

Caracterización de emisiones térmicas en áreas suburbanas mediante imágenes Thematic Mapper

V. Ferrer-Vidal y U. Solé-Sugrañes
Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", C.S.I.C.
c/ Lluís Solé Sabarís, s/n. 08028 BARCELONA

RESUMEN

Se ha analizado la información térmica que proporciona la banda 6 del sensor Thematic Mapper del satélite LANDSAT-5, para localizar posibles "vertidos" térmicos en entornos industriales. La dinámica de las principales zonas de estudio, está fuertemente condicionada por una importante actividad urbana e industrial. Las imágenes ponen de manifiesto la presencia de focos de elevada temperatura, pudiendo ser alguno de ellos susceptible de producir afecciones al medio natural. El análisis de este tipo de imágenes, muestra su utilidad para la detección, control y seguimiento de determinados focos problemáticos y estudiar su posible influencia en el entorno.

PALABRAS CLAVE: Vertidos térmicos, detección, control, seguimiento.

ABSTRACT

Thermal data of the Landsat TM-6 channel have been analyzed to locate potential "thermal" dumping in industrial areas. The dynamic of the main studied areas is strongly conditioned by a significant urban and industrial activity. Some spots of high temperature, susceptible to produce environmental damage, can be detected on the satellite images. Thus analyses of thermal satellite images are useful to detect, control and monitor some problematic focus and to study its possible influence on the surrounding areas.

KEY WORD: Thermal dumping, detect, control, monitoring.

INTRODUCCION

Las técnicas de Teledetección, constituyen una herramienta muy útil para controlar los cambios en las áreas suburbanas así como los límites urbano-rural. Además, permiten el control de algunos de los efectos de las actividades urbana e industrial, en lo referente, por ejemplo, a contaminación de suelos y en general, a posibles afecciones a los procesos medioambientales. El uso de imágenes de satélite, puede ayudar a localizar e identificar focos en áreas industriales que puedan alterar los vectores medioambientales.

Concretamente en este estudio, se ha tratado de identificar una serie de focos con respuesta térmica elevada, que en algunos casos podrían ser susceptibles de producir afecciones al medio natural. La zonas de estudio seleccionadas, se enmarcan en las comarcas del Alt Llobregat, Baix Llobregat y Valles Occidental, en la provincia de Barcelona. Desde un punto de vista urbano e industrial, las dos últimas son regiones muy dinámicas, que comprenden varios usos del suelo, urbano (residencial/comercial/industrial) y agrícola. Para este estudio, se ha utilizado la información de una imagen Thematic Mapper LANDSAT 5, de fecha de 22 de Mayo de 1991.

En el sensor Thematic Mapper la información térmica la proporciona principalmente el canal TM-6, centrado en la banda de 10.4 m a 12.5 m. en la que la radiancia emitida por la superficie terrestre alcanza sus máximos valores. La irradiancia recibida por el sensor puede ser transformada al equivalente de temperatura, de modo que pueda obtenerse la temperatura aparente de radiación o brillo de la superficie, que difiere de la temperatura real debido al efecto de la emisión-absorción atmosférica y de la emisividad superficial (Schott, 1989). En este estudio, estos valores no han sido corregidos atmosféricamente, debido a un conocimiento insuficiente del estado de la atmósfera en el momento de toma de la imagen. Sin embargo, puede considerarse que las imágenes corresponden a un día claro, según los valores extraídos del histograma de cada una de las bandas visibles e infrarrojas próximas (Chavez, 1988).

El análisis visual de las imágenes permite apreciar una serie de focos que muestran aparentemente una respuesta elevada, algunos casos incluso en el infrarrojo medio, claramente apreciable en el infrarrojo térmico (fig. 1). Sobre estos focos se ha centrado el estudio, en cuanto a su caracterización y a su posible afección al entorno directo.

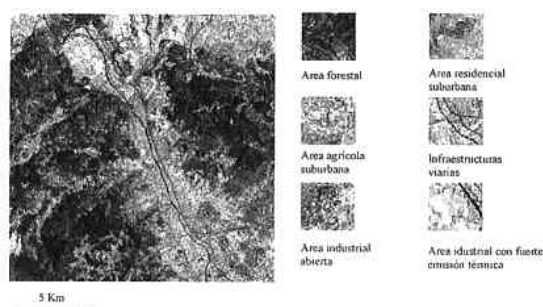


Fig.1. Composición falso color de una imagen Thematic Mapper del 22/5/91 de la zona del Baix Llobregat entre Martorell y Molins de Rei. En azul la banda TM3, en verde la TM 4 y en rojo la TM 6.

