

Caso práctico

Revisando el concepto de resolución en teledetección

A. Calle y P. Salvador

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Valladolid

Resumen

Un sensor viene representado a través de su resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral, aunque estas definiciones no siempre son usadas con precisión. El trabajo que se presenta tiene un perfil académico en teledetección, que realiza una revisión de las definiciones de las magnitudes relacionadas con el diseño de sensores, para que puedan ser comparados. Los conceptos analizados son la caracterización espacial, espectral, radiométrica y resolución temporal.

Palabras clave: resolución espectral, espacial, radiométrica, MTF, PSF, NEAT, $NE\Delta\rho$.

Abstract

A revision of the concept of resolution, in remote sensing

A satellite sensor is characterized by its spatial, temporal, radiometric and spectral resolution; however these features are not clearly addressed. This work has an academic profile into the remote sensing topics; it is a review of the main sensor magnitudes related to design of sensors, in order to have knowledge to compare them. The concepts analysed here are, mainly, the spatial, spectral and radiometric characterization and the temporal resolution.

Key words: spectral, spatial and radiometric resolution, MTF, PSF, NEAT, $NE\Delta\rho$.

Introducción

Actualmente existe una gran diversidad de sensores para responder a las necesidades que exigen las técnicas de observación de la tierra. Además el desarrollo de aplicaciones requiere disponer de datos de calidad, por lo que en la práctica, el usuario debe establecer una relación adecuada calidad/coste de las imágenes para trabajar. Uno de los criterios principales en la elección de imágenes suele ser, por ejemplo, la resolución espacial, de forma que el usuario prefiere una imagen de 1 m frente a otra de 4 m. Sin embargo, ¿se comprenden adecuadamente estos datos?. Una llamada de atención sobre los parámetros electro-ópticos que es necesario conocer, para comparar dos sen-

sores, la realiza Joseph (2000) en una comunicación abierta, como presidente de la Comisión Técnica del ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), denominada «Sensors, Platforms and Imagery», para sugerir una reflexión acerca de la información precisa que los usuarios de imágenes deberían disponer a fin de decidir por la calidad de las imágenes utilizadas.

Otra de las dificultades a las que se enfrentan los usuarios es que no existe una unificación clara de las definiciones en la caracterización de un sensor. Esta afirmación se pone de manifiesto si realizamos una consulta a los manuales técnicos, o a las tablas de caracterización que proporcionan los proveedores de imágenes.

De forma intencionada se han incluido algunos términos escritos en inglés (aparte de los acrónimos), por llevar atribuido, de forma intrínseca, un significado más preciso; en algunos casos se necesitaría una frase para realizar una traducción poco afortunada.

Caracterización espacial

A menudo se ofrece la definición de resolución espacial como la dimensión del objeto más pequeño que se puede discernir en una imagen. Esto es no decir nada si no se establece el contraste ni se precisa la dimensión del píxel del que procede la radiancia ($W/m^2/\mu m/sr$); tal definición resulta insuficiente e imprecisa. Hay dos conceptos que tienden a usarse como sinónimos para definir el píxel: el IGFOV (Instantaneous Geometric Field of View) que es el tamaño de la imagen del detector proyectado por el sistema óptico sobre el suelo (también conocido como *footprint*) y el GSD (Ground Sampling Distance) que cuantifica la distancia del suelo a la que son grabados dos píxeles consecutivos; si expresamos el GSD como el ángulo de muestreo del sensor tendremos el IFOV (Instantaneous Field of View) en unidades angulares.

IGFOV y GSD son conceptos diferentes pero el ratio entre ellos tiene un impacto directo sobre el valor de la radiancia que atribuimos a un píxel. Es muy recomendable el artículo de revisión que hace Cracknell (1998) que titula con la pregunta: «*what's in a pixel?*» acerca del contenido radiométrico real de un píxel de imagen, dado que la relación que existe entre los valores IGFOV y GSD determina la mezcla de cubiertas del suelo que contribuyen al valor radiométrico.

