

## Técnicas de correlación cruzada en el registrado de imágenes de diferente resolución espacial

M.M. Artigao<sup>(1)</sup>, E. Rubio<sup>(2)</sup>, S. Díez<sup>(3)</sup>, V. Caselles<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>Dep. Física Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete. Mariamar.Artigao@uclm.es

<sup>(2)</sup>I.D.R., Universidad de Castilla-La Mancha, Avda España s/n, 02071, Albacete

<sup>(3)</sup>Dep. de Óptica, Universidad de Valencia, Dr. Moliner, 50, Burjassot 46100, Valencia

<sup>(4)</sup>Dep. de Termodinámica, Universidad de Valencia, Dr. Moliner, 50, Burjassot 46100, Valencia

### Resumen

La superposición de imágenes adquiere gran importancia cuando se integran imágenes de distintos sensores y resolución espacial en el desarrollo de un modelo físico concreto. Las técnicas de correlación se han revelado como herramientas útiles en la identificación automática de puntos de control o subescenas entre imágenes de la misma resolución espacial. En este trabajo se presenta una aproximación original que permite mejorar el registrado entre imágenes con distinta resolución espacial (e.g. Landsat-TM y NOAA-AVHRR) basada en técnicas de correlación espacial. Para llevar a cabo la operación de correlación se han utilizado dos filtros distintos: un filtro adaptado clásico y un filtro de Wiener, seleccionando éste último como filtro óptimo debido a su alta capacidad de discriminación y su baja sensibilidad al ruido.

### 1. Introducción

Uno de los principales problemas que aparecen en teledetección es la integración de datos a partir de imágenes de distinta resolución espacial. Esto ocurre, por ejemplo, en el cálculo de magnitudes secundarias en las que intervienen datos de distintas regiones del espectro electromagnético (e.g. TIR y VIS/NIR), los cuales suelen presentar distinta resolución espacial [1]. O bien en estudios multiescala cuando se desea comparar resultados similares obtenidos a diferente escala. En estos casos es necesario que las imágenes a tratar se superpongan de la forma más fiable posible.

El problema de la superposición de imágenes de alta y baja resolución abarca dos vertientes: por un lado la eliminación de distorsiones y desplazamientos relativos entre ambas imágenes y por otro lado la degradación espacial, para lo cual existen diversos algoritmos [2], [3], [4]. En este trabajo se presenta un método para superponer imágenes de alta y baja resolución aplicando técnicas de correlación. Dichas técnicas tienen un amplio campo de aplicación en el procesado de imágenes. Por ejemplo, la operación de correlación se puede utilizar para identificar una imagen dentro de otra de mayor tamaño, de forma que el pico de correlación más alto sitúa espacialmente la ventana que se quiere identificar. La autocorrelación se usa habitualmente para restaurar imágenes, eliminando el ruido con algún tipo de filtro como el filtro de Wiener. Por último, se usan algoritmos de detección de puntos de control, basados en correlaciones entre imágenes para efectuar correcciones geométricas [5].

### 2. Metodología

Para este trabajo se ha seleccionado una imagen de un sensor de baja resolución espacial como es NOAA 11-AVHRR (1km×1km) y como imagen de alta resolución espacial, una imagen de Landsat5-TM (30m×30m). A partir de las bandas en el visible e infrarrojo próximo de ambos instrumentos se han calculado sendas imágenes de un índice normalizado (IN) que son las utilizadas en la superposición.

La metodología que aquí se presenta con un ejemplo de aplicación, comprende las siguientes etapas: una primera de georreferenciación por

separado de las dos imágenes Landsat y NOAA y la identificación de la zona a superponer, una ventana de  $10 \times 10 \text{ km}^2$  de Tomelloso (Ciudad Real). La georreferenciación de la imagen NOAA presenta una mayor incertidumbre sobre todo en una zona del interior de la Península como la seleccionada. Por este motivo, en una segunda etapa se procede a corregir esta última con respecto a la primera y así eliminar distorsiones y desplazamientos. Este corregido se efectúa a partir de puntos de control y por ello es muy conveniente degradar la imagen Landsat, según se explica más adelante, a  $1 \times 1 \text{ km}^2$  con el fin de obtener una imagen que simule la observación a la resolución de NOAA y que permita obtener puntos fácilmente identificables en las dos imágenes. Finalmente, se procede a identificar la imagen NOAA que mejor se superpone con la imagen Landsat mediante la aplicación de dos filtros distintos para el cálculo de las correlaciones cruzadas: un filtro adaptado y un filtro de Wiener.