PROBLEMATICA DE LA CONTAMINACION TERMICA

El análisis de la temperatura aparente de esos focos de posible respuesta térmica elevada, en relación a otros (datos, como usos del suelo, puede orientar sobre el efecto que puedan tener sobre el entorno. A partir de un cierto umbral, el incremento de los niveles óptimos de temperatura en el entorno directo de la vegetación, suelos o en el medio acuático, puede generar problemas locales de diferente envergadura (Van der Ploeg, 1982). Se conocen « algunos sectores productivos que pueden desarrollar procesos de contaminación térmica en el medio natural. Los focos de calor de mayor envergadura que pueden dar origen a esta contaminación, se identifican claramente en las imágenes TM.

Un ejemplo claro y conocido de contaminación térmica, lo constituyen las centrales térmicas (Bond, 1974). En casos como el de estas centrales, se sabe, que el uso masivo de energía contenida en los combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica, requiere que una parte de la energía liberada por el combustible pase de alguna manera al medio ambiente, bien directamente a la atmósfera, o bien directamente a las masas de agua, produciendo un calentamiento de las mismas, y originando un factor sensible para la vida acuática. Principalmente, el aumento de temperatura en las masas de agua debido a contaminación térmica, puede afectar a los microorganismos, modificando las propiedades biológicas de los mismos, que pueden llevar a la variación del ritmo de crecimiento y en algunos casos a su muerte.

Incrementos del nivel óptimo de temperatura en el agua, llevan consigo variaciones en sus propiedades físicas y químicas. La variación de la temperatura del agua afecta a, su densidad, viscosidad, tensión superficial y de vapor, a la solubilidad y difusión de gases. Un aspecto muy importante, lo constituye el hecho de que al aumentar la temperatura del agua, disminuye la capacidad de la misma: para disolver el O_2 que necesitan las bacterias para asimilar los residuos orgánicos y depurar las corrientes,

considerando también, que con estos incrementos, las bacterias necesitan una mayor cantidad de O_2 (Estevan, 1984).

Otro de los focos de interés, se identifica con explotaciones tipo canteras e industrias asociadas (cementeras), así como la deposición y/o almacenamiento del combustible: utilizado en el proceso productivo. Aparte del claro efecto térmico que suponen estas plantas de producción, claramente identificables en las imágenes de satélite, el efecto principal se asocia a la emisión de gases (SO_2 y NO_x) y partículas sólidas en suspensión. El efecto directo de este tipo de actividad sobre la vegetación del entorno inmediato, supone la posible oclusión de los estomas de las plantas, que entre otros efectos puede llevar consigo una disminución de la actividad fotosintética de las mismas. La pérdida de vapor de agua en la planta, tiene lugar a través de los estomas, que se abren y cierran en respuesta a estímulos internos y externos como son entre otros, el nivel de iluminación, la temperatura, la presencia de agentes patológicos, la distribución de la humedad del suelo o déficit de agua del mismo. Con incrementos de temperatura, se produce una disminución de la transpiración del vegetal, que puede generar fenómenos de stress con importantes implicaciones en la fisiología del mismo (Byrne, 1979).

Adicionalmente, es básico considerar el impacto que estos focos de temperatura elevada pueden tener sobre el suelo. Uno de los efectos, es que los suelos que soportan ciertas deposiciones de materiales susceptibles de generar recalentamientos locales, sufren una pérdida prácticamente total de la cobertera vegetal. Además, estas deposiciones constituyen una aportación directa de contaminantes al suelo, pudiendo modificar sus características físico-químicas y biológicas, y en último término, la capacidad de uso del mismo. La textura y la porosidad del suelo, son muy importantes para tener unas condiciones de aireación y contenido de aguas correctas, y consecuentemente una disponibilidad de nutrientes para las plantas y organismos. La falta de O_2 y la acumulación de sustancias tóxicas, pueden llegar a ser factores límite, que superen los límites de tolerancia de ciertos organismos (Paul y Huang, 1980).

MAPAS TERMICOS

Las imágenes térmicas, permiten la discriminación de clases más o menos homogéneas o de distintas cubiertas. Mediante una multisegmentación ("density slicing") de la imagen térmica, se puede configurar un "mapa térmico", que muestra una serie de niveles de temperatura de irradiación aparente. Este tipo de "mapas térmicos" permiten una buena correlación con las áreas naturales (fig. 2). Así, se pone perfectamente de manifiesto la discriminación de los focos de emisión térmicos de distinta envergadura, las zonas de actuación indus-

trial, zonas urbanas, zonas de cultivo y con presencia de vegetación y áreas forestales.

