

INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE MUY DIFERENTE RESOLUCIÓN ESPACIAL: APLICACIÓN AL CASO SPOT HRV-NOAA AVHRR

J. MORENO, S. GANDIA Y J. MELIA.
Unidad de Teledetección. Facultad de Física. Valencia

RESUMEN

Siguiendo el esquema de utilización de imágenes de alta resolución espacial (como LANDSAT o SPOT) para realizar la interpretación de imágenes de baja resolución (como NOAA AVHRR), se ha desarrollado un método para integrar geoméricamente imágenes SPOT e imágenes AVHRR, de modo que información en alta resolución puede degradarse a baja resolución para su directa combinación. Dos aspectos fundamentales se han tenido en cuenta: por un lado, la corrección geométrica de ambas imágenes hasta lograr un óptimo registrado de las mismas -la cual es realizada mediante detallados modelos orbitales para ambos satélites- y, por otro lado, un modelo geométrico de adquisición de imágenes AVHRR que permita "simular" dichas imágenes a partir de datos SPOT. Dicha simulación tiene en cuenta la función de respuesta espacial del sensor (resolución espacial), y los efectos angulares asociados al solapamiento del área observada en tierra para píxeles AVHRR contiguos, así como la variación del tamaño y forma del píxel AVHRR en función del ángulo de visión. La combinación de datos en alta y baja resolución espacial parece ser el sistema óptimo de trabajo en estudios rutinarios de alta frecuencia temporal a escala regional, dada la dificultad en relacionar directamente medidas de suelo con datos de satélite de muy baja resolución.

ABSTRACT

In the framework of using high resolution imagery (such as LANDSAT or SPOT) to improve interpretation of low resolution imagery (such as NOAA AVHRR), a method for geometric integration of SPOT and NOAA AVHRR data has been developed, in such a way that high resolution information can be degraded to low resolution for a direct combination. Two fundamental aspects have been taken into account. On the one hand, geometric correction of both images until optimum registration is achieved -such geometric registration is done by means of detailed orbital models for both satellites-. On the other hand, a geometric model for image acquisition for the AVHRR instrument has been developed, which allows "simulation" of AVHRR images from SPOT data. Such simulation takes into account the spatial response function of the sensor (spatial resolution) and the angular effects associated to the overlaps in the ground observed area for contiguous AVHRR pixels, as well as the variation of the AVHRR pixel size and shape with viewing angle. The combination of high and low spatial resolution data seems to be an optimum way of working in routine studies with high temporal frequency at a regional scale, due to the difficulty in directly relating ground measurements with very low resolution satellite data.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los datos proporcionados por satélites artificiales han sido utilizados de modo operativo en dos tipos de aplicaciones, casi siempre dispares y generalmente sin conexión alguna entre ellas: el campo de la meteorología y climatología (satélites METEOSAT y NOAA, fundamentalmente) y el campo de la evaluación de cultivos, clasificación e inventarios de usos del suelo, aplicaciones geológicas, y otras aplicaciones específicas (utilizando datos LANDSAT y SPOT, fundamentalmente). El interés de los datos LANDSAT y SPOT es bien conocido, así como sus limitaciones. Por otro lado, si bien los datos proporcionados por METEOSAT tienen una resolución espacial excesivamente baja, los

datos proporcionados por los satélites NOAA (especialmente el sensor AVHRR) tienen una resolución de unos 1,1 Km, la cual, aún siendo baja, resulta especialmente interesante si se tiene en cuenta la posibilidad de una muy alta frecuencia temporal (incluso diaria) de este tipo de datos. Particularmente útiles son los datos NOAA AVHRR en el caso de zonas de estudio grandes (como toda España o incluso a nivel continental). El sensor AVHRR tiene especial aplicación en los llamados estudios a escala "global" o planetaria, dado que es el único sistema de satélites que ha venido proporcionando una imagen diaria de toda la Tierra de modo operativo durante los últimos años, con una resolución espacial relativamente aceptable. Actualmente existe una tendencia a la utilización conjunta, en una determinada aplicación, de to-