Debe entenderse que el IGFOV no es una función cuadrada uniforme, sino que tiene una degradación mayor en los bordes de forma que se parece a una función gaussiana tridimensional. Esta degradación se produce debido a varios factores: i) difracción del sistema óptico, ii) limitación del detector, iii) influencia de los circuitos eléctricos y iv) la interacción de la radiación con la atmósfera; todo ello tiende a generar un IGFOV parecido a una mancha degradada, con la consiguiente reducción del

contraste. Por ello, la función más importante para establecer la resolución espacial es la MTF (Modulation Transfer Function) que establece el contraste de la imagen. La MTF cuantifica la sensibilidad del sensor para detectar el contraste a través de la frecuencia de las variaciones radiométricas de la escena; dicho de otro modo, la función MTF tiene el mismo significado, en el dominio de las frecuencias, que la PSF (Point Spread Function) en el dominio espacial. Para comprender la relación entre MTF y PSF y su determinación analítica a través de un modelo de sensor se recomienda el artículo de Markham (1985) dedicado a la caracterización espacial de los sensores Landsat MSS (Multispectral Scanner) y Landsat TM (Thematic Mapper).

El impacto de la forma de la PSF puede pasar desapercibido en la observación de variables continuas, donde se manifestará como un emborronamiento de la imagen; sin embargo puede tener drásticas consecuencias cuando se observan fenómenos en superficie que exhiben discontinuidades de radiancia, como el caso de fronteras de cubiertas, en el espectro solar (Huang *et al.*, 2002). También en el espectro térmico, en la observación de fenómenos puntuales como los hot-spots; en este sentido véase Calle *et al.* (2009) acerca del impacto de esta función en la detección y cuantificación de parámetros térmicos de incendios sobre el sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible & InfraRed Imager) de MSG así como los problemas que plantea el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para realizar la detección de hot-spots debido al fuerte solapamiento de la PSF entre píxeles contiguos (Kaufman and Justice, 1998).

La ventaja de la función MTF es que simplifica la caracterización de un sensor, debido a que trabajar en el dominio espacial equivale a obtener la MTF del sistema como el producto de las funciones MTF individuales que representan cada uno de los factores, mencionados anteriormente, que degradan la imagen del sensor. En cualquier caso se impone la medida de la MTF cuando el sensor se encuentra en vuelo porque dicho valor difiere de la aportada en el banco de pruebas; no sólo por el efecto atmosférico de degradación sino por el sistema electrónico adicional. Las medidas de la

MTF en sensores de alta resolución espacial siguen protocolos estándar (véase Helder *et al.*, 2006, para el caso de IKONOS y QuickBird)

Resolución espacial: definición

La recomendación de la NASA (1973) para establecer un concepto de resolución espacial que permita comparar sensores fue introducir el EIFOV (Effective Instantaneous Geometric Field of View) definido como la dimensión espacial en la superficie de la tierra correspondiente a la frecuencia para la cual el valor de la MTF es 0,5. Debe tenerse en cuenta que los cuatro factores mencionados que degradan la MTF del sensor son diferentes para las direcciones de movimiento del satélite (*track*) y barrido de línea de imagen (*scan*); la MTF_{scan} está más degradada debido al mayor impacto de la componente electrónica necesaria para registrar los píxeles de cada línea con mayor velocidad que en la dirección *track*, donde la componente electrónica casi no tiene efecto. Por lo tanto el valor MTF 0,5, en cada dirección, establece la resolución espacial correspondiente y, por lo tanto, diferente.

Existe un límite de frecuencia máxima establecida por la mitad de la frecuencia de muestreo (valor del GSD en el dominio de las frecuencias), más allá del cual, el detector no puede discriminar ninguna variabilidad de contraste; este límite es la frecuencia de Nyquist, f_N ($f_N = 0.5/\text{IFOV}$ ciclos/rad). Si la señal que está siendo muestreada tiene componentes de frecuencia más altas que la frecuencia de Nyquist, entonces el muestreo produce una degradación denominada *aliasing*. Precisamente el valor de MTF en la frecuencia de Nyquist es una figura de mérito de los sensores.

