

Incremento de la resolución espacial de imágenes de satélite mediante cokrigeaje

Eulogio Pardo-Igúzquiza⁽¹⁾ y Mario Chica-Olmo⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratorio RSGIS "Teledetección, SIG y Geoestadística". Universidad de Granada / CEAMA. Dpto. Geodinámica. Avda. Fuentenueva s/n, 18071 Granada mchica@ugr.es

Resumen

En Teledetección es habitual disponer de imágenes de la misma región obtenidas por sensores que presentan resoluciones espacial y espectral diferentes. Incluso, también es frecuente que la resolución espacial sea distinta para algunas de las bandas espectrales de la imagen de un sensor (p.e. imágenes multispectrales y pancromáticas suelen tener diferente tamaño de píxel). En estos casos, se plantea un problema interesante, desde el punto de vista del tratamiento digital, referente a la mejora (incremento) de la resolución espacial de las bandas con menor detalle espacial. Existe, en la literatura especializada, un grupo de técnicas orientadas a la resolución de este problema, aunque ninguna de ellas utiliza explícitamente el concepto de variabilidad espacial de los valores radiométricos (variograma), como el método de estimación espacial geoestadística multivariante de *cokrigeaje*. El cokrigeaje ofrece diversas ventajas frente a otras técnicas convencionales, por lo que es una alternativa a considerar respecto de los métodos más clásicos. El objeto de la presente comunicación es hacer una exposición resumida del método y mostrar los resultados obtenidos con un ejemplo de aplicación.

1. Introducción

Es frecuente en teledetección trabajar con imágenes que presentan bandas radiométricas con diferente resolución espacial (píxel). Un ejemplo bien conocido son las imágenes del sensor Thematic Mapper cuya banda del infrarrojo térmico tiene una resolución de 120 m, mientras que el resto de bandas multispectrales la resolución es de 30 m. Igual situación puede plantearse entre diferentes sensores. Un problema práctico que se plantea con cierta frecuencia es incrementar la resolución espacial de la imagen (o banda) de baja resolución, manteniendo su calidad espectral; esto es, sin introducir detalles ajenos a dicha banda espectral. Así, el objetivo establecido sería obtener imágenes con una resolución espacial mejorada para utilizar tanto para la interpretación visual como para mejorar los

resultados de la clasificación digital. Encontramos diversas técnicas destinadas a la resolución del problema planteado, como las basadas en la descomposición IHS (intensity, hue, saturation) [1]. En general, podemos decir que son técnicas de naturaleza *ad hoc*, independientemente de que utilicen sofisticadas técnicas de tipo estadístico (componentes de análisis principales) o matemáticos (análisis con wavelets). En contraste con las técnicas *ad hoc* planteamos esta metodología basada en el método de estimación geoestadística multivariante de *cokrigeaje*. El método está diseñado con la finalidad de obtener una estimación lineal insesgada y con varianza de estimación mínima. Además de presentar otras ventajas como: considerar la función de respuesta PSF *point spread function*. Tiene en cuenta el efecto del soporte, esto es, los diferentes tamaños de píxel y su geometría, y las funciones de variabilidad espacial de cada imagen (variograma) y entre imágenes (variograma cruzado). El cokrigeaje proporciona una estimación de la incertidumbre de la imagen estimada dada por la varianza de estimación. Y, por último, el cokrigeaje puede incorporar diferente tipo de información secundaria en el análisis de este problema de estimación (mapas temáticos, valores experimentales de campo, etc.).

2. Metodología

Con la finalidad de simplificar la anotación, pero sin perder la generalidad, se considerará el caso de fusión de dos imágenes, o mejor dicho de dos bandas radiométricas de una imagen. La primera corresponde a la banda espectral k , con baja resolución espacial, es decir con píxel grande (soporte de información) V , y la segunda a la banda radiométrica ℓ , con mayor resolución espacial, es decir con píxel pequeño u , tal que $u < V$. Anotamos ambas imágenes por $Z_V^k(x)$ y $Z_u^\ell(x)$ respectivamente. Por ejemplo, para el sensor TM la banda k podría ser el infrarrojo térmico TM6 con resolución 120 m y banda ℓ podría ser la banda TM5 del infrarrojo medio, con píxel de 30 m. Desde el punto de vista geoestadístico (topo-probabilístico) las imágenes anteriores son consideradas como realizaciones de

funciones aleatorias y el objetivo es estimar la imagen de la banda k con la resolución espacial u , $Z_u^k(\mathbf{x})$. El cokrigeaje da respuesta a este problema con un estimador lineal multivariante con la forma:

$$\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^0 Z_V^k(\mathbf{x}_i) + \sum_{j=1}^M \beta_j^0 Z_u^\ell(\mathbf{x}'_j)$$

