# Corrección de la degradación espacial debida al PSF del sensor en teledetección

## F.J. García-Haro

Dep. Termondinámica. Fac. Física. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot, Valencia. J.Garcia.Haro@uv.es

#### Resumen

Un factor de especial significación en teledetección es la función de respuesta espacial del sensor -caracterizada a partir de su Point Spread Function, PSF- el cuál es curiosamente ignorado por la gran mayoría de técnicas en teledetección. En este trabajo se ha parametrizado el PSF de algunos sensores y se ha propuesto un método operativo para corregir la influencia del mismo. El método se ha aplicado tanto sobre datos simulados como imágenes reales, demostrando ser robusto y eficiente computacionalmente. La meiora introducida, apreciable visualmente, puede favorecer una mejor interpretación de los productos de teledetección.

## 1. Introducción

La radiancia que registran los sensores en teledetección no sólo está relacionada con las propiedades reflectivas de la superficie, sino que es consecuencia de numerosos factores adicionales que degradan la señal, tales como la perturbación debida a la atmósfera, el relieve, el ruido instrumental, la conversión binario-digital o el remuestreo geométrico. Además, un factor de especial significación es la función de respuesta espacial del sensor, la cuál es curiosamente ignorada por la gran mayoría de técnicas en teledetección. En efecto, la transición entre los niveles digitales no es una función escalón sino tiene una forma función de pixels vecinos es muy importante.

Utilizando la hipótesis habitual de que el instrumento se comporta como un sistema lineal, su respuesta se puede caracterizar completamente mediante su respuesta física respecto a una fuente puntual situada dentro del campo del objeto, lo que se conoce como su *Point Spread Function* (PSF). La PSF es responsable directa de un aumento significativo de la correlación espacial de cada banda y de la reducción de la resolución espacial, la cuál es

siempre inferior al espaciado del remuestreado de la imagen (tamaño del pixel).

Proponemos aquí un método operativo para corregir la influencia del PSF, que permite aumentar la resolución espacial efectiva de los datos y la precisión de los productos de teledetección. Dicho método se puede aplicar bien sobre bandas espectrales individuales o sobre proporciones de materiales obtenidos utilizando la técnicas de mezclas espectrales, conocido en la literatura como Spectral Mixture Analysis (SMA) [1]. En efecto, la degradación que introduce el PSF del sensor causa que las proporciones reales dentro del pixel difieran de las que se estiman el área activa (más grande) procedente de la cuál el sensor integra la señal. Si se conoce el PSF del sensor es posible diseñar un método determinista para estimar las proporciones reales.

#### 2. Modelización de la PSF de los sensores

La medición directa del PSF no es viable, por lo que generalmente se suelen utilizar las secciones transversal,  $LSF_y(y)$ , y longitudinal,  $LSF_x(x)$ , de ésta, Dichas LSF's provienen del nombre *line-spread-function*. La PSF se considera habitualmente como una función separable en las direcciones x e y:

$$PSF(x, y) = LSF_x(x) \cdot LSF_y(y) \tag{1}$$

A su vez, las LSF's se calculan mediante la convolución de tres componentes, óptica (O), del detector (D) y electrónica (E). La forma más sencilla de modelar dicha convolución consiste en utilizar el domínio de Fourier, es decir,  $TF_y(f_y)=\Im(LSF_y(y))$ . En dicho domínio, la función de transferencia se expresa matemáticamente a través de una multiplicación:

$$TF_{y}(f_{y}) = OTF_{y}(f_{y}) \cdot DTF_{x}(f_{y}) \cdot ETF_{y}(f_{y})$$
(2)

Para el caso de los escáners del satélite Landsat-5, [2] obtuvo la siguiente modelización para la dirección transversal:

$$TF_{y}(f_{y}) = e^{(-2\pi^{2}\sigma^{2}f_{y}^{2})} \sin c(f_{y}d)$$
(3)

565

donde *d* es el área activa (IFOV) del sistema en el nadir, que coincide con su resolución espacial nominal y  $\sigma$  es la anchura del IFOV proyectada en el nadir. Los valores de  $\sigma$  y *d* de los diferentes escáners Landsat-5 se recogen en la tabla 1 [2].

Con el fin de calcular la PSF hemos aplicado la transformada de Fourier inversa de la expresión (3), obteniendo la solución siguiente:

$$LSF_{y}(y) = \frac{1}{4 \cdot a \cdot b} \left\{ \left\{ erf\left(\frac{b - y/a}{2}\right) + erf\left(\frac{b + y/a}{2}\right) \right\} \right\}$$
(4)

. .

donde:

• 
$$b = d/(\sigma\sqrt{2})$$
  $a = \sigma/\sqrt{2}$   
•  $erf$  es la función error:  $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{x} e^{-t^{2}} dt$ 

1-

Utilizando (4) y los valores nominales característicos de los sensores Landsat-5 (se recogen en tabla 1) hemos representado la proyección transversal del PSF (ver figura 1).



