

El problema de la "escala espacial" en los datos de teledetección: metodología aplicada en el proyecto EFEDA

J. Meliá y J. F. Moreno

Unidad de Teledetección - Facultad de Física. Universidad de Valencia. 46100 Burjassot, Valencia.

RESUMEN

Una detallada metodología ha sido específicamente desarrollada para tratar de modo adecuado los datos obtenidos en el "European Field Experiment on a Desertification-threatened

Area"(EFEDA."integración de medidas en el suelo con los datos de satélite de baja resolución se ha abordado haciendo uso de datos LANDSAT TM de alta resolución, como un escalón intermedio en la transición de medidas en el suelo a datos de satélite, e integrando datos LANDSAT TM con datos NOAA AVHRR/METEOSAT para modelizar el "cambio de escala" en las medidas desde satélite. La metodología completa consta de cuatro etapas: (a) localización geométrica precisa en la imagen de satélite de cada punto donde hay disponible medición en suelo, (b) determinación del "valor" medido por el satélite, (c) estimación del "error" en la medida del satélite, basado en la derivación "pixel a pixel" de la variabilidad espacial a partir de datos de alta resolución, (d) generación de una "base de datos multi-escala" una vez que los diferentes niveles de resolución han sido co-registrados. Este método permite interpretar medidas en baja resolución en términos de la variabilidad espacial derivada de datos en alta resolución.

PALABRAS CLAVE. Modelo del cambio de escala, medidas desde satélite.

ABSTRACT

A detailed methodology has been specifically developed for the adequate processing of data acquired during the "European Field Experiment on a Desertification threatened Area" (EFEDA). Integration of ground measurements and low resolution satellite data has been addressed by using high spatial resolution LANDSAT TM data as an intermediate step in the transition from ground data to satellite data, and integrating LANDSAT TM data with NOAA AVHRR/METEOSAT data to model the "change of scale" in the satellite measurements. The complete method has four steps: (a) precise geometric location in the satellite image of each point where a ground measurement is available, (b) appropriate determination of the "value" measured by the satellite, (c) estimation of the "error" in the satellite measurement, based on derivation of the "pixel by pixel" spatial variability from high resolution data, (d) generation of a "multi-scale database", after all the different resolution levels have been co-registered. Low resolution measurements can be interpreted in terms of the spatial variability derived from high resolution data by following this methodology.

KEY WORDS: Model the change of scale, satellite measurements.

INTRODUCCIÓN

Aunque actualmente existen sistemas de teledetección por satélite de muy alta resolución espacial, los estudios que requieren alta frecuencia temporal o una cobertura espacial de carácter global condicionan el empleo de datos de baja resolución. Aparte de los satélites geoestacionarios (principalmente METEOSAT), sólo un sistema de satélites (NOAA AVHRR) ha proporcionando datos de cobertura global, para todo el planeta, con una frecuencia diaria, durante los últimos años. Los modelos desarrollados para utilizar como inputs datos AVHRR o METEOSAT requieren ser validados mediante medidas en el suelo, a través de campañas rutinarias o experimentos piloto. Tales medidas en el suelo son necesarias para

calibrar los datos de satélite, y validar los modelos que sólo utilizan como inputs datos de satélite de modo rutinario.

El "European Field Experiment on a Desertification-threatened Area" (EFEDA) ha tenido como núcleo el experimento piloto llevado a cabo en Junio de 1991 en Castilla-La Mancha (Bolle y Streckenbach, 1993). Múltiples mediciones fueron realizadas, tanto de condiciones en el suelo como de la atmósfera. La disponibilidad conjunta de diferentes datos de satélite (LANDSAT, NOAA, METEOSAT) y avión (TMS, AVIRIS, AIRSAT) representa una ocasión única de validar modelos y calibrar los datos disponibles de modo operacional.

Pero la comparación de medidas en el suelo (escala de metros) con las medidas realizadas por un satélite, especialmente en baja resolución (escala de kilómetros) hace necesaria la consideración del

"problema de la escala espacial" en los datos de teledetección, sobre todo cuando éstos tienen muy diferente resolución. Este problema aparece ya en la comparación de medidas particulares, pero resulta crítico en el caso de comparar modelos matemáticos derivados de tales medidas particulares.

Una metodología específica y detallada ha sido desarrollada para tratar adecuadamente los datos obtenidos en el experimento EFEDA. La transición desde medidas en el suelo hasta los datos de satélite de baja resolución se realiza haciendo uso de datos LANDSAT TM de alta resolución, como un escalón intermedio en la transición de medidas en el suelo y datos de satélite, y la integración de datos LANDSAT TM con datos NOAA AVHRR/METEOSAT para modelizar el "cambio de escala" en las medidas desde satélite.

EL PROBLEMA DE LA ESCALA ESPACIAL EN LOS DATOS DE TELEDETECCIÓN

Las transformaciones en la superficie terrestre tienen lugar a diferentes escalas espaciales. Los fenómenos de carácter más local deben ser observados con una escala del orden de metros, mientras que los modelos generales de evolución climática y transformaciones globales en la superficie deben ser estudiados a una escala entre las decenas y los centenares de kilómetros.

Evidentemente, antes de estudiar las transformaciones globales sobre áreas extensas, tales transformaciones han de ser estudiadas sobre áreas pequeñas, mediante datos de alta resolución espacial, con el fin de determinar la variabilidad espacial de los fenómenos estudiados, y establecer la escala espacial "óptima" para la detección y seguimiento de las transformaciones globales sobre tales áreas más extensas. Cuando los procesos estén debidamente entendidos a una escala local, puede abordarse el estudio a una escala regional o global.

Hay que tener presente que, si bien las medidas de campo proporcionan los inputs necesarios para desarrollar y validar los modelos locales, únicamente los datos de teledetección proporcionan una adecuada cobertura "global", por lo que, a medida que la escala de estudio abarca zonas mayores, el papel de la teledetección resulta más relevante.

