

La teledetección como fuente de información para los modelos bidimensionales. Aplicación al modelo Íber de las marismas de Doñana

Belén Martí-Cardona, Anaïs Ramos, Ernest Bladé, Thunh Duc Tran, Josep Dolz

Instituto de Investigación Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña

belen.marti@upc.edu

1 Introducción

La modelación hidrodinámica en dos dimensiones plantea exigencias de hardware relativas a la capacidad computacional, pero también en lo referente a la dimensión espacial de los datos con los que se alimenten los modelos. Las condiciones iniciales, de contorno o los coeficientes de rugosidad pasan a definirse en dos dimensiones, y la calidad de los resultados dependerá de la precisión con que se determine la dependencia espacial de los datos de entrada. La teledetección ofrece datos y herramientas con las que cartografiar de forma eficaz y competitiva muchos de los parámetros necesarios para la modelación.

Este artículo expone, a modo divulgativo, los usos de la teledetección de mayor interés para la modelación hidrológica e hidráulica. A continuación presenta un ejemplo concreto de la aplicación de imágenes satelitales para la modelación hidrodinámica de las marismas de Doñana.

2 La teledetección para la cartografía terrestre

La teledetección consiste en la adquisición y análisis de imágenes de la Tierra tomadas desde sensores instalados a bordo de aviones o satélites. Estos sensores adquieren imágenes digitales de la superficie del planeta en distintos canales o frecuencias. Cada píxel de la imagen corresponde a un segmento terrestre (de $5 \times 5 \text{ m}^2$, $30 \times 30 \text{ m}^2$, etc., según la resolución espacial del sensor). Para cada píxel, la imagen registra una serie de medidas de radiación electromagnética o espectro, indicativas de las características físicas del segmento correspondiente. Mediante técnicas de teledetección y usando el espectro de cada píxel, la imagen satelital se puede transformar en mapas temáticos o cuantitativos. Ejemplos de estos mapas son los de usos del suelo, de tipo y cantidad de vegetación, de temperatura superficial, humedad del suelo, concentración de clorofila o sedimentos en suspensión en masas de agua, subsidencias o elevaciones milimétricas del terreno, etc.

La teledetección satelital ha experimentado un desarrollo extraordinario desde la década de los 90. En la actualidad existen numerosos sensores satelitales capaces de adquirir datos con los que alimentar modelos en dos dimensiones. Entre las ventajas de esta fuente de información cabe destacar:

- visualización sinóptica de grandes áreas;
- posibilidad de observación de zonas de difícil acceso;
- multitemporalidad de las observaciones;
- homogeneidad respecto al sistema de observación;
- registro de la información en diferentes bandas del espectro electromagnético;
- registro digital de la información;
- costes muy competitivos;
- disponibilidad de información retroactiva.

Existen dos modos muy diferentes de medir energía electromagnética procedente de la Tierra, lo que obliga a una primera clasificación de sistemas de teledetección en activos y pasivos. En los apartados siguientes se exponen las características básicas de ambos sistemas. Para una introducción rigurosa a la teledetección espacial, se recomienda: Chuvieco (1996), Jensen (2000) y Elachi (2006).

2.1 Teledetección pasiva

El sol emite radiación electromagnética en longitudes de onda que van desde los 10^{-13} metros de los rayos gamma hasta los 10^5 metros de las ondas de radio largas. La radiación electromagnética solar, tras ser filtrada por la atmósfera, interacciona con la superficie terrestre y es parcialmente reflejada en todas direcciones. Asimismo, todo cuerpo a temperatura superior a 0° Kelvin emite radiación electromagnética de frecuencias dependientes de su temperatura superficial. En el caso de la Tierra, estas frecuencias se sitúan en la banda de infrarrojo térmico (entre 7 y 14 micrómetros de longitud de onda aproximadamente). Los **sensores pasivos** u **ópticos** miden en unidades de **radiancia ($W/m^2/sterad$)** la energía electromagnética solar reflejada por la Tierra y la radiación térmica emitida por la misma en distintas bandas espectrales o intervalos del espectro electromagnético.

Espectros o firmas espectrales

La cantidad de radiación reflejada depende de las condiciones de iluminación pero la proporción entre la radiación incidente y reflejada, magnitud denominada **reflectancia**, es una propiedad específica de la superficie reflectante. La curva que representa la reflectancia de un material en función de la longitud de onda recibe el nombre de espectro o firma espectral del material y constituye una característica identificativa del mismo (Fig. 1).