### 2.1. Degradación de la imagen Landsat

En principio, para llevar a cabo la degradación espacial de una imagen se deben conocer las funciones de transferencia que definen las propiedades de resolución espacial de dicha imagen y sus componentes; esto es, la PSF (Point Spread Function) y la MTF (Modulate Transfer Function). A partir de la PSF, se pueden obtener los filtros de transferencia que permitan la reconstrucción de la imagen a la escala deseada [6], [7]. Debido a que la respuesta espacial del sensor se puede asimilar a un pulso gaussiano, algunos autores [8] proponen para la simulación de imágenes a baja resolución a partir de imágenes de alta resolución un filtro gaussiano, ya que éste proporciona el valor más alto de correlación entre los datos simulados y los valores reales de baja resolución. Por otra parte, [9] y [6] proponen utilizar un simple promedio, ya que es más fácil de implementar que un filtro gaussiano y conduce a resultados sustancialmente similares. Esta última conclusión es la que nos ha llevado a utilizar un promedio adecuado, sobre ventanas de  $36 \times 36$  píxeles, para remuestrear la imagen Landsat.

Al promediar los valores de los píxeles que conforman la imagen Landsat en ventanas, necesariamente debemos tomar un origen, el cual determina qué píxeles Landsat deben aparecer en una ventana y cuales en otra. Y por consiguiente, dependiendo del origen que se suponga al promediar la imagen simulada que resulte presentará una apariencia u otra. Con el fin de valorar este efecto primero en el corregido, pero también en la superposición, se han calculado cuatro promedios distintos resultado de definir en cada caso un origen diferente para las ventanas de  $36 \times 36$ . Los orígenes en número de filas y columnas para cada uno de estos promedios son: (0,0), (18,18), (18,0) y (0,18).

### 2.2. Corregido entre Landsat y NOAA

En esta fase se ha corregido la imagen NOAA respecto a la Landsat teniendo en cuenta el efecto de la degradación de esta última. Este efecto, en conjunto no significativo, hace que la apariencia píxel a píxel varíe de una a otra degradación. Por este motivo para cada una de las cuatro degradaciones de la imagen Landsat se ha efectuado un corregido de la imagen NOAA mediante la toma de puntos de control entre imágenes.

### 2.3. Cálculo de correlaciones cruzadas

El cálculo de la correlación cruzada entre cada uno de las cuatro imágenes NOAA corregidas y la imagen Landsat original (sin degradar), nos permitirá decidir qué imagen NOAA, de las cuatro corregidas, se “asemeja” más a la imagen Landsat original. Para ello, primero se calcula la autocorrelación de la imagen Landsat original (con lo cual su pico de correlación será máximo) y una posterior correlación entre la imagen original y las cuatro imágenes corregidas, de forma que aquella que tenga un pico de correlación más alto será la que más se parecerá a la imagen Landsat no degradada. Además la posición del pico nos dará el desplazamiento entre imágenes en número de píxeles Landsat.

#### 2.3.1. Correlación y autocorrelación

La correlación es el parámetro tradicionalmente utilizado para la detección de

objetos, ya que, bajo ciertas restricciones, el valor de la correlación en el origen de un objeto consigo mismo (autocorrelación) es mayor que el de la correlación con cualquier otro objeto [10]. Para el caso discreto, la correlación entre una imagen  $f(x,y)$  y una señal a detectar  $s(x,y)$ , de tamaño  $M \times N$  viene dado por [11]

$$c(m,n) = \sum_x \sum_y f(x,y) s^*(x-m, y-n) \quad (1)$$

donde  $m = 0 \dots M$  y  $n = 0 \dots N-1$  y (\*) significa complejo conjugado.

En el caso de imágenes de gran tamaño, es conveniente efectuar esta operación en el dominio de frecuencias a través de la transformada de Fourier, utilizando como punto de partida el teorema de correlación [10], de forma que se puede comprobar que la operación de correlación se reduce a la multiplicación de las transformadas de Fourier de cada una de las imágenes a comparar.