Por otro lado, el uso de satélites con diferente resolución permite una "transición" de las medidas en el suelo a los modelos globales. En efecto, el empleo de datos de alta resolución (como LANDSAT o SPOT) puede servir como un escalón intermedio entre las medidas de suelo y los datos de baja resolución, como NOAA AVHRR o METEOSAT. Este tipo de técnicas requiere desarrollos teóricos acerca de como la información en alta resolución debe ser especialmente degradada. Los datos disponibles gracias a la campaña inten-

siva de medidas en EFEDA permiten analizar la validez de tales modelos, y los diferentes aspectos a tener en cuenta en la integración de información multi-resolución procedente de sistemas de teledetección.

El problema de la escala espacial está siempre presente en los datos de teledetección, pero resulta especialmente crítico cuando tales datos de teledetección pretenden ser utilizados como inputs en modelos que establecen relaciones no lineales de los datos de teledetección con los inputs de tales modelos. Como toda relación no lineal no es invariante bajo cambios de escala, todos los inputs han de ser de algún modo "normalizados" a una escala común.

DISPONIBILIDAD DE DATOS DE AVION Y SATELITE DURANTE LA CAMPAÑA INTENSIVA DE MEDIDAS EN EFEDA

Dos tipos de sistemas de teledetección estuvieron disponibles durante EFEDA: los sistemas de satélite y los sistemas aerotransportados.

Aunque diversos sistemas de satélite estaban operativos durante la campaña intensiva de medidas de EFEDA en Junio de 1991, las condiciones de operatividad, óptima adecuación, y limitaciones económicas, restringieron la utilización de sistemas de satélites a tres sensores principalmente, abordo de tres satélites diferentes: LANDSAT TM, NOAA AVHRR y METEOSAT.

El satélite METEOSAT proporcionó una cobertura sistemática, diaria, con una imagen cada media hora, para toda la zona de estudio. La resolución espacial es realmente baja, pero la frecuencia temporal permite el seguimiento detallado de procesos evolutivos, relacionados con la cobertura nubosa o balances de energía en la superficie.

El satélite NOAA AVHRR ha sido el más fructífero en EFEDA, y la mayor parte de los resultados se han derivado de estos datos. Su resolución espacial es baja (del orden de 1 km), y, aunque se tiene un total de unas cuatro pasadas diarias sobre la zona, prácticamente todos los estudios se han centrado en las imágenes captadas en torno a las 14 horas GMT, dadas las ventajas de condiciones de iluminación y rango de temperaturas terrestres a dicha hora. Este tipo de imágenes tiene una buena calidad radiométrica, pero presentan muy importantes distorsiones geométricas debidas a la geometría de observación y el movimiento orbital, lo que hace que el trabajo con este tipo de imágenes requiera un desarrollo importante de metodologías para abordar con precisión las correcciones requeridas, tanto geométricas como angulares.

El satélite LANDSAT sólo realizó dos pasadas en condiciones óptimas sobre toda la zona de EFEDA durante la campaña intensiva de medidas: el 12 y el 28 de Junio de 1991. Su observación

vertical y la estabilidad geométrica de las imágenes se traducen en una bastante buena calidad en cuanto a la resolución espacial (30 m. Dadas las características del experimento EFEDA, las imágenes LANDSAT se han utilizado como elemento auxiliar para la interpretación de las imágenes AVHRR, si bien se han realizado también trabajos utilizando directamente las imágenes LANDSAT TM, sobre todo para analizar de modo más detallado aquellas zonas especialmente interesantes (principalmente las áreas piloto), algunas de las cuales presentan una notable heterogeneidad en las propiedades de los suelos y la vegetación en la superficie.

Por otro lado, tres tipos de sistemas aerotransportados proporcionan datos durante el período intensivo de medidas en EFEDA. Por un lado, aviones procedentes de Alemania realizaron diferentes tipos de mediciones de los parámetros atmosféricos. En algunos casos se utilizaron nuevos sistemas muy avanzados (como el LIDAR) para determinar la estructura de la atmósfera en términos del contenido en aerosoles y en vapor de agua, parámetros básicos para estimar las correcciones atmosféricas a aplicar a otro tipo de datos de teledetección convencional. Un segundo tipo de sistema aerotransportado fue proporcionado por los vuelos del avión ER-2, de la NASA. Capaz de volar a una altura de 20 Km. para simular futuras mediciones desde satélite, el ER-2 realizó dos vuelos sobre la zona de EFEDA. En ambos vuelos el avión disponía de tres sensores: el Thematic Mapper Simulator (un simulador del LANDSAT TM con bandas espectrales adicionales), el Airborne Visible/Infrared Imaging spectrometer (AVIRIS), un prototipo de futuro sensor en satélite

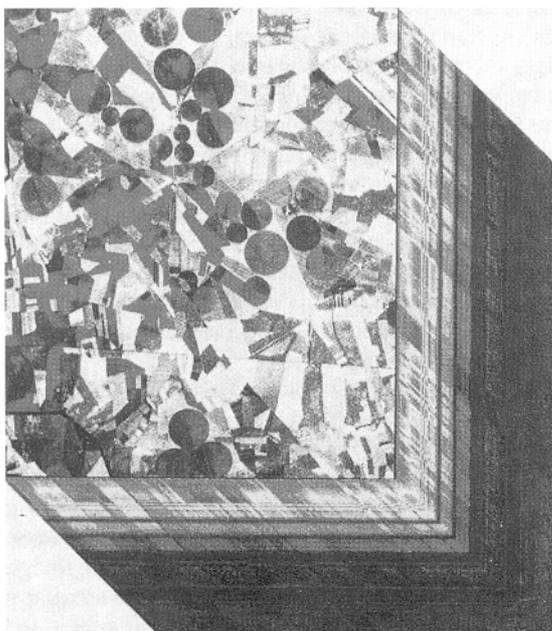


Fig. 1. - Escena AVIRIS correspondiente a la zona piloto de Barrax, captada el día 29 de Junio de 1991. La estructura "cúbica" muestra las 224 bandas espectrales superpuestas a un falso color generado a partir de tres capas espaciales.

que cubre todo el intervalo espectral entre 0.4 y 2.5 μm . con 224 bandas, y la cámara métrica de alta definición, con película infrarrojo. Desgraciadamente, el fallo técnico del Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) limitó considerablemente la disponibilidad de datos de gran interés en el intervalo térmico, pero el sensor AVIRIS (si bien con importantes problemas técnicos en el cuarto espectrómetro) ha posibilitado interesantes análisis en todo el rango de 0.4-2.5 μm (ver figura 1. Un tercer tipo de sistema aerotransportado fue proporcionado por los dos vuelos del avión DC-8, también de la NASA, que llevaba a bordo el Jet Propulsion Laboratory AirSAR, un prototipo experimental de radar polarimétrico multispectral (tres frecuencias con todas las polarizaciones), en fase de pruebas para futuro desarrollo como sistema de satélite.