Una imagen de teledetección pasiva de la superficie de la Tierra proporciona, en cada píxel, medidas de radiancia en distintas bandas del espectro electromagnético. Mediante técnicas de teledetección, es posible calibrar las imágenes, transformando las medidas de radiancia en reflectancia. De este modo, se obtiene el espectro de cada píxel, con mayor o menor detalle, según la configuración del sensor satelital que adquirió la imagen. Una vez se dispone del espectro, clasificar la imagen consiste en agrupar los píxeles en clases, según la similitud de sus espectros a los de materiales conocidos. De este modo pueden distinguirse píxeles o segmentos de la superficie de la Tierra ocupados por bosque, lámina de agua, cultivos, suelo desnudo, etc., y producir así mapas de usos del suelo tan necesarios, por ejemplo, en estudios hidrológicos (Sobrino and Raissouni, 2000; Horrit, 2006; Helmschrot y Flugel, 2001). Los mapas CORINE de Europa son un excelente ejemplo de cartografía de usos de suelo derivada a partir de imágenes de teledetección, en concreto de las imágenes ópticas de Landsat.

El agua pura, por ejemplo, es un gran absorbente de la radiación electromagnética visible (entre 400 y 700 nm) y especialmente de la infrarroja cercana (entre 700 y 1.500 nm). En consecuencia la reflectancia de las aguas claras es muy baja en el visible y prácticamente nula en el infrarrojo cercano (Fig. 1). Las sustancias presentes en las aguas naturales, como los sedimentos en suspensión o la clorofila, pueden modificar significativamente el espectro del agua pura. El grado de alteración del espectro depende de la concentración de estas sustancias en el agua, y se ha empleado en numerosos estudios de teledetección para producir mapas de concentración de clorofila o sedimentos en suspensión. Se citan a modo de ejemplo: Bustamante et al., 2005; Ruhl et al., 2001; Kutser, 2009.

La vegetación, las algas y en general cualquier organismo que utiliza clorofila A para realizar la fotosíntesis tienen un espectro muy característico en el visible e infrarrojo cercano, como muestran las curvas de la Figura 2. Los organismos fotosintéticos absorben gran cantidad de radiación visible para realizar la fotosíntesis, especialmente radiación azul (entre 400 y 500 nm) y roja (entre 600 y 700 nm). El máximo relativo de reflectancia en la banda verde es el responsable del color de los organismos fotosintéticos. Características estructurales de las hojas son las causantes su elevada reflectividad en el infrarrojo cercano. La diferencia de reflectancia entre ambas bandas depende de la cantidad de vegetación fotosintéticamente activa que existe en el píxel correspondiente, y se emplea para producir los mapas del índice de vegetación, más conocido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Sobrino and Raissouni, 2000; Julien et al., 2006; Sánchez et al., 2008).

El suelo desnudo, al igual que la vegetación, son muy reflectantes en el infrarrojo cercano (Fig. 1). Como las masas de agua apenas reflejan radiación en estas frecuencias, las bandas del infrarrojo cercano permiten discriminar superficies de agua frente a tierra emergida en las imágenes de sensores ópticos.