Figura 1:  $LSF_y$  calculada para los diferentes escáners Landsat-5 (A) Bandas TM: 1-4 (contínuo) y 5, 7 (discontínuo). (B) Bandas MSS: 1, 3 (contínuo), 2 (punteado) y 4 (discontínuo).

566

En este trabajo haremos la hipótesis de que  $LSF_x$ =  $LSF_y$ , ya que ambas funciones sólo difieren en la componente electrónica. Es fácil de comprobar que la única contribución significativa corresponde a los pixels vecinos más proximos (representan aproximadamente el 99.8% de la señal). Por ello, podemos simplificar el problema considerando una PSF que consiste en un filtro 3×3:

$$PSF = c^T c \qquad c = \begin{bmatrix} \mu & 1 - 2\mu & \mu \end{bmatrix}$$
(5)

Los valores de  $\mu$  obtenidos para los escáners del satélite Landsat-5 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Valores de  $\mu$ ,  $\sigma$  y d para las diferentes bandas de los sensores Landsat-5, TM y MSS.

	TM1- TM4	TM5, TM7	TM6	MSS1, MSS3	MSS2	MSS4
σ(m)	8.0	8.4	29.3	10.6	12.0	14.8
d (m)	30.0	30.8	119.9	78.3	78.3	78.3
μ	11.3	10.3		7.7	8.7	10.7

### 3. Formulación del problema

Sin pérdida de generalidad consideraremos un PSF del sensor de tamaño finito, representado por un filtro digital o núcleo de tamaño  $P \times P$  (P=2K+1). En nuestro caso, K=1. Matemáticamente, la reflectividad del pixel en la imagen degradada se expresa aditivamente a partir de las reflectividades (reales) de los pixels de éste en su vecindad, modulada por los coeficiente del filtro digital que describe la PSF.

$$R_{i,j} = \sum_{m=i-k}^{i+k} \sum_{n=j-k}^{j+k} PSF_{i-m,j-n} r_{m,n}$$
(6)

El problema consiste en estimar los valores de la matriz "original" **r**, a partir de la matriz "degradada" **R**, donde se supone conocida la matriz de convolución *PSF*. Esta formulación es aplicable no sólo a valores de reflectividad sino también a proporciones obtenidas mediante el SMA.

Existen varias maneras para abordar el problema, ya sea utilizando el dominio de Fourier, como el espacial. En el dominio espacial, [4] han propuesto un método que resuelve el sistema de ecuaciones descrito por (6) considerando todos los pixels de la imagen, y utilizando técnicas eficientes de cálculo numérico. En este trabajo proponemos un algoritmo relativamente simple para resolver el problema, basado en un método iterativo, que viene descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\hat{r}_{i,j}(n+1) = \frac{1}{PSF_{o,o}} (R_{i,j} - \sum_{\substack{m=i-K \ m\neq i}}^{j+K} \sum_{\substack{n=j-K \ n\neq j}}^{j+K} PSF_{i-m,j-n} \ \hat{r}_{m,n}(n))$$
$$\hat{r}_{m,n}(0) = R_{m,n} \quad (m \neq i \ n \neq j)$$
(7)

donde  $\hat{r}_{i,j}(n+1)$  representa la estimación del pixel después de n+1 iteraciones. La ecuación expresa la solución obtenida en la iteración n-ésima, a partir de la suma de los valores de los pixels vecinos situados dentro del kernel,  $\hat{r}_{m,n}$ , multiplicando cada uno por un coeficiente  $-PSF_{m,n} / PSF_{o,o}$ . A dicha suma se le debe añadir la constante  $R_{i,j} / PSF_{o,o}$ .

## 4. Resultados

Para validar esta metodología, hemos aplicado el método propuesto utilizando imágenes, tanto simuladas como reales.

## 4.1 Imágenes simuladas

Estas imágenes simuladas proporcionan información objetiva para evaluar cómo afecta la PSF a las imágenes y evaluar la validez del algoritmo propuesto. La imagen se ha obtenido degradando una imagen HyMap a bordo de un avión (tamaño de pixel de 6m) adquirida en una campaña de campo en Junio de 2000. El área de estudio está situada aproximadamente a 40 km al Sur-Oeste de Sevilla, y cubre el cauce de los ríos Agrio y Guadiamar, los cuáles fueron cubiertos por lodos con alto contenido en metales pesados tras el accidente causado por la rotura de un dique en la mina de Aznalcóllar el 25 de Abril de 1998. Ello provocó el vertido de 4 millones de agua ácida, que se extendió a lo largo de 4286 ha de tierras cultivadas y pantanales, poniendo en peligro el equilibrio del Parque Nacional de Doñana.

Hemos degradado los datos HyMap con el fin de obtener una imagen con las características espaciales, espectrales y de respuesta del sensor TM. Para simular la imagen hemos calculado primeramente la función de transferencia entre los datos iniciales (HyMap) y los datos que pretendemos simular (TM), y a continuación se ha modelado dicha función mediante un filtro digital [4].

Una vez reproducida la imagen con las características del sensor TM, hemos aplicado el algoritmo VMESMA [5] con el fin de obtener proporciones materiales presentes en cada píxel (suelo, vegetación y lodo) utilizando espectros obtenidos mediante radiometría de campo en la zona [6] (figura 2A).