EL PROBLEMA DE LA EXTRAPOLACION DE MEDIDAS PUNTUALES EN EL SUELO A LA ESCALA DE DATOS DE SATELITE

La comparación de medidas en el suelo (escala de metros) con las medidas realizadas por un satélite, especialmente en baja resolución (escala de kilómetros) hace necesaria la consideración del "problema de la escala espacial" en los datos de teledetección, sobre todo cuando estos tienen muy diferente resolución espacial.

Este problema aparece ya en la comparación de medidas particulares, pero resulta crítico en el caso de comparar modelos matemáticos derivados de tales medidas particulares. Los problemas asociados al cambio de escala de las variables derivadas de relaciones matemáticas (establecidas a partir de medidas en el suelo) a variables derivadas de medidas de satélite resultan más importantes a medida que tales relaciones se alejan del comportamiento lineal. Incluso en el caso de relaciones lineales, tales relaciones matemáticas pueden resultar convertidas en relaciones no lineales al nivel de baja resolución, particularmente si la determinación de las variables independientes no puede ser considerada como un simple promedio aritmético espacial.

En la metodología específica desarrollada para tratar los datos obtenidos en el experimento EFEDA, la transición desde medidas en el suelo hasta los datos de satélite de, baja resolución se realiza haciendo uso de datos LANDSAT TM de alta resolución, como un escalón intermedio en la transición de medidas en el suelo y datos de satélite, y la integración de datos LANDSAT TM con datos NOAA AVHRR/METEOSAT para modelizar el "cambio de escala" en las medidas desde satélite (Moreno y Meliá, 1992. "integración de datos de satélite de alta y baja resolución espacial permite interpretar los datos de baja resolución en términos de la variabilidad espacial derivada de los

datos de alta resolución (ver figura 2. El problema de la definición de la varianza dentro de cada pixel a la escala de pixels NOAA AVHRR ha sido también considerado.

Se han seguido principalmente dos líneas de investigación: transición (cambio de escala) desde medidas puntuales en el suelo a medidas desde satélite, e integración de datos de satélite multi-resolución (multi-escala).

Transición de medidas puntuales en el suelo a datos NOAA AVHRR de baja resolución

La metodología desarrollada para la conexión entre medidas en el suelo y datos de satélite, de baja resolución (AVHRR) consta esencialmente de cuatro etapas:

(a) Localización geométrica "precisa" en la imagen de satélite AVHRR de cada punto donde hay disponible medición en suelo (este aspecto es especialmente crítico en medidas de baja resolución.

Dada la importancia de dicha localización precisa, un sofisticado método de corrección geométrica de datos NOAA AVHRR ha sido desarrollado (Moreno y Meliá, 1993a. Los elementos orbitales que definen la trayectoria del satélite son inicialmente extrapolados a partir de los datos de efemérides orbitales (TBUS), distribuidos diariamente por la agencia NOAA para el seguimiento de sus satélites, hasta el tiempo de la imagen, teniendo en cuenta los errores producidos por el desajuste del reloj interno del satélite con respecto al tiempo real de observación. Tales, elementos orbitales de este modo extrapolados son entonces reajustados mediante puntos de control, siguiendo un procedimiento iterativo basado en el cálculo de la distancia satélite-centro terrestre, para cada punto de control, por diferentes métodos, hasta lograr convergencia en los valores determinados por los diferentes procedimientos. Después de determinar la trayectoria orbital, los errores residuales son interpretados como errores debidos a variaciones en los ángulos de actitud del satélite, (cabecero, balanceo y guiñada). Tales variaciones de los ángulos de actitud son modelizadas como un polinomio de segundo grado en la variable temporal. Son precisamente estas correcciones de los ángulos de actitud las que permiten obtener una precisión sub-pixel en la corrección geométrica resultante. El algoritmo ha sido implementado en un ordenador IBM 3090, lo que permite un tratamiento operacional sin las restricciones que imponen las aproximaciones introducidas para reducir los tiempos de cálculo en ordenadores de menor capacidad de proceso. La precisión numérica ha sido establecida de modo que sea posible producir imágenes geoméricamente rectificadas con un tamaño de pixel de 10 metros incluso para datos AVHRR,