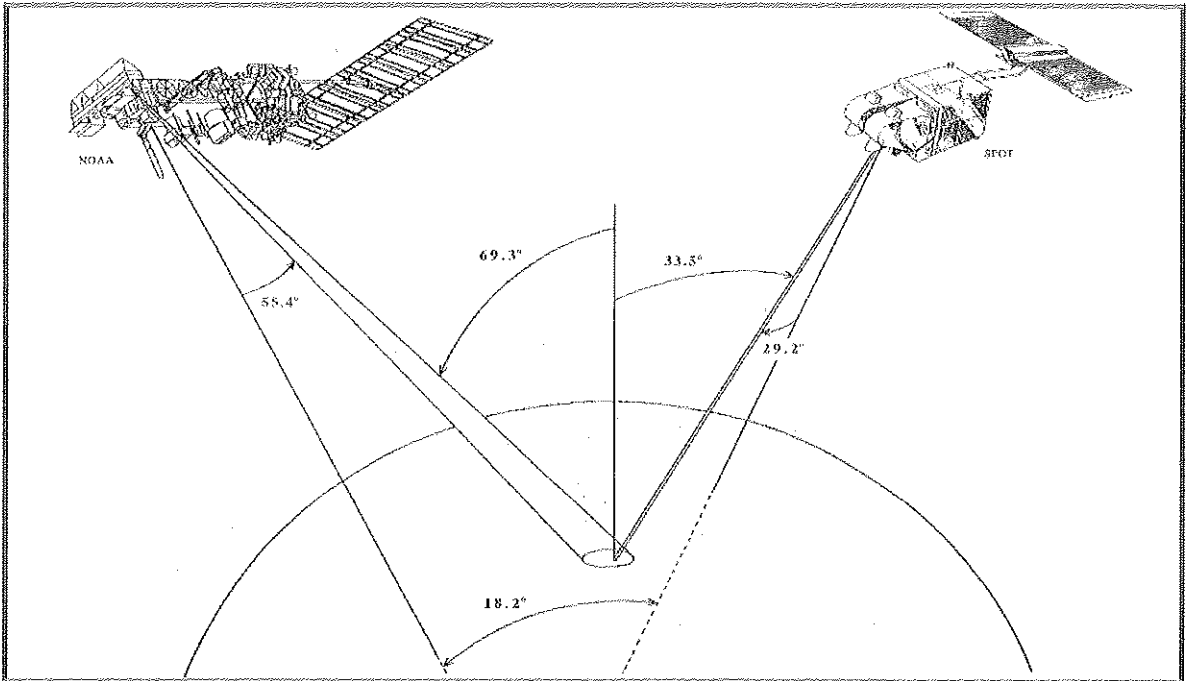


Figura 1.- Valores extremos de los ángulos de visión para una configuración geométrica en la que los satélites SPOT y NOAA observen una misma área geográfica con la máxima separación angular posible.

dos los datos disponibles, convencidos de que sólo una adecuada integración -por complementariedad- permite una explotación racional y realmente útil de los datos de teledetección proporcionados por satélites artificiales.

La utilización de imágenes de alta resolución espacial (como SPOT) para realizar la interpretación de imágenes de baja resolución (como NOAA AVHRR) va siendo cada vez más necesaria a medida que los satélites NOAA -inicialmente de carácter fundamentalmente meteorológico- están siendo utilizados en múltiples estudios a nivel regional que requieren una alta frecuencia temporal de los datos (Duggin et al., 1982; Justice et al., 1985; Olsson, 1986; Tucker et al., 1985). El desarrollo de modelos utilizando como inputs básicos los datos AVHRR (series temporales), y la validación periódica de dichos algoritmos a través de la combinación de los datos AVHRR con datos de muy alta resolución espacial, en determinadas áreas test y fechas representativas, parece ser el sistema óptimo de trabajo en estudios rutinarios de alta frecuencia temporal a escala regional, dada la dificultad en relacionar directamente medidas de suelo con datos de satélite de muy baja resolución, o en la validación de modelos utilizando sólo datos en baja resolución.

Por otro lado, la combinación de datos en diferente resolución espacial, y particularmente la dicotomía muy alta resolución (SPOT), muy baja resolución (NOAA), tiene un gran interés en el caso de aplicaciones concretas en el seguimiento de cubiertas vegetales (monitorización multitemporal en baja resolución y análisis detallado en alta resolución), o en

otro tipo de estudios en los que el doble aspecto alta resolución espacial/alta resolución temporal deba ser combinado (Moreno et al., 1990b).

En realidad, la integración de imágenes de muy diferente resolución espacial constituye un caso particular del problema de la combinación de datos captados por diferentes sensores, generalmente con el fin de proporcionar inputs adecuados a aquellos modelos que utilizan conjuntamente variables en diferentes zonas del espectro, e incluso con diferente resolución espacial y temporal, para modelizar algún fenómeno complejo. Esto es frecuente en el caso de modelos agroclimáticos (Frayse, 1981), donde a menudo hay que combinar datos relacionados con propiedades del suelo o la vegetación (en alta resolución, a partir de datos LANDSAT o SPOT), con otros datos tales como la temperatura a determinadas horas del día (captada únicamente por el satélite NOAA), por ejemplo. Por otro lado, la integración de datos de muy diferente resolución espacial constituye un problema práctico real en el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (GIS) que pretendan integrar datos dispares.

La combinación de datos AVHRR con datos en alta resolución espacial, y particularmente con datos SPOT, ha sido ya considerada en diversos estudios (Quamby et al., 1989; Flitcroft et al., 1990; Moreno et al., 1990b y 1992a). En algunos casos, sin embargo, tal consideración no ha tenido en cuenta algunos aspectos geométricos fundamentales en la combinación de datos tan dispares como NOAA AVHRR y

SPOT.

En este trabajo vamos a considerar el problema de la combinación de datos de muy alta resolución espacial (LANDSAT o SPOT) con datos NOAA de baja resolución espacial a través de un tratamiento riguroso, que permite lograr una auténtica "integración" de ambos tipos de datos. Para ello hay que resolver dos problemas fundamentales: el registrado geométrico de las imágenes y la degradación de información de la imagen de alta resolución a baja resolución, para integrar ambas resoluciones de modo efectivo.