El cálculo de las transformadas se puede simplificar utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) [11]. Así, el procedimiento del cálculo digital de correlación entre dos imágenes se reduce a calcular la transformada de Fourier (TF) de cada una de ellas, multiplicarlas y, finalmente, calcular la TF inversa. El proceso anterior se puede contemplar como un filtrado espacial de la transformada de Fourier que modifica cada una de las fases espaciales  $(u,v)$  de la transformada de Fourier de la imagen  $(F(u,v))$ . La máscara que produce el filtrado, es compleja, por lo que, en general, modifica la amplitud y la fase de la transformada de Fourier de la imagen de entrada. Esta máscara es lo que se denomina función de transferencia,  $H(u,v)$ . Si se aplica el filtro  $H(u,v)$  a una señal  $f(x,y)$ , el resultado es la correlación entre las funciones  $f(x,y)$  y  $s(x,y)$ . Por lo tanto, si la señal que intentamos detectar es aquella a la que está adaptado el filtro, el resultado será la autocorrelación de dicha señal.

El inconveniente que presenta el filtro adaptado es su baja capacidad de discriminación [12], por lo que, en ocasiones, resulta más adecuado utilizar como máscara una modificación

de dicho filtro. En este trabajo hemos optado por utilizar un filtro de Wiener, debido a que proporciona una buena discriminación a la vez que presenta poca sensibilidad al ruido. Dicho filtro se define como ([11], [13])

$$H_w(u,v) = \frac{H_{\text{adaptado}}(u,v)}{|H_{\text{adaptado}}(u,v)|^2 + \gamma} \quad (2)$$

siendo  $\gamma$  un parámetro definido de forma que cuando  $\gamma \rightarrow 0$ , se obtiene un filtro inverso, muy discriminante pero con alta sensibilidad al ruido, mientras que cuando  $\gamma \rightarrow \infty$  se obtiene el filtro adaptado. En este trabajo se ha tomado  $\gamma = 10^{-3}$  en el cálculo de las correlaciones, ya que se ha comprobado en aplicaciones similares que proporciona resultados óptimos [12].

### 3. Resultados

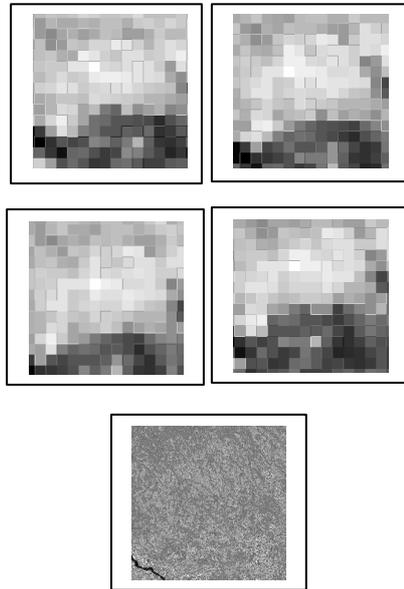
Aplicando esta metodología y calculando la correlación cruzada se ha generado e identificado la imagen NOAA corregistrada respecto a la imagen Landsat que presenta un ajuste óptimo no sólo en relación a la imagen Landsat original sino también en relación a la degradación de esta última, lo cual es de especial interés en estudios multiescala. La figura 1 muestra las imágenes NOAA que se han utilizado en el cálculo de las correlaciones, obtenidas según se explica en la sección 2.2, utilizando distintas degradaciones de la imagen Landsat y una interpolación al vecino más próximo, y la imagen Landsat original. En este punto se han utilizado dos tipos de filtros, un filtro adaptado y un filtro de Wiener. La tabla 1 contiene los valores de la autocorrelación de la imagen Landsat y de las distintas correlaciones cruzadas.

Tabla 1: Valores de correlación utilizando el filtro de Wiener

Máximo	Auto corr.	Corr (a)	Corr (b)	Corr (c)	Corr (d)
<i>Filtro adaptado</i>	1,10	1,02	1,02	1,02	1,02
<i>Filtro Wiener (<math>\times 10^{-3}</math>)</i>	40	1,2	1,6	0,9	1,1

Estas cifras muestran en primer lugar la conveniencia de utilizar el filtro de Wiener por su capacidad de discriminación, y en segundo lugar

que la imagen superior derecha de la figura 1 es la que presenta una mayor correlación con respecto a la Landsat. Si bien el valor del máximo del pico de correlación nos indica cuál de las imágenes NOAA presenta una mayor correspondencia con la imagen Landsat, la posición del pico respecto al centro de la imagen nos da el desplazamiento relativo entre ambas imágenes (véase figura 2).