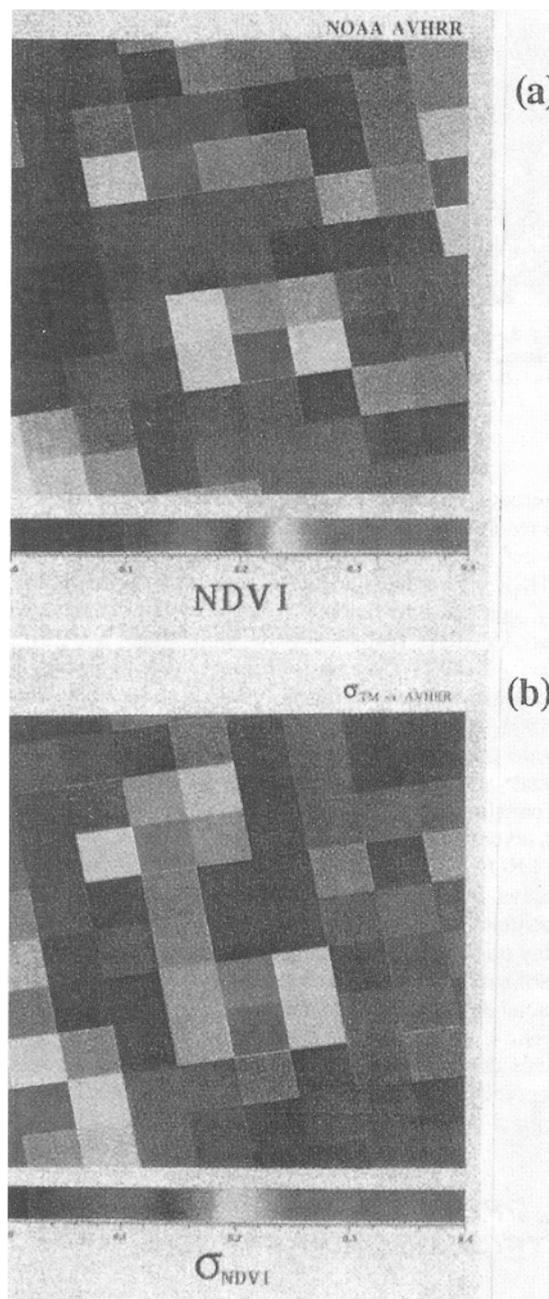


Fig. 2. - Simulación de valores de índice de vegetación (NDVI) a partir de datos LANDSAT TM, para generar datos 'sintéticos' AVHRR (a) comparables a datos AVHRR reales. La correspondiente varianza intra-pixel también es presentada (b). En ambos casos se trata de una simulación 'realista', pixel a pixel, correspondiente a la zona piloto de Barrax

para su combinación con datos de 10 metros de resolución real.

(b) Determinación del "valor" medido por el satélite, mediante un método adecuado de interpolación.

El punto de la imagen del satélite correspondiente al punto de medida en el suelo raramente, coincide con una de las mediciones realmente realizadas por el satélite (pixels), sino que es preciso interpolar en la matriz de pixels realmente medidos por el satélite para determinar, mediante técnicas de interpolación, el valor correspondiente al punto

de medida en el suelo. Este método de interpelación ha de estar adaptado a la geometría de visión del satélite, y ha de dar cuenta del tamaño y forma de los píxeles, así como del solapamiento de los mismos, teniendo también en cuenta la función de respuesta espacial de cada uno de ellos. Los métodos clásicos de interpolación, incluso los más sofisticados, no son capaces de dar cuenta de estos efectos.

Un nuevo método de interpolación "óptima" de imágenes de satélite, adaptado a la geometría particular de visión, ha sido especialmente desarrollado para generar valores físicos realistas a partir de la matriz de cuentas digitales para un entorno de 6x6 píxeles AVHRR (Moreno y Meliá, 1993b). Se trata de un método de interpelación tremendamente complicado y que requiere un elevado tiempo de cálculo, pero que permite obtener valores realistas para las mediciones de satélite cuando se requiere una gran precisión, como en el caso de experimentos como EFEDA.

(c) Estimación del "error" en la medida del satélite, basado en la derivación "pixel a pixel" de la variabilidad espacial a partir de datos LANDSAT de alta resolución, mediante la simulación realista de datos en baja resolución a partir de datos en alta resolución (por ejemplo, LANDSAT TM, o SPOT) (Moreno et al., 1992).

La comparación de los valores promediados en alta resolución (LANDSAT TM) con los valores reales en baja resolución (AVHRR) permite interpretar los datos en baja resolución en términos de la varianza (variabilidad espacial) derivada de los datos en alta resolución (Moreno y Meliá, 1992). Ello implica una parametrización de variabilidad espacial en las condiciones de la superficie a la escala de píxeles AVHRR, si tales valores en baja resolución han de ser correctamente interpretados, especialmente en áreas heterogéneas. La varianza se estima a partir de los datos en alta resolución, una vez que, mediante detallada degradación espacial, se generan valores promedio realmente equiparables a los medidos de hecho en baja resolución.

(d) Una base de datos multi-resolución es necesaria para poder validar un conjunto de mediciones. La generación de una "base de datos multi-escala" una vez que los diferentes niveles de resolución han sido co-registrados, permite validar mediciones sobre un área geográfica extensa, extrapolando especialmente los resultados derivados para los puntos en los que se dispone efectivamente de mediciones en el suelo.

Integración de datos multi-resolución espacial (LANDSAT TM/NOAA AVHRR/METEOSAT)

El segundo aspecto de este trabajo ha consistido en el desarrollo de modelos teóricos, y algoritmos prácticos, para la integración de los datos en alta

resolución con los datos en baja resolución (Moreno et al., 1990), pero a nivel de imagen multi-resolución, y no ya como una mera comparación multi-escala de medidas puntuales. Este tipo de integración es requerida por modelos que utilizan simultáneamente inputs en alta y baja resolución (Moreno, 1991a).

El problema no es solamente la superposición geométrica de imágenes de muy diferente resolución espacial (Moreno et al., 1991), sino que se han de tener en cuenta también consideraciones de tipo radiométrico, relacionadas con las diferentes bandas de medida espectral de cada instrumento, los diferentes niveles de cuantización radiométrica y efectos angulares debidos a la geometría particular de visión por parte de cada satélite, además de los efectos debidos al comportamiento no-lambertiano de las superficies naturales, especialmente notables en el caso de datos AVHRR.

El primer problema es la determinación de parámetros efectivos, en baja resolución, a partir de los datos en alta resolución, como un método de proporcionar inputs a modelos en baja resolución, típicamente a partir de datos AVHRR. El mero promedio aritmético, aproximación tradicionalmente seguida en este tipo de cálculos, no es suficiente para reproducir los datos en baja resolución. Técnicas sofisticadas han sido utilizadas para procesar los datos de EFEDA de modo consistente (Moreno et al., 1992), dando cuenta de todos los principales efectos que intervienen en la definición de parámetros efectivos "realistas", incluso cuando éstos no proceden de promedios lineales.