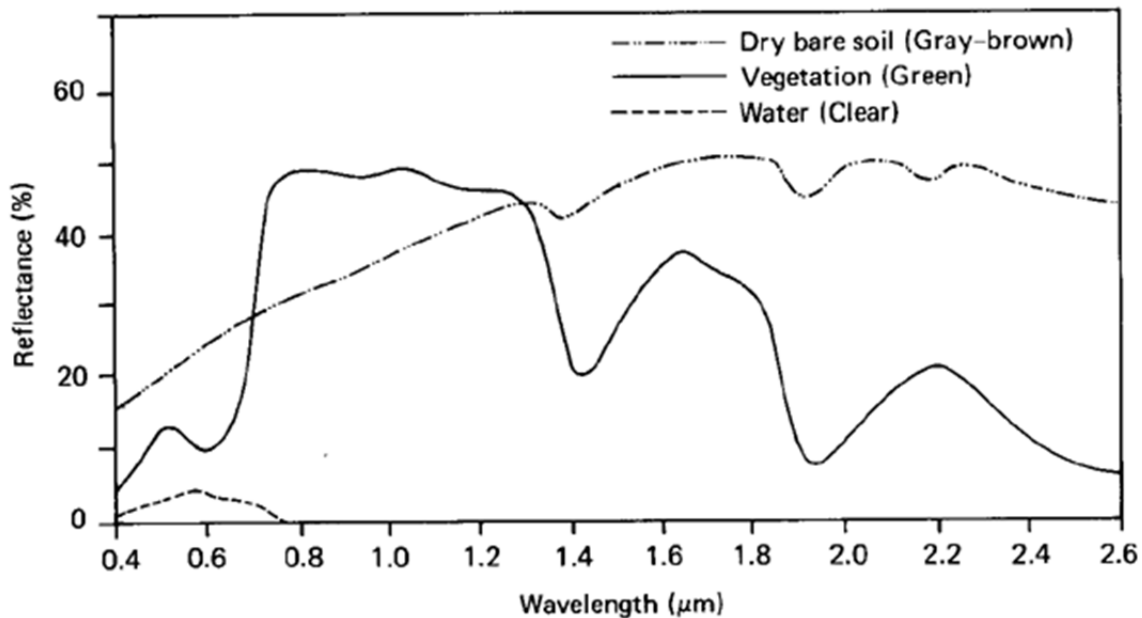


Figura 1 Espectro de agua clara y con limos en suspensión

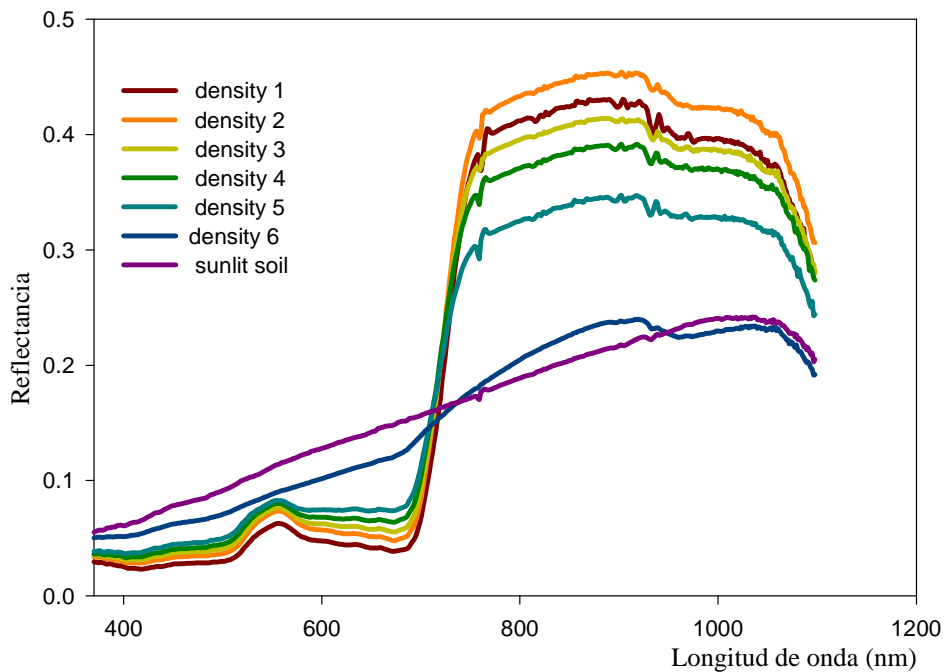


Figura 2 Espectro de vegetación de distintas densidades

2.2 Teledetección activa

Los sensores activos emiten pulsos de radiación electromagnética que iluminan la superficie objetivo y detectan la señal reflejada. El lapso de tiempo entre la emisión de la señal y la recepción de su reflejo permite calcular la distancia a la superficie reflectora. Otras características de la señal reflejada aportan información sobre la naturaleza del reflector. Los sensores activos satelitales capaces de adquirir imágenes son los radares, nombre que tiene su origen en el acrónimo de RAdio Detection And Ranging.

El radar utiliza radiación electromagnética en la región de las microondas (entre 1mm y 1 m de longitud de onda aproximadamente) para crear imágenes de la superficie terrestre. Como proporciona su propia fuente de energía, el radar puede adquirir imágenes durante el día o la noche indistintamente. Por otro lado, gracias a su amplia longitud de onda, las microondas son capaces de atravesar las nubes, la niebla, los aerosoles y la lluvia, salvo la de gran intensidad. Así, las imágenes radar pueden adquirirse a cualquier hora y bajo casi cualquier condición meteorológica.