Aunque las aplicaciones presentadas se han realizado a partir de imágenes SPOT, casi todo lo expuesto se aplicaría idénticamente a imágenes LANDSAT.

2. REGISTRADO GEOMÉTRICO DE IMÁGENES DE MUY DIFERENTE RESOLUCIÓN ESPACIAL

En el caso de que los datos en alta resolución espacial correspondiesen al satélite LANDSAT (sensor TM), el problema es bastante más simple debido a la observación vertical, lo que permite abordar la corrección geométrica de imágenes LANDSAT mediante las técnicas clásicas de transformación polinómica definida a partir de puntos de control. En el caso de datos del satélite SPOT, el problema puede complicarse notablemente si la observación es lateral (SPOT IMAGE, 1988). La Figura 1 muestra el caso extremo correspondiente a la máxima separación angular con la que NOAA y SPOT pueden observar un área geográfica determinada. Aunque dicho caso extremo suele darse muy rara vez en la práctica, los efectos angulares en la combinación SPOT-NOAA juegan un papel importante en la mayoría de las situaciones que realmente se presentan. Con el fin de tener en cuenta tales distorsiones angulares, el problema de la corrección geométrica es abordado mediante modelos orbitales para ambos satélites, NOAA y SPOT (Moreno et al., 1990a).

En el caso del satélite SPOT, el modelo orbital utilizado fue desarrollado en el contexto de aplicaciones de datos SPOT en la elaboración de inventarios agrícolas (Moreno et al., 1988), y es rutinariamente utilizado en la corrección de imágenes SPOT en otras aplicaciones. La precisión lograda mediante el uso de este modelo orbital es comparable a la lograda mediante técnicas clásicas de aproximaciones polinómicas, sobre todo en zonas pequeñas (si bien a nivel de escena completa sólo un modelo orbital permite una adecuada descripción de la transformación geométrica). Las ventajas que presenta el modelo orbital vienen dadas por la necesidad de un número muy pequeño de puntos de control, y la posibilidad de utilizar modelos digitales de terreno en zonas montañosas en las que los modelos de transformación polinómica no son capaces de describir los efectos altamente no lineales provocados por la forma de la estructura observada. En el caso del satélite NOAA, el modelo de corrección geométrica desarrollado inicialmente para la corrección sistemática de datos AVHRR (Moreno et al., 1990a) ha sido mejorado notablemente con el fin de permitir la combinación de imágenes NOAA con imágenes SPOT (Moreno et al.,

1992b).

Hay que tener en cuenta que cuando se pretenden combinar datos NOAA con datos SPOT (o LANDSAT), la precisión en la corrección geométrica de las imágenes NOAA debería ser teóricamente enorme (del orden de 1/50 píxel, al menos). Un error de un píxel en NOAA AVHRR son muchos píxeles de error en la imagen SPOT correspondiente. Si bien los límites nominales de error requeridos no pueden alcanzarse en la práctica (debidos a efectos de alta frecuencia en los cambios de ángulos de actitud y desajustes internos del sensor), un objetivo de este tipo requiere un cuidadoso tratamiento de la corrección geométrica de los datos NOAA AVHRR (Schwalb, 1978).

Una descripción detallada del modelo de corrección "de precisión" para datos AVHRR puede hallarse en Moreno & Meliá, 1992b, por lo que señalaremos simplemente los aspectos más relevantes del modelo orbital desarrollado.

En primer lugar, la información orbital disponible a partir de datos de telemetría (esencialmente, el mensaje TBUS) nos permite extrapolar la órbita desde un instante de referencia (que actualmente suele ser horas antes del tiempo de imagen) hasta el tiempo exacto en el que la imagen fue adquirida (Brunel et al., 1989; Kloster, 1989). Dada la precisión requerida, en lugar de utilizar los elementos orbitales directamente resultantes de la extrapolación, en nuestro algoritmo utilizamos un método de aproximaciones sucesivas basado en puntos de control que permite reajustar tales elementos orbitales mediante un procedimiento iterativo consistente en calcular por diferentes métodos un parámetro de control hasta que los diferentes valores de dicho parámetro calculados por diferentes métodos coinciden. Tal parámetro de control utilizado es la distancia del satélite al centro terrestre, la cual es calculada por dos métodos diferentes para cada punto de control.

Bastan unas 5 iteraciones para hacer converger todos los elementos orbitales. Las variaciones son pequeñas pero significativas. La convergencia se logra rápidamente porque los parámetros iniciales considerados son ya bastante precisos, dada la actual precisión del mensaje TBUS (considerablemente superior a la anterior) y su mayor frecuencia temporal actual (diaria) (Brunel et al., 1989).

Las variaciones sufridas por cada elemento orbital tras el procedimiento iterativo de reajuste mediante puntos de control son realmente mínimas, pero suficientes para corregir errores de unos pocos píxeles, que se tendrían de utilizar los elementos orbitales directamente extrapolados de los datos de efemérides, sobre todo debido a los desajustes entre el tiempo del satélite (con el que se determina el número de línea) y el tiempo de la estación de recepción (con el que se determina la trayectoria orbital). Los efectos son importantes debido a que una pequeña variación angular se traduce, a la altura del satélite sobre la superficie terrestre, en variaciones de unos cuantos píxeles en la imagen resultante.