$\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0)$, es la estimación por cokrigeaje de $Z_u^k(\mathbf{x}_0)$, donde \mathbf{x}_0 son las coordenadas del píxel. Variando estas coordenadas se puede estimar una imagen completa o un sector, en un proceso de estimación píxel a píxel con vecindad local. El resto de los términos son:

λ_i^0 : peso asignado al píxel \mathbf{x}_i de la imagen Z_V^k en la estimación del píxel \mathbf{x}_0 de la imagen Z_u^k .

β_j^0 : peso asignado al píxel \mathbf{x}'_j de la imagen Z_u^ℓ en la estimación del píxel \mathbf{x}_0 de la imagen Z_u^k .

N : número de píxeles V de la imagen Z_V^k que intervienen en la estimación.

M : número de píxeles u de la imagen Z_u^ℓ que intervienen en la estimación. En general las vecindades de N píxeles y M píxeles de estimación forman ventanas móviles centradas en el píxel que se está estimando. Por ejemplo, puede ser $N = 9$ píxeles V en una ventana 3×3 de la imagen Z_V^k y $M = 25$ píxeles u en una ventana 5×5 de la imagen Z_u^ℓ .

2.1. El Sistema de Cokrigeaje

Una descripción detallada de la técnica de cokrigeaje se puede encontrar en numerosos textos de geoestadística [2], [3], [4] y [5] entre otros. En resumen, el sistema de cokrigeaje permite obtener de forma óptima los pesos $\{\lambda_i^0; i = 1, \dots, N\}$ y $\{\beta_j^0; j = 1, \dots, M\}$, necesarios para construir el estimador de cokrigeaje. Para ello se minimiza la varianza de error de un estimador insesgado: $E\{[\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0) - Z_u^k(\mathbf{x}_0)]^2\}$ bajo la condición de no sesgo: $E\{\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0)\} = E\{Z_u^k(\mathbf{x}_0)\}$, donde $E\{\cdot\}$ es la esperanza matemática.

La condición de no sesgo implica las siguientes condiciones sobre los pesos:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^0 = 1 \quad \sum_{j=1}^M \beta_j^0 = 0$$

Los pesos se obtienen como solución del sistema de cokrigeaje, que expresado en términos de covarianza sería:

$$\mathbf{C}\lambda = \mathbf{B}$$

con

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_N) & C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}'_1) & \dots & C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}'_M) & 1 & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_1) & \dots & C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_N) & C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}'_1) & \dots & C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}'_M) & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_1) & \dots & C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_N) & C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_1) & \dots & C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_M) & 0 & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}_1) & \dots & C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}_N) & C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}'_1) & \dots & C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}'_M) & 0 & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1^0 \\ \vdots \\ \lambda_N^0 \\ \beta_1^0 \\ \vdots \\ \beta_M^0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_0) \\ C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}_0) \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La matriz \mathbf{C} es de orden $N + M + 2$ por $N + M + 2$, donde:

$\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$: coordenadas del i -ésimo píxel de la imagen Z_V^k .

$\mathbf{x}'_i = (x'_i, y'_i)$: coordenadas del i -ésimo píxel de la imagen Z_u^ℓ .

$C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$: covarianza espacial de la imagen Z_V^k para la distancia $\mathbf{s}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$. Puesto que se asume la hipótesis de estacionaridad de segundo orden, podría escribirse $C_{VV}^{kk}(\mathbf{s}_{ij})$ en lugar de $C_{VV}^{kk}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$.

$C_{UU}^{\ell\ell}(\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}'_j)$: covarianza espacial de la imagen Z_u^ℓ .