Parámetros responsables de la variabilidad de la temperatura de superficie, son la disponibilidad de humedad y la capacidad calorífica diurna, a su vez factores altamente relacionados con la naturaleza de los materiales superficiales (Wheeler, 1986). Concretamente, las superficies con asentamientos urbanos e industriales, se caracterizan por tener, generalmente, temperaturas más elevadas que las cubiertas vegetales. La radiación solar absorbida por los materiales de construcción de cubiertas, fachadas y calles en su práctica totalidad es transformada en calor, mientras que la radiación solar absorbida por las superficies vegetales, en su mayor parte es utilizada en los procesos fotosintéticos. En las plantas verdes, los posibles incrementos de temperatura producidos por la disipación de la energía absorbida y no utilizada fotoquímicamente son compensados por la evapotranspiración.

Los aumentos de temperatura en las áreas urbanas, se les denomina "islas de calor", y son detectables, no sólo en grandes ciudades, sino también en pequeños asentamientos (Carnahan y Larson, 1990; Triebnig-Löffler, 1993). La diferenciación

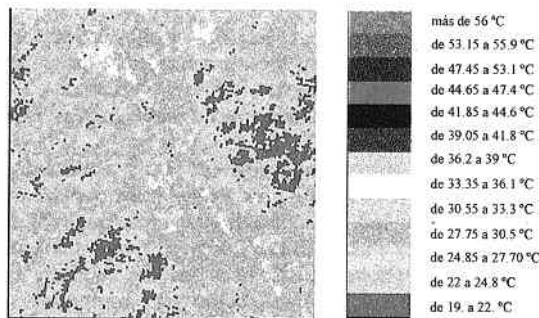


Fig.2. Mapa térmico de la zona del Baix Llobregat obtenido a partir de la imagen Thematic Mapper de 22-5-91. Misma escala y zona que la fig. 1. La escala representa temperaturas de emisión aparentes a nivel del satélite, en °C.

térmica interna de estos núcleos, está relacionada con la fisonomía del asentamiento, la actividad desarrollada en cada área (residencial / comercial / industrial) y la densidad de edificación.

CARACTERIZACION DE LOS FOCOS TERMICOS

Sobre distintas áreas de interés, se han extraído una serie de valores, que han sido transformados a temperatura de irradiación aparente de la superficie, de acuerdo con las ecuaciones de Markham y Barker (1986):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

donde,

T = Temperatura efectiva medida en el satélite, o temperatura de brillo aparente en K

K_2 = Constante de calibración 1260.56 K

K_1 = Constante calibración 60.776 mW·cm⁻² ster⁻¹·μm⁻¹

L_λ = Radiancia espectral en mW·cm⁻² ·ster⁻¹·μm⁻¹

La radiancia espectral puede calcularse a partir de:

$$L_\lambda = LMIN_\lambda + \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{QCALMAX}\right) QCAL$$

donde,

QCAL = radiancia en DN (valores digitales leído por el sensor)

LMIN_λ = radiancia espectral a QCAL = 0

LMAX_λ = radiancia espectral a QCAL = QCALMAX

QCALMAX = rango de radiancia en DN

L_λ = radiancia espectral

La Tabla 1, muestra los valores de temperatura aparente obtenidos para cada uno de los puntos de interés. Estos puntos, se han extraído sobre superficies prácticamente homogéneas dentro de diferentes usos de suelo. Algunos de estos usos se han definido en la Tabla de forma genérica, siendo la relación entre estos y una actividad industrial u otro uso, la siguiente:

- **Recinto Industrial 1:** corresponde a la deposición y almacenamiento de desechos metálicos aparentemente caótica, en un recinto industrial cerrado, asociado a una actividad industrial de transformación y fabricación de productos metálicos.
- **Recinto Industrial 2:** deposición de desechos metálicos similar a la anterior, en recinto industrial cerrado.
- **Recinto Industrial 3:** acumulación de depósitos metálicos en recinto industrial cerrado.
- **Recinto Industrial 4:** cubierta de edificación industrial asociado a una industria de fundición de metales.
- **Recinto Industrial 5:** instalación industrial asociada a una industria cementera.
- **Recinto Industrial 6:** instalación industrial asociada a una industria cementera.
- **Parque Carbón 1:** parque de carbón asociado a una industria cementera, en recinto industrial cerrado 5.
- **Parque Carbón 2:** parque de carbón asociado a una industria cementera en recinto industrial cerrado 6.
- **Escombreras:** asociadas a actividad extractiva (lignito).
- **Vertedero:** recinto de vertedero controlado.