El análisis de la variabilidad espacial de los datos AVHRR -a la escala del pixel e incluso sub-pixel- se ha analizado con detalle, considerando los efectos angulares en el caso de observaciones fuera de la vertical (nadir), así como las variaciones en el tamaño y la forma del pixel con el ángulo de visión, y la influencia del solapamiento entre píxeles contiguos, teniendo en cuenta la función de respuesta espacial del sensor. Los efectos de giro del campo de visión (IFOV) con el ángulo de visión también han sido analizados para el caso de imágenes captadas con un ángulo de visión muy oblicuo en el extremo de la zona de cobertura del saté-

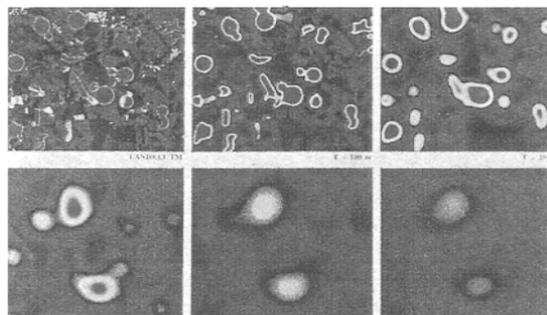


Fig. 3. -Simulación de medidas de satélite en baja resolución espacial, mediante degradación espacial de datos de satélite en alta resolución, utilizando datos LANDSAT TM como punto de partida, para una de las zonas piloto del experimento EFEDA (Barrax).

lite NOAA en cada órbita (Moreno et al., 1992; Moreno y Meliá, 1993b).

Métodos prácticos de combinación de datos de alta y baja resolución han sido desarrollados, así como métodos para definir valores integrados a la escala de datos NOAA AVHRR a partir de datos de alta resolución (LANDSAT TM), comparando datos NOAA AVHRR "reales" con datos AVHRR "realísticamente simulados" a partir de datos LANDSAT TM a nivel de imagen (ver figuras 2 y 3).

La coincidencia NOAA-LANDSAT el día 12 de Junio de 1991, uno de -los Golden Days del experimento, ha servido como base para el desarrollo de la metodología aplicada, así como para poner a prueba los métodos desarrollados para la integración de datos multi-resolución espacial. Para las correcciones atmosféricas de los datos LANDSAT TM y NOAA AVHRR se ha usado el modelo de transferencia radiativa 5S (Tanre et al., 1986), utilizando las medidas disponibles de parámetros atmosféricos (radiosondeos).

Hay que tener en cuenta que la respuesta espacial del sensor viene de hecho convolucionada con la respuesta espacial de la atmósfera. Tales efectos atmosféricos han de ser eliminados (deconvolucionados) para modelizar los efectos debidos estrictamente a la integración espacial, y comprender el papel de la atmósfera en tales efectos de integración espacial.

EL PROBLEMA DE LA INTEGRACION ESPECTRAL

Además de la integración espacial, en la transición de mediciones puntuales en el suelo a datos de satélite es preciso considerar también el problema de la integración espectral, o mejor dicho, el acoplamiento entre la integración espacial y espectral en el caso de mediciones reales. La mayoría de los sistemas de satélite utilizan bandas de -medida espectralmente anchas, principalmente debido a los requerimientos de un cociente señal ruido suficientemente alto. Ello implica que los valores medidos resultantes corresponden realmente a valores espectralmente integrados. Además, la integración espectral es siempre un proceso acopiado a la integración espacial, especialmente en el caso de trabajar con sistemas de baja resolución espacial, como el NOAA AVHRR.

Un problema relacionado con este tipo de cuestiones es el debido al hecho de que cada sensor utiliza bandas espectrales de medida diferentes. Aun cuando tales bandas de medidas estén situadas en la misma región espectral, la anchura de la banda y la forma de la función de respuesta puede ser muy diferente. Aunque se determinan valores de índices de vegetación (por ejemplo, NDVI) a partir de diferentes sensores, los valores difieren debido a que, entre otras cosas, corresponden a mediciones con ligeras diferencias espectrales. Lo

mismo sucede en el caso de mediciones de temperatura, donde los valores difieren notablemente según la banda de medida utilizada, y en general esto sucede prácticamente con todos los parámetros medibles mediante técnicas de teledetección. La muy alta calidad radiométrica de AVIRIS, y su alta resolución radiométrica (10 bits), así como la existencia de una casi perfecta calibración del mismo, hacen que se trate de un instrumento prototipo para simular otras medidas o analizar en detalle aspectos que raramente pueden ser analizados mediante datos opcionales, cuya calidad y calibración es a veces más que dudosa. En particular, dadas sus características técnicas, el instrumento AVIRIS resulta especialmente adecuado para el estudio de los problemas asociados a la integración espectral, analizando la representatividad de las mediciones realizadas con "banda ancha" (baja resolución espectral. Por otro lado, la disponibilidad de datos simultáneos con diferente resolución espectral, AVIRIS y TMS, (adquiridos exactamente bajo las mismas condiciones atmosféricas y las mismas condiciones geométricas de observación), permite analizar las conclusiones derivadas de AVIRIS mediante comparación con datos TMS "reales" en baja resolución espectral (Moreno et al., 1993. Sin embargo, un problema importante es la falta de una adecuada calibración de los datos TMS. Aunque el sensor fue calibrado antes de la campaña de medidas, los resultados de nuestros análisis AVIRIS-TMS han indicado claramente las deficiencias en el calibrado. Se ha desarrollado un procedimiento para el re-calibrado de datos TMS a partir de datos AVIRIS debidamente calibrados sobre zonas homogéneas (Moreno et al., 1993. Otro problema importante a tener en cuenta en este tipo de análisis es la variabilidad espacial de las condiciones atmosféricas (principalmente del contenido de vapor de agua), sobre todo al desarrollar modelos de corrección atmosférica para derivar valores de reflectividad del suelo a partir de los valores de radiancia medidos por los sensores en el avión de tan alta resolución espectral como AVIRIS (ver figura 4). Incluso cuando se usan radiosondeos locales realizados casi simultáneamente con el paso del avión, la corrección atmosférica utilizando sofisticados algoritmos de transferencia radiativa, como LOWTRAN 7 (Kneizys et al., 1988), no proporciona un resultado plenamente satisfactorio, si bien las principales diferencias con las rendidas en el suelo se hallan centradas en las bandas secundarias de absorción del vapor de agua, donde es muy difícil una adecuada corrección. Los problemas principales vienen dados por la dificultad en modelizar la variabilidad espacial del vapor de agua, de la cual no da cuenta el radiosondeo. Esta variabilidad es especialmente crítica en áreas de regadío, como barrax, donde la variabilidad espacial y temporal del vapor de agua atmosférico ha sido constatada durante EFEDA.