$C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}'_j)$: covarianza espacial cruzada entre la imagen Z_V^k y la imagen Z_u^ℓ .

En teledetección la hipótesis de covarianzas cruzadas simétricas tienen sentido físico por lo que: $C_{VU}^{k\ell}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}'_j) = C_{UV}^{\ell k}(\mathbf{x}'_j, \mathbf{x}_i)$. Todas las covarianzas anteriores se pueden determinar experimentalmente a partir de las imágenes experimentales. Si se desea, el sistema puede escribirse en términos de variograma (simples y cruzados), considerada la hipótesis de estacionaridad de segundo orden que establece una relación lineal entre covarianza y variograma.

3. Ejemplo de aplicación

Para ilustrar la aplicación de la metodología se han escogido dos bandas del sensor ETM+ del satélite Landsat-7. El área se encuentra en la región de Alberta en Canadá. Se tomó una imagen de 512×512 píxeles para la banda 2 con resolución 30 m y una imagen de 1024×1024 de la banda 8

pancromática con resolución 15 m. El objetivo es obtener mediante cokrigeaje una estimación de la banda 2 con una resolución espacial de 15 m. Se asume la existencia de variabilidad espacial cruzada entre ambas imágenes, lo que ocurre en las imágenes de teledetección [6]. Sin embargo, con la finalidad de tener una imagen real de referencia con la que comparar los resultados de la integración, se han regularizado (remuestreo) las imágenes: la banda 2 a 60 m (256x256 píxeles) y la banda 8 pancromática a 30 m (512x512 píxeles). De este modo, el objetivo se resume en la estimación de la banda 2 a una resolución espacial de 30 m, a partir de la imagen de dicha banda remuestreada a 60 m y de la imagen pancromática remuestreada a 30 m. Finalmente, la imagen estimada podrá compararse con la imagen original “imagen objetivo” de la banda 2 de 30 m de resolución.

El primer paso es el análisis variográfico y la obtención de los modelos de variogramas simples y cruzados (covarianzas simples y cruzados). En este proceso se aplicará un proceso de deconvolución. Para el ejemplo mostrado, el modelo de variograma cruzado puntual para las bandas 2 y 8 es:

$$\gamma_{\bullet\bullet}^{28}(\mathbf{h}) = 16\text{Exp}(\mathbf{h}; 280, 0^\circ, 1) + 29\text{Sph}(\mathbf{h}; 14830, 30^\circ, 2.2)$$

donde $\text{aExp}(\mathbf{h}; \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})$ es un modelo exponencial con meseta \mathbf{a} , alcance \mathbf{b} , ángulo de anisotropía \mathbf{c} y ratio de anisotropía \mathbf{d} . $\text{aSph}(\mathbf{h}; \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})$ es lo mismo para un modelo esférico. Variograma y covarianza están relacionados por la conocida relación:

$$\gamma_{\bullet\bullet}^{28}(\mathbf{h}) = C_{\bullet\bullet}^{28}(0) - C_{\bullet\bullet}^{28}(\mathbf{h})$$

A efectos de comparación visual de los resultados puede verse en la Figura 1 la imagen objetivo Z_u^2 (30 m) y en las Figuras 2 y 3 las imágenes experimentales remuestreadas Z_V^2 (60 m) y Z_u^8 (30 m). El resultado final, que es la imagen de cokrigeaje, se representa en la Figure 4. El coeficiente de correlación entre las imágenes experimentales remuestreadas Z_V^2 y Z_u^8 es 0.920; el coeficiente de correlación entre la imagen remuestreada Z_V^2 y la imagen objetivo Z_u^2 es 0.973 y el coeficiente de correlación entre la imagen de cokrigeaje $\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0)$ y la imagen objetivo Z_u^2 es de 0.983. Aunque el incremento del coeficiente de correlación puede parecer pequeño, es estadísticamente significativo ya que se calcula con $512 \times 512 = 262144$ píxeles, lo que se traduce en una mejora de la calidad de la imagen. Visualmente, la calidad de la imagen de cokrigeaje de la Figura 4 puede valorarse comparándola con la imagen objetivo de la Figura 1.