Las proporciones obtenidas se han comparado con los valores reales originales de la imagen de alta

resolución espacial (HyMap). El acuerdo sería perfecto en el caso hipotético en que la degradación consistiese únicamente en promediar las imágenes utilizando bloques cuadrados de 5×5 pixels. Sin embargo, los resultados indican que los efectos de la PSF causan una gran dispersión en las proporciones, con valores de RMSE mayores de 0.08.



Figura 2: (A) Proporción de suelo obtenida al aplicar el SMA sobre una imagen TM sintética. (B) Resultado de aplicar la corrección del PSF.

El resultado de aplicar el método propuesto se muestra en la figura 2B. La convergencia (cambio de 0.5% en la solución entre dos iteraciones consecutivas) se obtuvo en todos los casos después de únicamente 3 iteraciones, lo cuál confirma la eficiencia y robustez de la solución propuesta. La comparación con la imagen de referencia indica una reducción enorme de la dispersión debida al PSF, obteniendo valores de las fracciones mucho más precisos (RMS<0.01). Ello se aprecia visualmente en la imagen corregida (2B), la cuál manifiesta un contraste claramente mayor en superficies heterogéneas (caminos, separación entre estructuras), que se diferencian de una forma mucho más nítida. El resultado es un incremento en la resolución espacial efectiva de la imagen.

#### 4.2. Imágenes reales

Hemos aplicado también el método propuesto sobre la fracción de vegetación obtenida de una imagen real HyMap en otra ventana diferente del área de estudio. La figura 3A muestra las proporciones originales, mientras que la figura 3B muestra las proporciones corregidas del efecto del



PSF. Se aprecia visualmente como después de aplicar la corrección de la PSF aumenta el nivel de detalle, con un realce significativo de las estructuras de la escena.



Figura 3: (A) Fracción de vegetación original.(B) Corrección del PSF (con μ=0.10).

La substracción entre la imagen original y la corregida presenta valores prácticamente nulos en áreas homogéneas (barbecho, vegetación densa) y muy altos en áreas en las que existe una mezcla de varias componentes dentro del pixel. En este caso, el error era inicialmente mayor, a causa de la contribución a la señal de materiales próximos. Después de corregir la influencia del PSF, algunos elementos del paisaje que no podían resolverse de forma nítida se tornan ahora más evidentes. Se observa por ejemplo un realce de arbustos individuales en la parte inferior de la imagen, área ocupada por vegetación natural. También se observan estructuras alineadas en zonas de cultivos, tales como surcos causados por el laboreo o la distribución regular de plantas en hileras. Otras estructuras que ahora se resuelven mejor son las fronteras entre campos diferentes y las dos filas de árboles situadas a ambas orillas del cauce del río.

## 5. Conclusiones y direcciones futuras

Se ha propuesto un método para corregir la influencia del PSF, que ha mostardo ser preciso y rápido. Hemos demostrado su aplicabilidad sobre fracciones de componentes derivadas del SMA. La utilización de este método ayudará a obtener estimaciones más precisas de la proporción de materiales en la escena, para el estudio de la cobertura terrestre. Asimismo, el método puede aplicarse sobre imágenes de reflectividad o productos derivados (de índices de vegetación, clasificación, filtros de textura), con el fin de favorecer su interpretación.

A pesar de las ventajas evidentes que ofrece la corrección de la PSF, ésta viene acompañada de un efecto no deseado, como es el aumento -aunque pequeño- del nivel de ruido. Ello se debe a que en la deconvolución no sólo se recupera información original sino también se introduce parte del nivel de ruido original, efecto que podría ser visualmente evidente para sensores que presentan un valor elevado del cociente señal-ruido. Para minimizar este problema pretendemos en el futuro diseñar un filtro no lineal que reduzca el ruido al tiempo que preserve estructuras y bordes [4].

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto TEDECVA (GV2004-B-191). El autor desea agradecer a S. Sommer y T. Kemper (JRC, EC) por facilitar los datos HyMap y las medidas de campo.

## 7. Referencias

- García-Haro, F. J., M.A. Gilabert and J. Meliá, Linear spectral mixture modelling to estimate amount of vegetation from optical spectral data. *Int. J. Remote Sens.* 17:3373-3400, 1996.
- [2] Markham, B.L. The Landsat spectral response, *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, GE-23 (6): 864-875, 1985.
- [3] Huanga, C., J.R.G. Townshenda, S. Lianga, S-N.V. Kalluria, R. S. DeFries, Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution, *Remote Sens. Environ.* 65:267-279, 2002.
- [4] Justice, C.O., Markham, B.L., Townshend, J.R.G., and Kennard, R.L. Spatial degradation of satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 10 (9): 1539-1561, 1989.
- [5] García-Haro, F.J, S. Sommer and T. Kemper, Variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA), *Int. J. Remote Sens.*, en prensa, 2005.
- [6] Kemper, T. S. Sommer. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. Env. Sci. Tech., 36, 2742-2747, 2002.
- [7] Soille, P., Morphological Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1999.

568