Una vez que la trayectoria orbital es supuestamente conocida con precisión, hay que determinar la dirección hacia la que apunta el sensor, relacionada con los ángulos de actitud del satélite. La dirección nominal de visión instantánea (ha-

cia del nadir) no coincide con la dirección del centro terrestre, ni tampoco es perpendicular al vector velocidad instantánea del satélite, como se considera en ocasiones, sino que varía con la posición del satélite de modo más complicado (los detalles del cálculo se dan en Moreno & Meliá, 1992b).

Además, es preciso conocer el sistema de barrido del sensor AVHRR. La proyección en el suelo de cada línea de imagen no es una recta perpendicular a la dirección del movimiento, como se considera en ocasiones. El cálculo detallado permite caracterizar el carácter no lineal del barrido, si bien es cierto que el efecto es muy pequeño (unos 400 metros sobre los casi 3000 Km de barrido de este sensor).

Otro aspecto importante es la modelización de los ángulos de actitud y su variación con respecto a los valores nominales (Goel et al., 1989). Sin entrar en detalles, éstos pueden ser calculados para cada punto de control, resultando que en el tiempo de escena (4 minutos) estos ángulos (en torno a los tres ejes de referencia) no sólo no son estrictamente cero, sino que varían con el tiempo, de acuerdo con una ley que queda bien modelizada como un polinomio de grado 2 en la variable temporal. La corrección de ángulos de actitud permite eliminar hasta las menores distorsiones internas en la imagen AVHRR, lográndose una corrección precisa sobre toda la escena completa, incluyendo los bordes de imagen.

El error en número de línea y píxel resultante cuando se consideran los elementos orbitales directamente extrapolados de los datos de efemérides es del orden de varios píxeles. El error resultante cuando se corrige la órbita (pero sin introducir correcciones de actitud) se reduce al rango ± 2 líneas/píxeles. Cuando se introducen correcciones de actitud, el error resultante es siempre inferior a un píxel. Es decir, la corrección de elementos orbitales es la que lleva el error al rango de más/menos uno o dos píxeles, mientras la corrección de actitud reduce el error al nivel de precisión subpíxel (reduciendo la varianza de la distribución de errores resultantes).

El método puede aplicarse tanto a nivel de escena completa, como a nivel de pequeñas zonas geográficas. Es muy notable el efecto de la corrección sobre las zonas de borde de imagen.

En el caso de imágenes captadas en órbitas ascendentes, hay que tener en cuenta que la imagen es originalmente captada en disposición inversa, por lo que caso de que en los datos proporcionados por los centros de recepción se haya alterado la disposición original de la imagen, ésta debe devolverse a su disposición original para poder aplicar un modelo orbital de corrección. Esto es lo que sucede con las imágenes proporcionadas en formato SHARP de la base de datos de ESA, generalmente procedentes de Maspalomas en nuestro caso. En tal formato, con el fin de facilitar una simple y directa visualización, las escenas se orientan siempre de oeste a este y de norte a sur. En el caso de órbitas ascendentes, tal disposición corresponde a la inversión completa (en filas y columnas) de la imagen tal y como es captada originalmente por el satélite.

En cuanto al tiempo de cálculo, el programa principal de

corrección geométrica tarda unos 2 minutos (en reloj del usuario) para producir una imagen 1024x1024 como salida a partir de la escena completa original, si la proyección empleada es simplemente latitud-longitud y el método de interpolación es vecino más próximo. Si la imagen ha de ser proyectada de modo más complejo (como la proyección UTM), y si el método de interpolación es convolución cúbica, entonces el tiempo de cálculo es de unos 5 minutos para producir una imagen 1024x1024 geoméricamente corregida. El programa funciona en un IBM 9000/500 VF operando bajo VM/XA, y el resultado se envía a través de red Ethernet (TCP/IP) al sistema de tratamiento de imágenes, donde es visualizado. Dados estos tiempos de cálculo, este tipo de técnicas aparentemente tan complejas resultan completamente operativas. Por supuesto, esto es así siempre que se utilicen ordenadores suficientemente potentes. En un Macintosh IIci, el tiempo de cálculo está en un mínimo de 8-10 horas para la corrección geométrica por este método, y un tiempo similar se requiere en un PC386. Dados los condicionantes derivados de los tiempos de acceso a disco en el caso de no disponibilidad de suficiente memoria en el ordenador para acomodar la escena completa original y los datos necesarios, tal tipo de algoritmos no parecen adecuados para ordenadores personales, resultando realmente efectivos en el caso de ordenadores con suficiente memoria de trabajo y muy alta velocidad de proceso.

3. "INTEGRACIÓN ESPACIAL" DE LOS DATOS DE ALTA RESOLUCIÓN PARA SU COMBINACIÓN CON LOS DATOS EN BAJA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Como ya se indicó anteriormente, además de la corrección geométrica de ambas imágenes de alta y baja resolución, es necesario disponer de un método que permita integrar la información en alta resolución con la de baja resolución, a través de una degradación espacial de la imagen de alta resolución. Tal degradación ha de tener en cuenta las características geométricas de los datos en baja resolución con los que tal información pretende ser integrada. Para ello, es preciso conocer la geometría de los píxeles NOAA AVHRR.