USOS DE SUELO	Tmedia (C)	Desviación S
Suelo desnudo	29.35	0.80
Forestal	23.33	0.66
Cultivos (vegetación herbácea)	24.93	0.25
Zona urbana	31.51	1.52
Zona industrial	36.32	2.52
Recinto Industrial 1	36.90	1.67
Recinto Industrial 2	36.24	2.26
Recinto Industrial 3	35.11	0.22
Recinto Industrial 4	35.51	0.24
Parque Carbón 1	38.29	0.11
Parque Carbón 2	35.91	0.11
Recinto Industrial 5	44.85	0.23
Recinto Industrial 6	55.09	0.25
Parque Central Térmica	35.20	1.81
Escombreras	30.18	0.93
Vertedero	31.94	2.20
Vegetación Parque Natural	20.66	0.63
Lagunas Parque Natural	22.55	1.31
Aguas costeras	15.02	0.22

Tabla I. Valores de Temperatura aparente para diferentes focos de Interés, para varios usos del suelo.

RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE EMISIVIDAD Y EL INDICE DE VEGETACION

Como se ha citado anteriormente, la diferencia entre los valores de temperatura real y aparente, está condicionada básicamente por la atenuación atmosférica y el coeficiente de emisividad de la cubierta. Sin embargo, por las condiciones atmosféricas "claras" del día de toma de la imagen, se podría hacer una estimación de la posible diferencia entre ambas temperaturas, conociendo, por ejemplo, los valores de la temperatura superficial en aguas costeras para una zona determinada a la hora de toma de la imagen, y comparando los mismos con los valores proporcionados por el satélite en la misma zona. Estas correcciones, en condiciones de atmósfera clara y en primavera, suelen ser inferiores a unos 2K.

El coeficiente de emisividad en una superficie puede variar debido a diferencias en la estructura del suelo, la composición, materia orgánica, contenido en humedad, así como diferencias en las características de la cobertera vegetal. A la escala de un pixel (120x120 m en el caso de TM-6), las superficies naturales son generalmente inhomogéneas, tanto en términos de distribución espacial de la temperatura superficial dentro de los límites del pixel, como en términos de la variabilidad de la emisividad dentro del pixel. La emisividad de las superficies naturales puede ser medida, en puntos concretos, por diversos métodos, tales como la caja de emisividad y los sensores de infrarrojos. Sin embargo, la variabilidad dentro del pixel hace prácticamente imposible o muy difícil, estimar la emisividad efectiva del mismo (Van de Griend, 1993).

En los materiales de construcción el coeficiente de emisividad térmica es una característica del

propio material y en general presenta valores relativamente bajos, Sin embargo, en los suelos este coeficiente depende del contenido en agua y del nivel y estado de la cobertera vegetal. Las coberturas vegetales se caracterizan por valores del coeficiente de emisividad relativamente muy altos, que pueden deberse al contenido en agua de las hojas verdes. En los suelos naturales el coeficiente de emisividad aumenta con el incremento de la humedad del suelo y con el incremento de densidad de la cobertera vegetal.

Van de Griend y Owe (1993), encontraron que la emisividad de los suelos puede relacionarse con el índice de vegetación normalizado (NDVI) definido como la diferencia normalizada entre la reflectancia en las longitudes de ondas infrarroja próxima R_{NIR} y roja R_R :

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R}$$

La relación encontrada entre el NDVI y el coeficiente de emisividad es del tipo:

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln(NDVI)$$

con un coeficiente de correlación de 0.941 ($r^2 = 0.886$), y para $a = 1.0094$ y $b = 0.047$, con un nivel de error de estimación de 0.01.

El NDVI, está relacionado con parámetros de la vegetación, como cantidad de biomasa y superficie verde de las hojas (LAI). Las hojas verdes, tienen altoo valores de NDVI, mientras que hojas secas y amarillentas presentan valores más bajos. Respecto a los suelos desnudos, los valores medios del NdVI son mucho más bajos que para la vegetación.