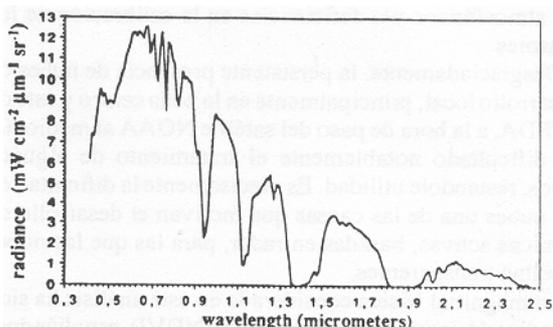


Fig. 4. - Radiancia espectral medida por el sensor AVIRIS a bordo del avión ER-2, desde una altura de 20 Km, para el suelo desnudo de referencia en la zona piloto de Barrax el 29 de junio de 1991.

Trabajos en curso intentan incorporar una mejor modelización de los efectos de absorción por el vapor de agua, así como un mejor código de transferencia radiativa, fundamentalmente en lo que se refiere a los fenómenos de absorción. El contenido de vapor de agua atmosférico puede calcularse a partir de las propias medidas de AVIRIS, pero ello requiere una modelización detallada de las bandas de absorción, si se pretenden obtener resultados precisos.

La dependencia, con la longitud de onda, de las propiedades de la integración espacial está siendo estudiada a partir de datos AVIRIS, pero se requieren cálculos más detallados para tener en cuenta el acoplamiento de la variación espacial de las propiedades de la superficie y la variación espacial de los parámetros atmosféricos. Este desacoplamiento es necesario para interpretar correctamente datos de tan alta resolución espectral y sacar conclusiones cuantitativas acerca de los efectos de integración espectral.

RESULTADOS

Dada la enorme cantidad de datos resultantes de la campaña intensiva de medidas en EFEDA, y, en particular, dado el elevado volumen que representan los datos de teledetección (varios gigabytes), el trabajo se ha centrado en la selección de unos días claves ("golden days") que se consideran más significativos y prioritarios a la hora del procesado de los datos.

Desde el punto de vista concreto de nuestro trabajo, se han elegido como "golden days" las dos coincidencias LANDSAT-NOAA durante la campaña de medidas: el 12 y el 28 de Junio de 1991, así como el día 29 de Junio de 1991 debido al vuelo del avión ER-2 de la NASA, llevando a bordo los sensores AVIRIS y TMS.

Un suelo desnudo en la zona de Barrax fue utilizado para las mediciones de referencia en tierra con las que comparar (a efectos de calibración) los datos de avión y satélite. La reflectividad de esta misma superficie de referencia fue medida el 28 de Junio, para comparar con datos LANDSAT, y el

29 de Junio, a la hora de paso del avión ER-2, para comparar con los datos AVIRIS y TMS. El objetivo de esta comparación era analizar la influencia de los efectos atmosféricos y/o deficiencias en la calibración de los sensores.

Desgraciadamente, la persistente presencia de nubes de desarrollo local, principalmente en la zona centro y este de EFEDA, a la hora de paso del satélite NOAA al mediodía, ha dificultado notablemente el tratamiento de algunos datos, restándole utilidad. Es precisamente la dificultad de las nubes una de las causas que motivan el desarrollo de técnicas activas, basadas en radar, para las que las nubes resultan transparentes.

La magnitud básica considerada en este análisis ha sido el índice de vegetación normalizado (NDVI), estudiándose las consecuencias de la variabilidad espacial en los valores promediados medidos por un sensor como el AVHRR sobre zonas heterogéneas. Otra magnitud básica considerada ha sido la temperatura, dado el interés de este parámetro en la mayor parte de modelos agroclimáticos considerados en EFEDA. Sin embargo, es en el caso del índice de vegetación (NDVI) donde los efectos del "cambio de escala" resultan más notables.

a) El índice de vegetación normalizado (NDVI)

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de la representatividad de los valores de índice de vegetación NDVI medidos en el suelo, comparación con los valores de NDVI derivados a partir del sensor AVHRR. Se ha considerado la variabilidad con la escala espacial tanto de los valores promediados como la varianza intra-píxel. El problema de la determinación de un valor de índice de vegetación para un punto característico ha sido abordado considerando todas las fuentes posibles de error en dicha determinación, especialmente la variabilidad del error con la escala espacial. La mayor parte del análisis se, ha basado en la interposición de datos LANDSAT entre las medidas en el suelo y los valores de índice de vegetación derivados del NOAA AVHRR. Dos resultados fundamentales han sido obtenidos (Moreno y Meliá, 1992) (ver figura 5):

El primero tiene que ver con los valores promedio derivados para el NDVI en función de la escala espacial.

Diferencias significativas pueden observarse entre los valores promediados y los valores integrados, sobre todo cuando el NDVI se aproxima a 0,5, mientras las diferencias son prácticamente despreciables para valores bajos del NDVI. Estos efectos son especialmente notables para la zona de Barrax, dado el tipo de heterogeneidad espacial. Para la zona de Barrax se ha desarrollado una parametrización del NDVI en función de la escala espacial para poder corregir los valores de NDVI derivados del NOAA AVHRR de tales efectos de escala.

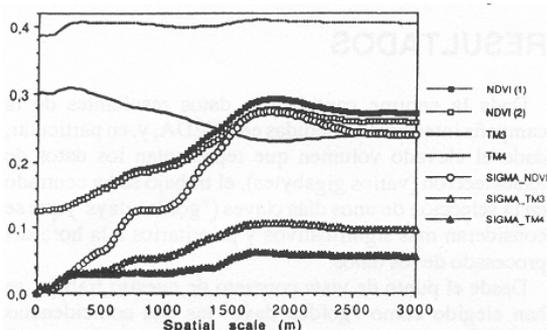


Fig. 5. - Influencia de la escala espacial en la observación sobre los valores medidos de índice de vegetación (NDVI). los valores medios y las varianzas locales se muestran en función de la escala espacial, alrededor del punto donde se realizaron las medidas de calibración, en el suelo de referencia en la zona de Barrax a la hora de paso del LANDSAT. Todos estos valores se han derivado a partir de datos LANDSAT TM, después de su corrección geométrica y atmosférica.