Es sabido como la geometría de tales píxeles cambia notablemente cuando nos hallamos en zonas próximas al nadir o cuando nos vamos al borde extremo de la imagen. Las líneas son adyacentes al nadir, pero se solapan para ángulos de visión oblicuos, mientras que los píxeles se solapan a lo largo de toda la línea de barrido. Ello es debido a que sólo una fracción del campo de visión es muestreada (dado que la frecuencia de digitalización de la señal no coincide con el tamaño del campo de visión). El efecto de solapamiento es incluso importante en el nadir, y hace que incluso en el nadir el píxel sea rectangular, y sólo para los píxeles en torno al 500 y al 1550 la forma del píxel en el suelo corresponde, aproximadamente a un cuadrado.

Es importante distinguir entre el campo de visión y el tamaño aparente del píxel. En los bordes de imagen, el área dentro del campo de visión es 2,3 veces mayor que el área

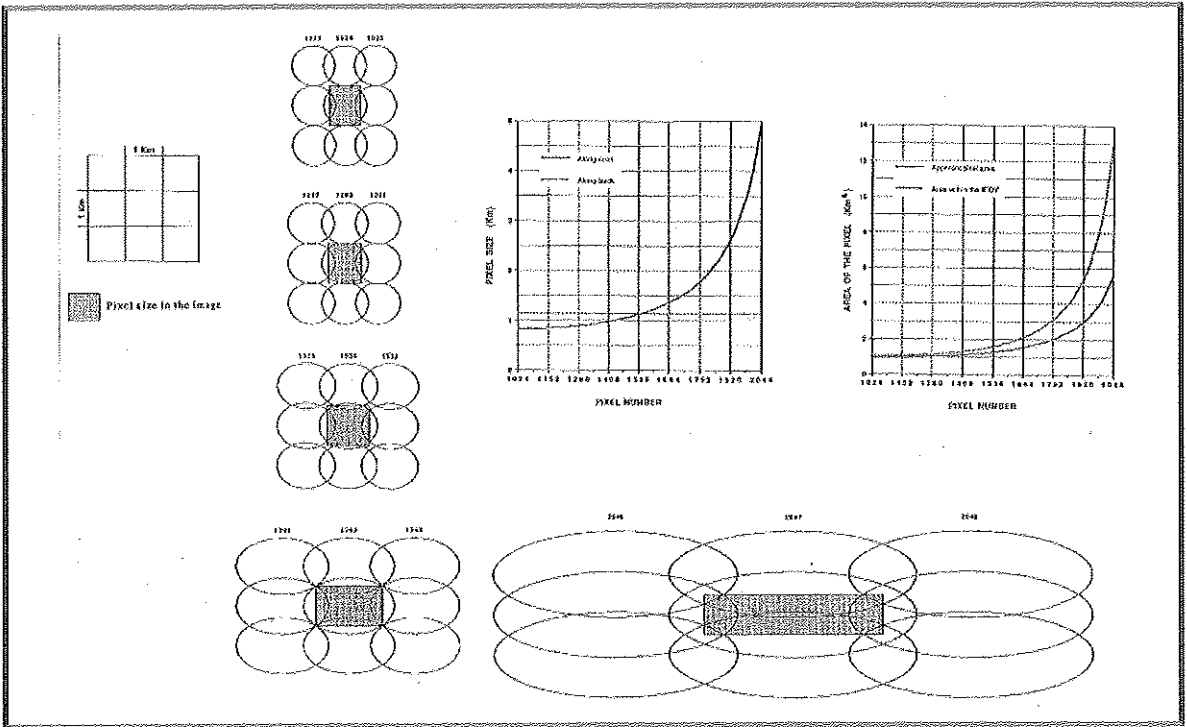


Figura 2.- Descripción geométrica de los píxeles AVHRR. La figura muestra la proyección en el suelo del campo instantáneo de visión (IFOV) para nueve píxeles adyacentes, desde el nadir hasta el borde extremo de la escena, a intervalos regulares de 256 píxeles (la escala espacial permite apreciar la variación del tamaño y la forma de los píxeles). También se indican la variación del tamaño del píxel con el ángulo de visión, y la variación del área aparente del píxel y el área dentro del campo de visión (IFOV) con el número de píxel (ángulo de visión).

aparente del píxel.

El diagrama de la Figura 2 (tomado de Moreno et al., 1992a) corresponde a la disposición nominal de los píxeles. En la práctica, debido a la trayectoria en tierra del barrido y la combinación con el giro terrestre, estas figuras se distorsionan ligeramente. Además, hay que tener en cuenta que el sistema de barrido del AVHRR rota el campo de visión a medida que se aleja del nadir, con lo que la geometría exacta de los píxeles es aún mucho más complicada.

El nivel de detalle del modelo orbital desarrollado permite conocer la dirección particular de observación de cada punto, con lo que resulta posible una modelización bastante detallada de la geometría real de los píxeles en cada imagen particular considerada.

