y pone por tanto la base para la ulterior obtención de los parámetros físicos de tipo energético, en particular, intensidad lineal y calor desprendido por unidad de área.

AGRADECIMIENTOS

Las actividades experimentales descritas en este trabajo han sido financiadas por el proyecto Europeo de Investigación FIRE-STAR: EVG1-CT-2001-00041. <http://www.eufirestar.org/>

BIBLIOGRAFÍA

- ARANDA J.M., J. MELENDEZ, A.J. DE CASTRO & F. LOPEZ. 2003. Bi-spectral Infrared Forest Fire Detection and Analysis Using Classification Techniques. *Proceedings of the international symposium on optical science and technology (SPIE's 48th annual meeting)*, San Diego, USA, 2003. SPIE.
- BRIZ, S., DE CASTRO, A.J., ARANDA, J.M., MELENDEZ, J. Y LOPEZ, F. "Reduction of false alarm rate in automatic forest fire infrared surveillance systems" *Remote Sens Environ* 86, 19-29, 2003.
- BYRAM G.M. 1959, in Brown A.A. and Davis K.P., 1973, *Forest fire: control and use*. McGraw-Hill Book, New York, (ed.). pp. 155-182.
- CANFIELD, R.H. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry* 39: 388-394.
- CHENEY, N. P. AND GOULD, J. S. Fire growth in grassland fuels. *Int. J. of Wildland Fire*, 5 (4): 237-247, 1995.
- CRUZ, M.G. Y VIEGAS, D.X. 1998. FIRE behaviour in some common central Portugal fuel complexes: evaluation of FIRE behaviour models performance. *In Proc. 3rd Int. Conf. Forest Fire Research, 14th Conf. Fire and Forest Meteorology*, Viegas, D.X. (Ed.), ADAI. pp. 859-875.
- FERNANDES, P.M.; W.R. CATCHPOLE Y F.C. REGO. 2000. Shrubland fire behaviour modelling with microplot data. *Can. J. For. Res.* 30: 889-899.
- LARINI, M., F. GIROUD, B. PORTERIE, Y J.C. LORAUD. 1998. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41(6-7):881-897.
- MORVAN, D, J.L. DUPUY, Y M. LARINI 2000. Multiphase formulation applied to the modeling of fire spread through a forest fuel bed. *Proc. 28th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, Vol. 28: 2803-2809p.
- RICHARDS, J.A.; JIA, XIUPING. "Remote Sensing Digital Image Analysis". 3rd ed. *Springer-Verlag, Berlin, Germany*, 1999.
- TRABAUD, L. 1979. Etude du comportement du feu dans la garrigue de chêne kermes à partir des températures et des vitesses de propagation. *Annales Sciences Forestiers* 36: 13-35.
- VEGA, J.A., P. CUIÑAS, M.T. FONTURBEL, P. PEREZ-GOROSTIAGA, Y C. FERNANDEZ. 1998. Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes. *In Proc. 3rd Int. Conf. Forest Fire Research, 14th Conf. Fire and Forest Meteorology*, Viegas, D.X. (Ed.), ADAI. pp. 713-728.
- XUNTA DE GALICIA. 2001. O Monte Galego en Cifras. Consellería de Medio Ambiente, Dirección Xeral de Montes e Industrias Forestais.