Para algunos de los focos de interés de la zona de estudio, se ha calculado el NdVI y se ha aplicado la relación anterior, encontrándose valores de emisividad que se ajustan a los valores citados en la bibliografía para estos tipos de superficies (Balle, 1982). Esta relación se ajusta en zonas perfectamente definidas, como por ejemplo, superficies de cultivo, vegetación herbácea, zonas forestales, suelo desnudos o con niveles de vegetación bajos, cubiertas de edificaciones en zonas urbanas, superficies de hormigón o asfaltadas o superficies metálicas aproximadamente homogéneas. Sin embargo, esta relación no se ajusta a superficies muy oscuras, caso de las deposiciones de carbón en algunos parques industriales, y en superficies acuáticas, ya que este tipo de superficies tienen un coeficiente de emisividad muy próximo a la unidad y por el contrario presentan valores de NDVI muy bajos o negativos.

No cabe duda, que la relación entre el NDVI y la emisividad térmica parece muy interesante, y que debería profundizarse más en ello. Van de Griend y Owe (1993), ofrecen mediante la relación empírica descrita entre la emisividad térmica y la reflectancia

tancia espectral en el visible y el infrarrojo cercano, la posibilidad de estimar la emisividad térmica efectiva a escala del pixel, lo cual puede ser de gran ayuda en los estudios de balance energéticos.

CONCLUSIONES

Se pone de manifiesto la utilidad de las imágenes térmicas para la identificación, tanto de áreas térmicamente homogéneas, como de focos de mayor temperatura, que puedan representar posibles afecciones a un entorno inmediato. La información extraída de esos focos, permite evaluar la importancia de los mismos.

En algunos casos, la identificación de esos focos, se relaciona directamente con vertidos "térmicos", asociados a diferentes actividades productivas tales como, producción de energía eléctrica, o plantas de producción de sectores como el cementero o el metalúrgico. Otros focos, se asocian a la deposición incontrolada de materiales tanto en recintos industriales cerrados como en espacios abiertos, que a su vez pueden desencadenar procesos de contaminación en el suelo.

La identificación térmica de las diferentes superficies, puede ser de gran utilidad para la selección de determinadas áreas para la realización de medidas del balance energético. Evidentemente, en función de la finalidad del estudio, es interesante estudiar la viabilidad de trabajar con imágenes de mayor resolución que las TM, como pueden ser imágenes ATM, que permiten un mayor control de los flujos térmicos, tanto en áreas urbanas como industriales.

BIBLIOGRAFIA

- BOLLE, H.J. 1982. Radiation and Energy Transport in the Earth Atmosphere System. En *The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles*. Ed. O. Hutzinger. 1 Part B: 131-303. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- BOND, R.G. 1974. Thermal Pollution and Cooling Water. En *Handbook of Environmental Control 4*: 799-806. CRC Press. Cleveland.
- BYRNE, G.F. et al. 1979. Remotely sensed land cover temperature and soil water status a brief review. *Remote Sens. Environ.* 8: 291-305.
- CARNAHAN, W.H. and LARSON, R.C. 1990. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sens. Environ.* 33: 65-71.
- DIRECCIÓN GENERAL DE MEDIO AMBIENTE 1984. *Evaluaciones de Impacto Ambiental*. MOPU, Secretaría General Técnica. Madrid.
- ESTEVAN, M.T. 1984. *Evolución del Impacto Ambiental*. Fundación Mapfre. Madrid.
- MARKHAM, B.L. and BARKER, J.L. 1986. Landsat MSS and TM Post-Calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. En *EOS4T Landsat Technical Notes 1*. pp 3-8.
- PAT, S. and CHAVEZ, J.R. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 24: 459-479.
- PAUL, E.A. and HUANG, P.M. 1980. Chemical aspects of soils. En *The Handbook of Environmental Chemistry*. Ed. O. Hutzinger. 1 Part A: 69-86. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- SCHOIT, J.R. 1989. Image processing of thermal infrared images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55: 1311-1321.
- TRIEBNIG-LOFFIER, C. 1993. The impact of landuse, relief and insolation on brightness temperatures derived from Landsat-5 Thematic Mapper data. En *25th International Symposium, Remote Sensing and Global Environmental Change*. Graz, Austria. pp 11-142-11-153.
- VAN DE GRIENO, A.A. and OWE, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14: 1119-1131.
- VAN OER PLOEG, S. W.F. 1982. Basic concepts of ecologo En *The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles*. Ed. O. Hutzinger. 1 Part B: 1-43. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- WHEELER, O.J. 1986. Spectral characterization of urban land covers from Thematic Mapper. En *Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*. Enschede. pp 893-898.