En concreto, el modelo orbital ha sido desarrollado de tal modo que permite conocer el ángulo formado entre la dirección de visión de un punto cualquiera, y la dirección de visión del centro del píxel AVHRR correspondiente, teniendo en cuenta los efectos locales en la geometría de cada píxel. De este modo, podemos determinar para cada punto en alta resolución los ángulos relativos a la dirección de barrido y a la dirección de movimiento orbital, con respecto a la dirección de visión del centro de cada píxel.

La parametrización de la contribución de cada elemento

de alta resolución a los píxeles AVHRR se hace en función de estos ángulos, con el fin de poder considerar los efectos antes mencionados.

En definitiva, lo que pretendemos es la degradación espacial de la imagen de alta resolución (Justice et al., 1989) para su comparación directa con una imagen de baja resolución. El problema es muy complejo si se pretende analizar de modo detallado. Esencialmente se trata de "promediar" los valores de la imagen de alta resolución, con una función de peso adecuada, para simular los valores en baja resolución (Rambal et al., 1990). Esta función de modulación de la respuesta espacial del sensor es muy difícil de determinar, y depende además del ángulo de visión. El máximo está en la dirección de visión del centro del píxel, y como modelo funcional hemos adoptado un pulso gaussiano bidimensional, con anchura determinada por el semicampo de visión instantáneo angular. Con el fin de dar cuenta de los efectos de solapamiento, por cada píxel de alta resolución se calcula la contribución sobre una ventana de 3x3 píxeles AVHRR, con lo que pueden simularse efectos de solapamiento incluso en las zonas de borde de imagen (Moreno et al., 1992a). Además, las variaciones de tamaño y forma del píxel AVHRR con el ángulo de visión son ya adecuadamente descritas por el modelo orbital.

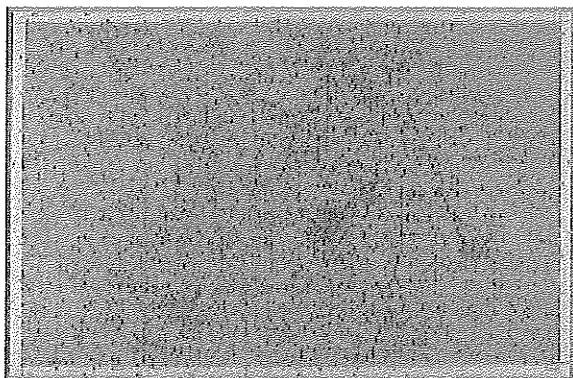


Imagen 1.- a) Mapa de valores de índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado a partir de datos SPOT XS en alta resolución espacial, correspondiente a la hoja 747-I del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25000. Véase Anexo de color.

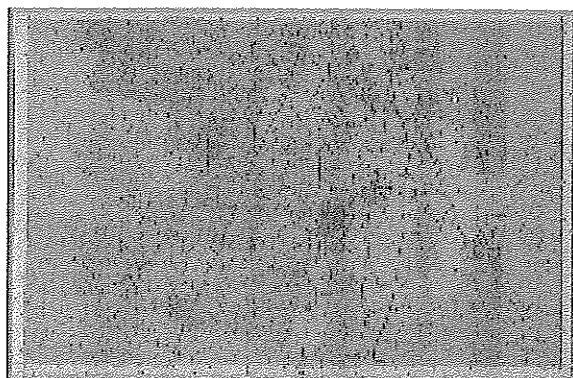


Imagen 1.- b) Mapa de valores de índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado a partir de datos NOAA AVHRR en baja resolución espacial, correspondiente a la misma hoja 747-I del Mapa Topográfico Nacional. Véase Anexo de color.

4. APLICACIONES

La integración de datos tan diferentes como SPOT HRV y NOAA AVHRR proporciona nuevas herramientas de trabajo en estudios multiescala espacial-temporal y en la modelización de fenómenos utilizando como inputs datos de teledetección procedentes de diferentes satélites. Diversas aplicaciones han sido desarrolladas utilizando este tipo de técnicas.

La Imagen 1 muestra un ejemplo de un mapa de índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado a partir de una imagen SPOT (1a) y una imagen NOAA (1b) para la misma zona geográfica. El patrón dominante de las estructuras llega a identificarse -y coincide- en ambas imágenes, aun a pesar de la enorme diferencia de resolución espacial. En el caso de la imagen SPOT llegan a identificarse todos los detalles con gran precisión, mientras en la imagen NOAA sólo se aprecian las grandes estructuras dominantes.

Otro aspecto interesante es la simulación (artificial, pero realista) de imágenes AVHRR a partir de imágenes SPOT. La ventaja de las técnicas de simulación es que permiten estudiar efectos que no pueden considerarse aisladamente en el caso de trabajar con imágenes reales, tales como la comparación de imágenes AVHRR para una visión próxima al nadir y para una visión justo en el borde de la imagen de la misma zona geográfica, lo cual es imposible en una misma imagen AVHRR real.