Discusión y relación de magnitudes espaciales

La caracterización espacial se completa con la relación de las magnitudes involucradas: IGFOV, EIFOV, GSD y MTF. En el caso ideal, con una MTF de valor 1 para frecuencias menores de Nyquist y nula para superiores, tendríamos que IGFOV, EIFOV y GSD deberían

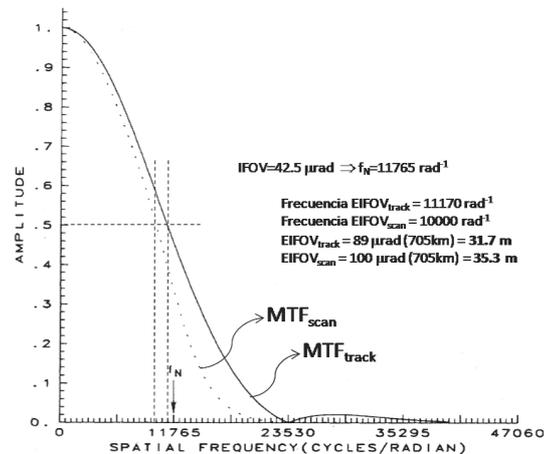


Figura 1. Funciones MTF del sensor Tm y determinación de las resoluciones espaciales en direcciones *track* y *scan*. En la figura, adaptada de Markham (1985), los autores han incluido algunos cálculos explicativos.

coincidir. Sin embargo en el caso real, ocurre que el EIFOV es menor que el IGFOV, por lo que las funciones PSF de píxeles contiguos se encuentran superpuestas y el valor de GSD debería ser muy cercano al EIFOV. El grado de cercanía lo establece al final la diferencia entre las resoluciones *scan* y *track*. Un ajuste en la dirección *track* implicará un exceso de solapamiento en la dirección *scan*, y mayor emborronamiento. Este caso, no obstante, es preferible a ajustar la dirección *scan* que conllevaría la introducción potencial de *aliasing* en la dirección *track*.

Un ejemplo interesante es la Figura 1 adaptada del análisis de Markham (1985), en la que los autores han incluido algunos cálculos explicativos de las magnitudes de la presente discusión. En dicha figura se muestra el sensor TM, que con un IFOV de 42,5 mrad le corresponde una frecuencia de Nyquist de 11.765 ciclos/rad. Los valores de MTF 0,5 corresponden a resoluciones de 31,7 y 35,3 metros. Ajustando el GSD a la resolución *track* existe un ligero solapamiento, para evitar el *aliasing*.

Caracterización espectral

La base física de la teledetección consiste en: observar lo interesante donde la atmósfera lo permita. Ello implica diseñar sensores con capacidades espectrales en ventanas atmosféricas.

ricas, pero en longitudes de onda donde las cubiertas del suelo exhiben discontinuidades en reflectancia y/o temperatura; ello implica la búsqueda de intervalos espectrales bien localizados y mediante bandas espectrales que no superen un valor umbral de anchura. Aumentar la anchura espectral permite recibir más radiancia de píxeles más pequeños (mejora de la discriminación espacial) pero implica la mezcla de características espectrales y por lo tanto pérdida de información. Esta afirmación, netamente cualitativa, constituye el argumento de discusión resolución espacial *versus* resolución espectral; sin embargo no existe una definición clara de anchura espectral efectiva para cuantificarla (DI) y lo más importante, la longitud de onda representativa, l_c .