Midiendo el tiempo de desfase entre la transmisión de un pulso y la recepción del eco producido por distintos objetivos, la distancia al radar de éstos y por tanto su posición puede ser calculada. A medida que la plataforma del radar avanza, la señal reflejada permite construir una imagen bidimensional de la superficie reflectora. La amplitud y fase del eco recibido dependen fundamentalmente de:

a) Factores propios de la configuración del sensor radar: la longitud de onda empleada, su polarización, la dirección de mira y el ángulo de incidencia afectan a cómo el radar “ve” la superficie. Así, imágenes radar tomadas con distintas combinaciones de longitud de onda, polarización y dirección de mira pueden proporcionar información distinta y complementaria de un mismo territorio.

b) Características físicas y geométricas de la superficie reflectora. Los parámetros del terreno que tienen mayor relevancia en la dispersión de las microondas incidentes son: la rugosidad superficial, la constante dieléctrica de la superficie, la cuál depende fundamentalmente de la humedad, y la estructura de la vegetación.

Las imágenes radar son, en general, más complejas de interpretar y analizar que las ópticas o pasivas. El ruido o speckle inherente a estas imágenes dificulta en gran medida la agrupación de píxeles para la producción de cartografía temática. El número de canales o bandas de la imagen, que en el caso de las pasivas a menudo supera la decena, no puede ser mayor de tres en las imágenes radar. Sin embargo, hay características claves de la señal radar que hacen de este sistema la única opción de teledetección viable en determinadas ocasiones o para ciertas aplicaciones: una de estas características es la capacidad del radar para atravesar las nubes y proporcionar imágenes de la Tierra casi independientemente de las condiciones atmosféricas. Esto hace del radar una herramienta imprescindible para observar frecuentemente áreas del planeta con cobertura nubosa abundante. La interferometría, a la que no se ha hecho mención aquí por requerir explicaciones técnicas más allá de la intención divulgativa de este artículo, utiliza datos radar para detectar cambios milimétricos en la elevación de rocas o edificios. Otra aplicación exclusiva de la teledetección radar se basa en su sensibilidad a la rugosidad superficial para cuantificar y cartografiar el oleaje en el océano.

3 Aplicación de la teledetección a la modelación hidrodinámica de las marismas de Doñana

El Espacio Natural de Doñana se encuentra en la margen derecha del río Guadalquivir, junto a su desembocadura en el océano Atlántico. Aproximadamente la mitad del espacio natural, unas 30.000 ha, es zona de marisma que experimenta ciclos anuales de inundación y secado. La intervención humana en Doñana durante buena parte del siglo XX, vinculada básicamente a la actividad agrícola, propició la reducción de la marisma a una cuarta parte de su extensión natural y la profunda alteración de la hidrología de la misma. En 1998 el Ministerio de Medio

Ambiente plantea el proyecto Doñana 2005, destinado a la restauración del sistema hídrico natural de la marisma. Dentro del contexto de Doñana 2005, el Instituto Flumen de la Universitat Politècnica de Catalunya recibió el encargo de desarrollar y calibrar un modelo numérico en dos dimensiones que simule la hidrodinámica de la marisma, y que permita evaluar el impacto de las propuestas de restauración hídrica. El modelo numérico de las marismas de Doñana se construyó en 2007 a partir de la herramienta de modelación hidrodinámica bidimensional Íber.

El desarrollo y calibración rigurosa del modelo hidrodinámico apuntó la necesidad de disponer de observaciones regionales de la marisma, como las proporcionadas por la teledetección, que mostraran la superficie inundada en distintos momentos del año hidrológico. Con el objeto de cartografiar la inundación, Flumen adquirió más de un centenar de imágenes de Doñana del sensor Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) a bordo del satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea (ESA) entre los años 2006 y 2010 (European Space Agency, 2004). Las imágenes ASAR se tomaron en los 7 posibles swaths o ángulos de mira del sensor para aumentar la frecuencia de observación de la marisma, y en polarizaciones HH, y VV. Flumen llevó a cabo la calibración y análisis de las escenas con ayuda de abundante información de campo con el fin de determinar las características de retrodispersión de los principales tipos de cobertura de la marisma (Marti-Cardona et al., 2010). Este análisis permitió la cartografía de la superficie inundada en la marisma a partir de las imágenes Envisat/ASAR. La cartografía de la lámina de agua en distintas fechas ha permitido contrastar la inundación simulada con la observada, y refinar capacidades del modelo, como la del cálculo de arrastre del viento sobre la masa de agua.