De este modo se pueden hacer también análisis de correlación entre imágenes de diferente resolución, los cuales, además de permitir caracterizar cuantitativamente la precisión del registrado geométrico (Cracknell et al., 1989), permiten también análisis teóricos acerca de la pérdida de información en los datos de baja resolución con relación a la información proporcionada por los datos de alta resolución.

Este mismo tipo de técnicas ha sido utilizado para producir mapas de temperatura, como el indicado en la Imagen 1 c. Además de que con esta presentación es posible conocer con detalle el campo de temperaturas en la zona geográfica

de interés, esta imagen puede ser combinada con los datos SPOT para incorporar ambos datos en modelos agroclimáticos que necesiten las dos informaciones: temperatura e índice de vegetación.

5. DISCUSION

La utilidad de este tipo de métodos de combinación de datos de muy diferente resolución espacial puede comprenderse fácilmente cuando se considera la incorporación de resultados de clasificación en usos del suelo o cubiertas vegetales, u otro tipo de datos, en alta resolución espacial, derivados a partir de datos LANDSAT o SPOT, con el fin de determinar parámetros efectivos para ser utilizados como inputs en modelos basados sistemáticamente en datos AVHRR. La necesidad de conocer ciertos parámetros, como la temperatura a cierta hora del día o el índice de vegetación con alta frecuencia temporal, nos obliga a utilizar datos AVHRR. Sin embargo, para determinar parámetros "efectivos" a la escala del píxel AVHRR, para corrección o reinterpretación de los datos AVHRR, debemos utilizar datos en alta resolución, dada la dificultad en relacionar medidas de suelo o determinaciones de laboratorio (generalmente asociadas a un determinado tipo de suelo o vegetación) con la heterogeneidad de los elementos dentro de un píxel tan grande como el píxel AVHRR.

Este tipo de modelos geométricos detallados son siempre necesarios en estudios donde se necesita combinar información procedente de fuentes de muy diferente resolución espacial, tanto para lograr un óptimo registrado de las imágenes como para una adecuada degradación espacial de los datos en alta resolución. Las dependencias angulares (debidas fundamentalmente a los ángulos de visión) han de ser tenidas en cuenta, especialmente en el caso de datos AVHRR. La simple degradación espacial mediante promediado espacial de bloques de píxeles correspondientes a la resolución nominal del sensor (1,1 x 1,1 km), sin tener en cuenta la ge-

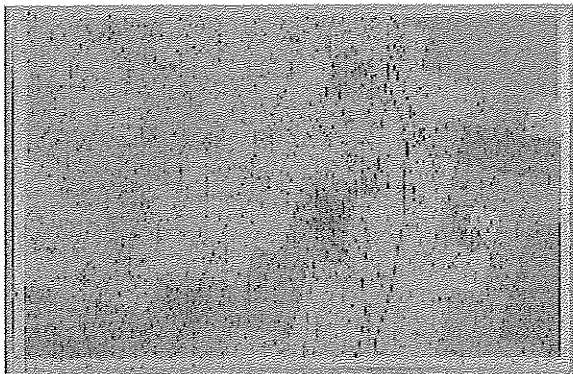


Imagen 1.- c) Mapa de temperaturas construido a partir de datos NOAA AVHRR para la misma zona geográfica de las figuras a y b. Cada color representa un intervalo de temperaturas de medio grado centígrado, variando desde el azul (más frío) hasta el rojo (más cálido). Véase Anexo de color.

ometría de observación (utilizada por Quarmby et al., 1989; Flitcroft et al., 1990, y otros estudios similares), obliga a considerar solamente la franja central de la imagen más próxima al nadir, siendo completamente inadecuada para zonas alejadas del nadir.

Es preciso señalar que todos estos algoritmos han sido desarrollados en el contexto del experimento EFEDA (un experimento donde se intentan conjugar medidas en suelo, desde avión y desde el satélite para modelizar efectos climáticos en una región mediterránea con efectos de amenaza de desertificación). En el caso de un experimento piloto, como EFEDA, no tiene sentido aplicar métodos o algoritmos simplificados, sino que se requiere un procesamiento de los datos lo más preciso posible. Lo que hemos intentado ha sido desarrollar algoritmos precisos, e implementarlos de modo que también puedan ser utilizados en el procesamiento rutinario operacional de datos, para que sigan siendo útiles después del experimento piloto. En definitiva, lo que es evidente es que con el uso de ordenadores suficientemente potentes es posible desarrollar métodos de precisión en un tiempo de cálculo razonable, con lo que en muchos casos no se justifica el empleo de modelos de corrección de datos excesivamente simplificados.

Por otro lado, este tipo de experimentos, como EFEDA, suelen presentar el problema de la conexión de medidas realizadas en el suelo, a una escala local, con datos de satélite de baja resolución espacial, especialmente NOAA AVHRR. La comparación de las medidas de suelo con datos de satélite de alta resolución, y la integración de los datos de satélite en alta resolución con los correspondientes en baja resolución es el único camino viable para integrar las medidas de suelo con los datos de satélite de baja resolución. En tales casos, la metodología aquí presentada resulta muy apropiada.