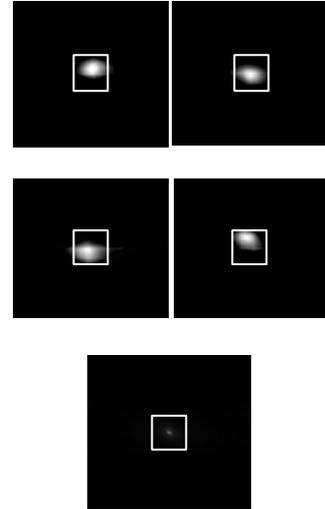


**Figura 1:** Imágenes NOAA y Landsat utilizadas en el proceso de correlación cruzada.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta una metodología para el correjistrado de imágenes de muy diferente resolución espacial que se basa en técnicas de correlación cruzada. Para ilustrar su aplicación se han considerado escenas reales captadas por los sensores Landsat 5-TM y NOAA 11-AVHRR. Primeramente, este método reduce el efecto que el degradado de la imagen de resolución espacial más elevada tiene en el correjistrado, para ello se han considerado hasta cuatro degradados diferentes. La identificación de la imagen correjistrada que mejor correspondencia presenta con la imagen Landsat se efectúa mediante la aplicación de un filtro de

Wiener y el cálculo de las correlaciones cruzadas. Finalmente, se muestra cómo la posición del máximo de intensidad, nos permite afinar aún más en el correjistrado al proporcionarnos el desplazamiento relativo entre ambas imágenes en unidades del píxel de la imagen de mayor resolución espacial.



**Figura 2:** Análisis de la correlación en términos de la intensidad. Las cuatro primeras imágenes corresponden a las correlaciones cruzadas de las imágenes NOAA con la imagen Landsat, mientras que la última corresponde a la autocorrelación de la imagen Landsat.

#### 5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Ref. PAI-03-040 y al proyecto del MCyT, Ref. CGL2004-06099-C03-03/CLI. El trabajo de la Dra. E. Rubio ha sido financiado por el MCyT a través del programa “Ramón y Cajal”.

#### 6. Referencias

- [1] Artigao, M. Desarrollo de un modelo para la estimación de la evapotranspiración en

cultivos de cobertura incompleta: aplicación al viñedo, *Tesis Doctoral*, Universidad de Valencia, 2001

- [2] Moreno, J.F., García, S., Melia, J. "Geometric integration of NOAA-AVHRR and Spot data: Low resolution effective parameters from high resolution data", *IEEE Trans. Geosci Remote Sensing.*, 30(5), 1006-1014, 1992.
- [3] Hay, G.J., Niemann, K.O., Goodenough, D.G., "Spatial thresholds, image objects, and upscaling: a multiscale evaluation", *Remote Sens. Environ.*, 62, 1-19, 1997.
- [4] Justice, C.O., Markham, B.L., Townshend, J.R., Kennard, R.L., "Spatial degradation of satellite data", *Int. J. Remote Sens.*, 10(9), 1539-1561, 1989.
- [5] Wisetphanichkij, S., Dejhan, K., Cheevasuvit, F., Mitatha S., Hanpipatpongsa, S., "An improvement of geometric correlation of satellite image", *19<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing*, 1998.
- [6] Cracknell, A.P., "Synergy in remote sensing- What's in a pixel?", *Int. J. Remote Sens.*, 19(11), 2025-2047, 1998.
- [7] Reichenbach, S.E., Koehler, D.E., Strelow, D.W., "Restoration and reconstruction of AVHRR images", *IEEE Trans. Geosci Remote Sensing.*, 33(4), 997-1007, 1995.
- [8] Moreno, J.F. and Melia, J. "An optimum interpolation method applied to the resampling of NOAA-AVHRR data", *IEEE Trans. Geosci Remote Sensing.*, 32(1), 131-153, 1994.
- [9] Maselli, F., Gilabert, A., Conese, C., "Integration of high and low resolution NDVI data for monitoring vegetation in Mediterranean environments", *Remote Sens. Environ.*, 63, 208-218, 1998.
- [10] Goodman, J.W., *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [11] Gonzalez, R.C., Wintz P., *Digital Image Processing*, Ed. Addison-Wesley, 1997.
- [12] Díez, S. Aportaciones del tratamiento digital de imágenes a la dosimetría en Radioterapia. *Tesis Doctoral*, Universidad de Valencia, 2001.
- [13] Pratt, W.H., *Digital image processing*, J Wiley & Sons, 1991.