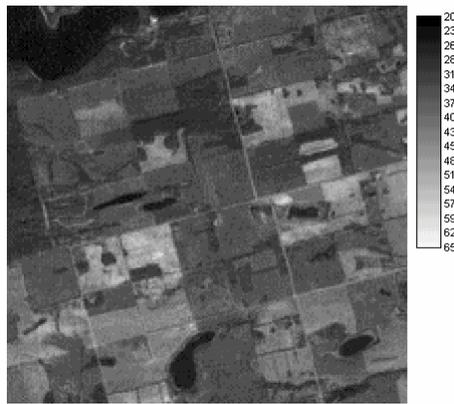


Figura 1.- “Imagen objetivo” Z_u^2 (30 m).



Figura 2.- Imagen banda 2 remuestreada Z_V^2 (60 m)



Figura3.- Imagen banda 8 remuestreada Z_u^8 (30 m).

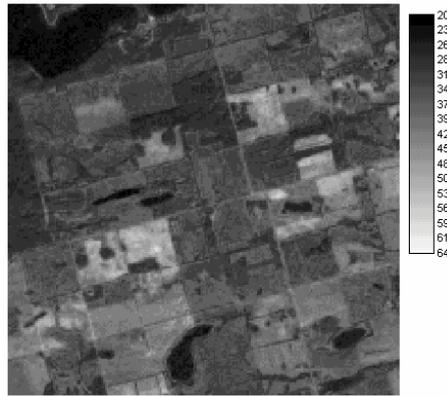


Figura 4.- Imagen resultado "cokrigeaje" $\hat{Z}_u^k(x_0)$.

4. Conclusiones

El cokrigeaje es una técnica geoestadística de estimación espacial multivariante que puede resultar de interés en el tratamiento digital de imágenes en teledetección. En el caso presentado se ha abordado el problema de mejorar la resolución espacial de una imagen de baja resolución a partir de ésta y de imágenes de alta resolución de otras bandas espectrales correlacionadas geoestadísticamente con la primera. Además, aunque no se ha mostrado en esta comunicación, el cokrigeaje puede incluir otro tipo de información secundaria en la resolución del problema anterior.

El aspecto más interesante del método es su sólida base geoestadística. Al contrario que otras técnicas de integración de imágenes, el cokrigeaje produce una imagen insesgada y de varianza de estimación mínima. La principal dificultad para su aplicación es que algunas de las covarianzas cruzadas necesarias (o variogramas cruzados) no son accesibles experimentalmente por lo que es necesario buscar una solución basada en teoría de sistemas lineales. [7]. El objetivo es modelar las covarianzas y covarianzas cruzadas para soporte puntual y asegurar que este conjunto es definido positivo. Con respecto a un modelo definido positivo de covarianzas y covarianzas cruzadas, el modelo lineal de corregionalización es particularmente útil por su simplicidad y efectividad [6].

5. Agradecimientos

El coautor Eulogio Pardo, es contratado Ramón y Cajal del MEC, perteneciente al Laboratorio RSGIS "Teledetección, SIG y Geoestadística" de la Universidad de Granada. El trabajo se ha

desarrollado con la financiación del Proyecto BTE2002-00152 del MEC y de la Junta de Andalucía (grupo de investigación RNM122). Los datos se han obtenido del Centre for Remote Sensing de Canadá.

6. Referencias

- [1] Chavez P. S., Sides S. C. and Anderson J. A., "Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57 (3), 295-303. 1991
- [2] Chilès J-P. and Delfiner P. "Geostatistics: modelling spatial uncertainty". New York: John Wiley & Sons. 1999.
- [3] Goovaerts, P. "Geostatistics for Natural Resources Evaluation". New York: Oxford University Press. 1997.
- [4] Journel A. G. and Huijbregts Ch. J. "Mining Geostatistics". New-York: Academic Press. 1978.
- [5] Wackernagel H. "Multivariate Geostatistics". Berlin: Springer, Berlin. 1995.
- [6] Papoulis, A. "Probability, random variables and stochastic processes". 2nd Ed. Singapore: McGraw-Hill International Editions. 1984.
- [7] Chica-Olmo, M. and Abarca-Hernández, F. "Radiometric coregionalization of Landsat TM and SPOT HRV images". *Int. Journal of Remote Sensing*, 9 (5) 997-1005. 1988.