El segundo resultado tiene que ver con la varianza intrapixel resultante en la determinación del NDVI, y su variabilidad con la escala espacial. La conexión entre la varianza y la variabilidad de los valores promedios, en función de la escala espacial, ha sido parametrizada para la zona de Barrax. Dadas las peculiares características del área de Barrax (caracterizada a partir de la densidad espectral en el espacio de frecuencias espaciales), este tipo de efectos resultan significativos en dicha área, lo que posiblemente no suceda en las otras zonas piloto del experimento EFEDA, dado el diferente comportamiento de la densidad espectral para dichas zonas. Estas propiedades espaciales de la zona de Barrax permiten que sea utilizada como zona piloto a la hora de definir las funciones de variabilidad con la escala espacial.

La variabilidad de los valores de NDVI con la escala espacial aumenta las dificultades en la determinación de parámetros de carácter agronómico (tales como LAI, biomasa, etc.) a partir de los datos de teledetección (especialmente NDVI), mediante modelos matemáticos que establecen relaciones (no-lineales) entre el NDVI (u otro similar índice de vegetación) y tales parámetros agronómicos. Los análisis particulares realizados para el caso de la heterogeneidad espacial del área piloto de barrax han dado como resultado que la simple extrapolación de relaciones derivadas a la escala de datos LANDSAT TM para realizar estimaciones a la escala de datos NOAA AVHRR puede conducir a errores incluso de más del 50% en el parámetro agronómico en consideración, debido al amplio rango de valores de NDVI que quedan integrados en un sólo pixel de baja resolución en zonas de alta heterogeneidad espacial (Moreno y Meliá, 1992).

b) Temperatura

Un análisis similar se ha realizado para el campo de temperaturas, debido al especial interés de este parámetro en la modelización de procesos agrometeorológicos dentro del contexto de EFEDA. "

disponibilidad de datos térmicos con diferente resolución espacial: 25 m (TMS), 120 m (LANDSAT TM), 1.1 Km. (NOAA AVHRR) y 5 km. (METEOSAI), permite un análisis de la variación del campo de temperaturas con la escala espacial (Moreno y Meliá, 1993c). En este caso, la variabilidad de los valores de temperatura al cambiar la escala en la observación está directamente ligada a la varianza local de los valores de temperatura en el suelo, pero el acoplamiento de la variabilidad en emisividad con la variabilidad en temperaturas hace que el tratamiento deba ser reconsiderado en detalle en futuros trabajos. Otro problema que ha de ser resuelto previamente es la consideración de la variabilidad espacial del vapor de agua atmosférico, y la modelización de dicha variabilidad espacial en las correcciones de los datos térmicos de avión y satélite. Todas las estimaciones directas del contenido de vapor de agua en la zona de EFEDA indican la gran variabilidad espacial existente. El acoplamiento de la variabilidad espacial emisividad/temperatura/vapor de agua debe ser, pues, modelizado de modo riguroso.

Estos parámetros básicos (NDVI, temperatura) constituyen inputs esenciales que los métodos de teledetección pueden proporcionar a los modelos de balance de energía en el suelo, que constituyen el núcleo esencial del proyecto EFEDA. Es desde el punto de vista de la medida de flujos y del balance de energía entre los diferentes flujos que entran en juego, donde la teledetección juega un papel esencial, especialmente en la extrapolación de medidas puntuales de carácter meramente local a medidas con significado regional e incluso global.

BASE DE IMÁGENES MULTIRESOLUCIÓN

Una base de imágenes multi-resolución ha sido diseñada con el objetivo concreto de facilitar el estudio de los efectos de "cambio de escala" en los datos de satélite y avión. Se ha seguido una planificación en cuatro niveles (Moreno y Meliá, 1993c). El primer nivel corresponde a los datos de suelo, mientras los otros tres niveles corresponden a datos de avión y satélite de diferente resolución espacial. No se ha aplicado a los datos ninguna transformación irreversible que sea dependiente del modelo aplicado (aunque éstas pueden aplicarse como alternativa), pero todas las imágenes son integradas geométricamente mediante rectificación a una retícula UTM común para facilitar las comparaciones con los datos de suelo. Sistemas de visualización multiresolución permiten una impresión visual directa de los efectos del cambio en la escala espacial. No obstante, son los cálculos numéricos los que permiten un análisis cuantitativo.

Tales cálculos se facilitan al estar cada imagen remuestreada al menos a dos niveles de resolución consecutivos, permitiendo ello transiciones entre diferentes niveles de resolución (Moreno y Meliá, 1993c).

Estudios más sofisticados, tomando como base la determinación de la densidad espectral mediante técnicas derivadas de la Transformada de Fourier, han sido aplicados a datos multi-resolución reales, con el fin de analizar la precisión de la integración geométrica lograda, y las propiedades estadísticas derivadas de tales datos multi-resolución (Moreno y Meliá, 1993b) (ver figura 6). Siguiendo esa formulación, se han estudiado las funciones de autocorrelación para los valores del índice de vegetación (NDVI) derivados de datos LANDSAT TM y NOAA AVHRR, particularmente para la coincidencia de ambos satélites el "Golden Day" 12 de Junio de 1991. Estas funciones de autocorrelación son una medida de la información "perdida" cuando se usan datos de baja resolución (AVHRR) en comparación con la información proporcionada por los sistemas de alta resolución (LANDSAT). La figura 7 muestra el comportamiento de tales funciones para el área piloto de Barrax. Este tipo de análisis, usando datos "reales", son necesarios

para poder entender adecuadamente el cambio de escala en las mediciones básicas, y desarrollar los modelos apropiados para analizar el cambio de escala de variables derivadas, que son requeridas como *inputs* a los modelos de escala global.