Si bien este tipo de técnicas parecen tener un interés fundamental en estudios de modelización de fenómenos o en estudios de simulación de carácter más teórico, también tienen una utilidad práctica en aplicaciones concretas donde se

requieran combinar ambos tipos de información en alta y baja resolución de un modo realmente efectivo.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por la CICYT, Proyecto ESP89-0436, así como por la Comisión de las Comunidades Europeas (Proyecto EPOC-CT90-0030-LNBE), dentro del marco del experimento EFEDA. Deseamos expresar nuestro agradecimiento a los responsables del Centro de Informática de la Universidad de Valencia por las facilidades puestas a nuestra disposición para la realización de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BRUNEL, P. & MARSOUIN, A. (1989): "Navigation of AVHRR images using ARGOS or TBUS orbital elements", *Proceedings of the 4th AVHRR Data Users Meeting*, Rothenburg, F.R. Germany, September 1989, EUMETSAT EUM P 06, pp. 11-15.
- ✓ CRACKNELL, A.P. & PAITHOONWATTANAKIJ, K. (1989): "Pixel and sub-pixel accuracy in geometrical correction of AVHRR imagery", *Int. J. Remote Sensing*, vol.10, pp.661-667.
- ✓ DUGGIN, M.J.; PIWINSKI, D.; WHITEHEAD, V. & RYLAND, G. (1982): "Evaluation of NOAA AVHRR for crop assessment", *Applied Optics*, vol. 21, pp.1873.
- ✓ FLITCROFT, I.D. & KANEMASU, E.T. (1990): "A comparison of SPOT and AVHRR derived vegetation indices over a tall grass prairie", in *Remote Sensing for Agriculture, Beltsville Symposium XV*, NASA Goddard Space Flight Center, May 16-18, 1990, pp. 39.
- ✓ FRAYSSE, G. (1981): "Remote sensing agroclimatological methods", in *Application of Remote Sensing to Agricultural Production Forecasting*, Ed. A. Berg, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 181-192.
- ✓ GOEL, P.S.; VENKAT RAO, M. & CHANDRA, K.S. (1989): "Attitude control system specifications for a remote sensing satellite", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1531-1537.
- ✓ JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; HOLBEN, B.N. & TUCKER, C.J. (1985): "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 6, pp. 1271-1318.
- ✓ JUSTICE, C.O.; MARKHAM, B.L.; TOWNSHEND, J.R.G. & KENNARD, R.L. (1989): "Spatial degradation of satellite data", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1539-1561.
- ✓ KLOSTER, K. (1989): "Using TBUS orbital elements for AVHRR image gridding", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, pp. 653-659.
- ✓ MORENO, J. y GANDIA, S. (1988): "The influence of the high spatial resolution of SPOT HRV data on the separability of spectral classes", *Proceedings of the IGARSS'88 Symposium*, Edinburgh, Scotland, September 1988, ESA SP-284 (IEEE 88CH2497-6), pp. 597.
- ✓ MORENO, J.; GANDIA, S. y MELIA, J. (1990a): "Interés físico de la corrección geométrica de imágenes de satélite mediante modelos orbitales", *III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Madrid, 17-19 Octubre 1989, ed. Instituto Tecnológico Geominero de España-Asociación Española de Teledetección, Madrid, pp. 229-236.
- ✓ MORENO, J.; GANDIA, S. y MELIA, J. (1990b): "Comparing vegetation indices from high and low spatial resolution satellite data", in *Remote Sensing for Agriculture, Beltsville Symposium XV*, NASA Goddard Space Flight Center, May 16-18, 1990, pp.41.
- ✓ MORENO, J.; GANDIA, S. y MELIA, J. (1992a): "Geometric integration of NOAA AVHRR and SPOT data: low resolution effective parameters from high resolution data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, en prensa.
- ✓ MORENO, J. y MELIA, J. (1992b): "A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, aceptado.
- ✓ OLSSON, L., (1986): "Approaches to monitoring renewable resources using remote sensing and geographical information system", in *Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, Proceeding of the 7th ISPRS International Symposium*, Enschede, Netherlands, August 1986, vol. 26/7/3, pp. 1041-1050.
- ✓ QUARMBY, N.A.; TOBIN, A.; TOWNSHEND, J.R.G.; SING, S.M.; MILNES, M. & SILLEOS, N. (1989): "Crop production and Yield Monitoring", in *Remote Sensing for Operational Applications*, *Proceedings of the 15th. Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Bristol, U.K., September 1989, pp. 345-350.
- ✓ RAMBAL, S.; LACAZE, B. & WINKEL, T. (1990): "Testing an area-weighted model for albedo or surface temperature of mixed pixels in Mediterranean woodlands", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 11, pp. 1495-1499, 1990.
- ✓ SCHWALB, A. (1978): *The TIROS-N/NOAA A-G satellite series*. NOAA Technical Memorandum NESS 95, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, U.S.A.
- ✓ SPOT IMAGE (1988): *SPOT User's Handbook*, Toulouse.
- ✓ TUCKER, C.J.; HIELKEMA, J.U. & ROFFEY, J. (1985): "The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and forecasting desert-locust activity", *Int. J. Remote Sensing*, vol.6, pp. 127-138.