La SRF (Spectral Responsivity Function) es la función que especifica la sensibilidad con la que el sensor detecta radiancia para cada longitud de onda, l , y tiene valores nulos por debajo y por encima de dos límites dados de longitud de onda. Un método muy extendido, para expresar la anchura de una banda espectral, es el FWHM (Full-Width at Half-Maximum) consistente en establecer como DI la diferencia entre los valores de l en los que la SRF tiene el valor del 50%. Este procedimiento, sin embargo, es impreciso cuando se aplica a funciones SRF asimétricas, que son la mayoría, dado que lleva a establecer una longitud de onda central, l_c , en el valor medio, introduciendo un error cualitativo en la interpretación del valor de la radiancia en esa banda, al no tener en cuenta la ponderación de la SRF por su forma.

Palmer (1984) realiza una discusión muy esclarecedora acerca de los métodos de caracterización espectral y los inconvenientes que presenta cada uno, proponiendo, finalmente, la técnica de normalización radiométrica del ancho de banda (Radiometric bandwidth normalization), consistente en asignar a un sensor con SRF conocida, una función equivalente cuadrada con un valor de respuesta constante, R_n . En la Figura 2, se muestra una función asimétrica real para esquematizar gráficamente esta definición; el área de la función cuadrada será el mismo que el área de la SRF real, el valor de l_c es el centro de la función cuadrada y el ancho efectivo, DI, es la anchura de la función cuadrada.

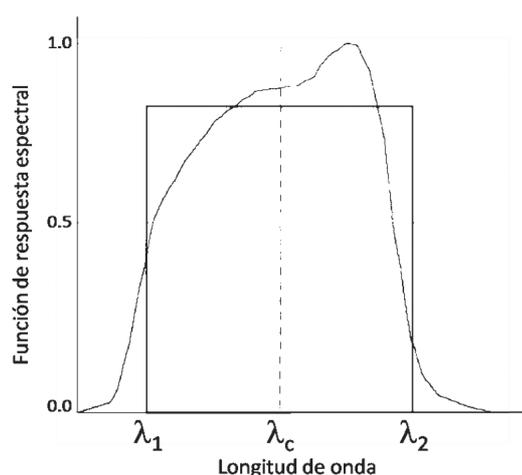


Figura 2. Representación de una SRF asimétrica, y la función cuadrada auxiliar que permite definir la anchura efectiva, $\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)$ y la longitud central, λ_c (véase texto).

$$\lambda_c = \frac{\int \lambda \cdot SRF(\lambda) \cdot d\lambda}{\int SRF(\lambda) \cdot d\lambda} ; \int SRF(\lambda) \cdot d\lambda = R_n \cdot \Delta\lambda \quad [1]$$

De esta forma l_c es el centroide de la función SRF. En concepto de centroide, que no es otra cosa que el concepto geométrico de centro de masas, pondera adecuadamente las funciones SRF asimétricas. Obsérvese que $SRF(l_1)$ y $SRF(l_2)$ no tienen el valor de 0,5, que es lo que habría sido propuesto mediante el método FWHM que, en el ejemplo de la Figura 2, habría supuesto un sesgo hacia la izda (menor l_c).

La calidad espectral de los sensores también está limitada por factores ópticos derivados del sistema telescópico que realiza la convergencia de la radiancia sobre el plano focal. Para sensores de alta resolución espacial (en el entorno de 1 m) la longitud focal del telescopio excede las dimensiones del bus del satélite, por lo que el diseño involucra lentes y espejos que introducen algunas aberraciones y limitan la calidad espectral. Su discusión está fuera del alcance de este trabajo, pero se recomienda al lector el trabajo de Cawthorne, *et al.* (2008), autores que pertenecen a SSTL (Surrey Satellite Technology Limited) y que realizan una excelente revisión de los sistemas de telescopios en satélites de muy alta resolución espacial, explicando ventajas e inconvenientes, de cada diseño, relacionadas con la caracterización espectral y radiométrica. También se puede encontrar una discusión académica en Larson & Wertz (1999).