CONCLUSIONES

Una completa metodología para la comparación e integración de medidas puntuales en el suelo con medidas de satélite de diferente resolución ha sido desarrollada para su aplicación en el procesamiento de los datos del experimento EFEDA. Dicha metodología tiene en cuenta la escala espacial representada por cada uno de los datos. Mediciones a diferentes escalas espaciales pueden de este modo ser comparadas, gracias al desarrollo de técnicas de bases de datos multi-resolución, donde una misma imagen es remuestreada a diferentes escalas espaciales.

El estudio de los efectos del "cambio de escala" en el índice de vegetación NDVI y la temperatura de la superficie tienen como objetivo la parametrización de los flujos de energía en la capa superficial, y su cálculo mediante técnicas de teledetección para zonas geográficamente extensas, generalmente mediante datos METEOSAT o AVHRR, que es el objetivo central del experimento EFEDA.

La espacialización en las propiedades de los suelos y la vegetación, empleando técnicas de clasificación de los datos de teledetección, ha de permitir parametrizar el cálculo de flujos sobre tales áreas extensas, dando cuenta de la variabilidad espacial subyacente. El cálculo de los balances energéticos mediante la extrapolación de medidas sobre la escala de los 100x100 km. constituye el objetivo básico de los futuros trabajos dentro de la segunda fase de EFEDA (EFEDA-II).

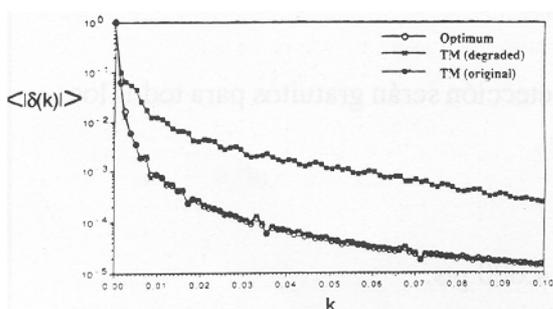


Fig. 6. - Densidad espectral normalizada, en función de la escala espacial k, para todos LANDSAT TM originales y degradados espacialmente a la resolución de datos NOAA AVHRR, así como para datos NOAA AVHRR reales, cuando estos son 'óptimamente interpolados'. La correspondencia de valores LANDSAT TM-NOAA AVHRR sobre todo el rango de frecuencias espaciales es un test de la calidad de la integración geométrica lograda.

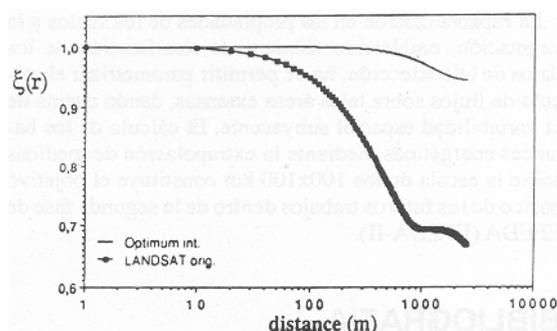


Fig. 7.- Funciones de autocorrelación para valores de índice de vegetación (NDVI), en la zona piloto de Barrax. Se muestra la función correspondiente a datos LANDSAT TM, y la correspondiente a datos NOAA AVHRR cuando estos son representados en la resolución de datos LANDSAT TM mediante 'interpolación óptimal' (Moreno y Meliá, 1993b).

BIBLIOGRAFÍA

- BOLLE, H.J., STRECKENBACH, B. (eds.) 1993. The ECHIVAL Field Experiment in a Desertification-Threatened Area (EFEDA). Final Report. Berlin, August 1993.
- KNEIZYS, FX., et al. 1988, Users Guide to LOWTRAN 7, *Environmental Research Paper No.1010*, Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-88-0177, Hanscom AFB, MA
- MORENO, J., GANDÍA, S. MELIÁ, J. 1990. Comparing Vegetation Indices from high and low spatial resolution satellite data. *Remote sensing for Agriculture*, Beltsville Symposium XV, NASA Goddard Space Flight Center, May 16-18, 1990, 41.
- MORENO, J. 1991a. Integración de información procedente de distintos sensores. En *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*, Ed. S. Gandía y J. Meliá, Universidad de Valencia, 1991, 195-216.
- MORENO, J., GANDÍA, S. MELIÁ, J. 1991. Integración de imágenes de muy diferente resolución espacial: aplicación al caso SPOT HRV-NOAA AVHRR. *Actas de la IV Reunión Científica de la Asociación*

- Española de Teledetección*, Sevilla, 13-15 Noviembre 1991, Ed. Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, 1991, 201-208.
- MORENO, J., GANDÍA, S., MELIÁ, J. 1992. Geometric integration of NOAA AVHRR and SPOT data: low resolution effective parameters from high resolution data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30: 1006-1014.
- MORENO, J., MELIÁ, J. 1992. About the problem of scaling from ground measurements to low resolution satellite data. *Proceedings of the IGARSS'92 Symposium* Houston, Texas, May 1992, vol. II, 1640-1642.
- MORENO, J., MELIÁ, J. 1993a. A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31: 204-226.
- MORENO, J., MELIÁ, J. 1993b. An optimum interpolation method applied to the resampling of NOAA AVHRR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, en prensa.
- MORENO, J., MELIÁ, J. 1993c. Integration of airborne TMS data with operational satellite data: a multiple-scale approach. *25th International Symposium: Remote Sensing and Global Environmental Change, MAC-Europe'91 Special Session 4* Graz, Austria, 4-8 April 1993.
- MORENO, J., FORTEA, J.C., LÓPEZ-BAEZA, E., MELIÁ, J. 1993. Comparison between broad-band and narrow-band simultaneous aircraft observations over the EFEDA study area: a case study by using TMS and AVIRIS data. *25th International Symposium: Remote Sensing and Global Environmental Change MAC-Europe'91 Special Session* Graz, Austria, 4-8 April 1993.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J.J., PERBOS, J., DESCHAMPS, P.Y. 1986. *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*. Lab. d'Optique Atmos., Univers. des Sciences et Techniques de Lille, France.