Caracterización radiométrica

Otro concepto que, frecuentemente, se maneja con imprecisión es la resolución radiométrica, debido a que en este campo confluyen factores informáticos, electrónicos y físicos. De forma grosera la resolución radiométrica es entendida como el número de bits que usa un sensor para cuantificar la medida física de la radiancia ($W/m^2/\mu m/sr$). Mucho más precisa es la caracterización radiométrica de un sensor a través de la temperatura/reflectancia diferencial equivalente en ruido $NE\Delta T/NE\Delta\rho$ (Noise Equivalent differential Temperature/Reflectance), en el espectro térmico/solar que significa el mínimo cambio en temperatura/reflectancia que puede ser detectado por el sensor. Esta definición física, sin embargo, exhibe una dependencia con la magnitud SNR (Signal to Noise Ratio), con el rango dinámico en que se establece la saturación y el número de bits de cuantificación de la señal. Con la idea de unificar los espectros térmico y solar, Joseph (2000) propone y usar la radiancia diferencial equivalente en ruido, NEAR, a través de las unidades propias de la radiancia espectral.

Discusión y relación de magnitudes radiométricas

Es habitual encontrar la referencia del parámetro SNR en las características de los sensores por parte de los fabricantes, dado que es una figura de mérito; sin embargo se alcanzan valores elevados de SNR gracias a dispositivos externos como el TDI (Time Delay and Integration) que consiste en usar el movimiento de la imagen a lo largo de las filas que componen el *array* del plano focal para aumentar el tiempo de integración de la radiancia entrante. La ventaja del uso del TDI consiste en aumentar considerablemente el parámetro SNR y, consiguientemente, la resolución radiométrica; sin embargo es un elemento mecánico que puede producir alteración en los parámetros de apuntamiento (control de *attitude*). La forma más natural de aumentar la SNR, en satélites de alta resolución espacial consistiría en aumentar el intervalo de la función de respuesta espec-

tral, de forma que se aumentaría la radiancia recibida sin necesidad de aumentar el tiempo de integración. Esta es la razón de que la banda pancromática (PAN) proporciona mejor resolución espacial que las bandas multispectrales (XS); sin embargo esto conlleva la pérdida de la capacidad para discernir discontinuidades en la firma espectral de las cubiertas, como se explicaba en el apartado anterior. Por lo tanto, aquí el usuario de imágenes, tiene expuesto el argumento de discusión entre resolución espacial *versus* resolución espectral *versus* resolución radiométrica.

Resolución temporal

El concepto de resolución temporal suele ser el que presenta menor confusión de los cuatro aspectos tratados aquí; aunque debe matizarse ya que debería diferenciarse de forma precisa con el concepto de tiempo de revisita.

La resolución temporal o ciclo de repetición específica el tiempo que tarda un sensor en volver a cubrir una localización determinada manteniendo la geometría de visión que establece el ancho de barrido (conocido en inglés como *swath*). En sensores antiguos el concepto era inequívoco y fijo pero cuando aparecieron satélites con la capacidad de programar el apuntamiento del sensor para realizar capturas solicitadas (p.e. SPOT) apareció el término de «tiempo de revisita». Los sensores con capacidad de apuntamiento aminoran el tiempo de retraso en disponer de una captura sobre cualquier lugar (pero sin mantener la geometría de visión), aunque el coste de la imagen es más elevado. Tal y como sugiere Joseph (2000) resolución temporal y tiempo de revisita son conceptos diferentes y, por lo tanto, no debieran ser usados como sinónimos puesto que las imágenes obtenidas mediante el ciclo natural de repetición conservan la misma geometría de visión, de forma que las variaciones radiométricas provocadas por la función BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) son mínimas, lo que no ocurre en imágenes obtenidas mediante orientación solicitada del sensor, en aquellos casos en que se dispone de esta posibilidad. Esta precisión cobra mayor importancia cuanto más al-

ta sea la resolución espacial y sobre todo cuando las aplicaciones están fundamentadas en el estudio de series temporales, como los productos biofísicos derivados de los índices de vegetación. Latifovic *et al.* (2003) presentan una discusión acerca de los factores geométricos, y su incidencia, sobre la modelización de la función BRDF.

Por otra parte, aún en el caso de conocer un valor del ciclo de repetición, debiera aportarse dicho parámetro a diferentes valores de latitud o especificar el valor a latitud 0°, que representa el caso más desfavorable. Joseph (2000) propone los valores de latitud 0° y 40° como estándar representativo, para poder interpretar y comparar esta magnitud entre diferentes sensores.

Conclusión y síntesis

El aumento de sistemas de observación de la tierra y la amplia oferta en imágenes de sensores, sobre todo en alta resolución espacial, requiere comparar su calidad y justificar el coste de su adquisición. Como hemos visto los principales factores a tener en cuenta son los que se refieren a las caracterizaciones espacial, radiométrica y espectral; notar que la resolución temporal está establecida por las condiciones orbitales y condicionada a las necesidades de disponibilidad del usuario.

En cada aplicación deberá primar más una caracterización que otra. No obstante, si se busca un argumento global de comparación entre sensores, en Larson & Wertz (1999) se propone un índice relativo de calidad RQI (Relative Quality Index) que permite comparar un sensor con otro cuyas características sirven de referencia, a través de una fórmula de síntesis de magnitudes. Este índice se define como:

$$RQI = \frac{SNR}{SNR_{ref}} \frac{MTF}{MTF_{ref}} \frac{GSD_{ref}}{GSD} \quad [2]$$

siendo el valor MTF a la frecuencia de Nyquist y el subíndice «ref» indica el parámetro del sensor con el que se compara.

Referencias

- CAWTHORNE, A., PURLL, D., & EVES, S. (2008). Very high resolution imaging using small satellites, *6th Responsive Space Conference*, April 28-May, 1, 2008. Los Angeles, CA.
- CALLE, A., CASANOVA, J-L., & GONZÁLEZ-ALONSO, F. (2009). Impact of Point Spread Function of MSG-SEVIRI on active fire detection. *International Journal of Remote Sensing* 30 (17), 4567-4579
- CRACKNELL, A. P. (1998). Review article. Synergy in remote sensing: what's in a pixel? *International Journal of Remote Sensing* 19 (11): 2025-2047.
- HELDER, D., CHOI, J., & ANDERSON, C. (2006). On-orbit modulation transfer function (MTF) measurements for IKONOS and QuickBird. In *Proceedings of the JACIE 2006 Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop*, 14-16 March, Laurel, MD, USA, sponsored by NASA/NGA/USGS (CD-ROM).
- HUANG, C., TOWNSHEND, J. R. G., LIANG, S., KALLURI, S. N. V., & DEFRIES, R. S., (2002). Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing of Environment* 80: 203-212.
- JOSEPH, G. (2000). How well do we understand Earth observation electro-optical sensor parameters? *Remote Sensing of Environment* 55: 9-12.
- KAUFMAN, Y., & JUSTICE, C. (1998). MODIS Fire Products, Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS Science Team. EOS ID#2741
- LARSON, W., & WERTZ, J. R. (eds.) (1999). *Space Mission Analysis and Design. 3rd Ed. Space Technology Library* Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers.
- LATIFOVIC, R., CIHLAR, J., & CHEN, J. (2003). A Comparison of BRDF Models for the Normalization of Satellite Optical Data to a Standard Sun-Target-Sensor Geometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (8): 1889-1898.
- MARKHAM, B. L. (1985). The Landsat Sensors Spatial Responses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23 (6): 864-875
- NASA SP 335 (1973). Advanced scanners and imaging systems for earth observation. *Working Group Report, NASA/GSFC*.
- PALMER, J. M. (1984). Effective Bandwidths for LANDSAT-4 and LANDSAT-D Multispectral Scanner and Thematic Mapper Subsystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* GE-22, 3: 336-338.