3.1 Modelación de la acción hidrodinámica del viento

La tensión ejercida por el viento sobre la superficie del agua es modelada en Íber a través de la expresión (Van Dorn, 1953; Arya, 2001):

$$\tau = \rho C_D U_{10}^2$$

donde ρ es la densidad de agua, U_{10} es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del agua y C_D es un coeficiente de arrastre adimensional. Van Dorn (1953) proporciona formulación empírica para la estimación de este coeficiente a partir de la velocidad del viento. En las estaciones de medida de Doñana se registran de forma continua velocidad y dirección del viento a 2 m de altura. La velocidad a 10 m se estima a través del perfil de viento que proporciona la expresión (Wilson, 1981):

$$\frac{U}{U_r} = \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^n$$

Donde U_r es la velocidad medida, Z_r es la altura a la que se adquirió la medición (2 m) y U es la velocidad del viento a altura Z . El exponente n depende de la estabilidad atmosférica.

Una aproximación más pormenorizada al cálculo del efecto del viento formula el coeficiente de arrastre C_D en función de la estabilidad atmosférica (Arya, 2001 p. 224), la cual puede estimarse a su vez en función del número de Richardson y de la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y el aire (Donelan, 1982, Hsu et al., 1999; Hsu et al., 2003).

3.2 Calibración de la acción hidrodinámica del viento

Dada la llanura de la topografía de Doñana (Ibáñez y Gili, 2008), la inclinación de la superficie del agua debida a la acción del viento puede inundar áreas extensas, apreciables mediante teledetección. El efecto de arrastre del viento sobre lucios de Doñana se ha constatado en diversas imágenes ASAR adquiridas en días de ventosos, como las que se indican en la Tabla 1.

Mediante técnicas de procesamiento de imagen se determinó la superficie inundada en las imágenes y lucios indicados en la tabla. El modelo digital del terreno permitió calcular el volumen de agua contenido entre la mancha de inundación y el terreno.

Tabla 1 Imágenes Envisat/ASAR en las que se observa el efecto hidrodinámico de arrastre del viento

Fecha de adquisición	Configuración ASAR	Lucio modelado
04 Mar. 2006	Image Mode, Swath I2, Pol. HH	Membrillo
23 Mar. 2006	Alternated Polarization Mode, Swath I1, Pol. HH/HV	Membrillo
19 Oct. 2006	Alternated Polarization Mode, Swath I1, Pol. HH/HV	Ánsares
27 Mar. 2008	Alternated Polarization Mode, Swath I1, Pol. HH/VV	Mari López, Lobo

Seguidamente se simuló mediante Íber el desplazamiento de un volumen de agua igual al calculado en cada uno de los lucios, con superficie inicialmente horizontal, y sobre el que actuaba un viento idéntico al que sopló durante las 24 previas a la adquisición de las imágenes de teledetección.

Finalmente se calibró el exponente n del perfil de viento de manera que, usando los datos reales de viento, el desplazamiento simulado del agua reprodujera el observado en las imágenes ASAR.

4 Resultados

El mejor ajuste entre desplazamientos de la masa de agua observados y simulados se logró para valores del exponente del perfil de vientos n entre 0,2 y 0,4. Estos valores son consistentes con medidas directas de este coeficiente encontradas en la literatura (Nickola, 1971), lo que indica la capacidad del modelo Íber para simular de forma realista el efecto hidrodinámico del viento en dos dimensiones en las marismas de Doñana. La Figura 3 muestra el buen ajuste logrado entre la inundación modelada y observada en el lucio de los Ánsares con fecha de 19 de octubre de 2006.

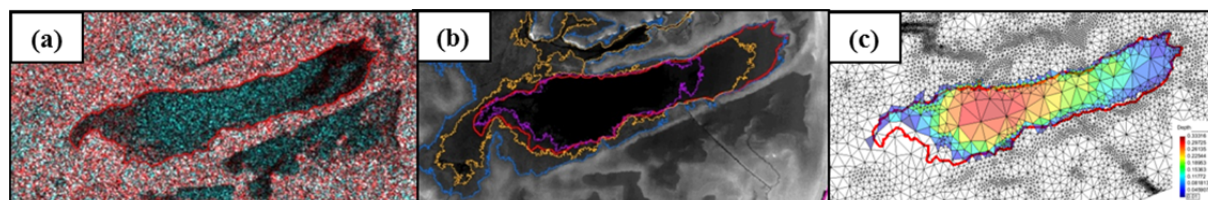


Figura 3 (a) Imagen ASAR del lucio de los Ánsares del 19 de octubre de 2006. La línea roja delimita el perímetro de inundación. (b) Modelo digital del terreno: en violeta, amarillo y azul se destacan las curvas de nivel a cota: 1,00, 1,12 y 1,25 m, respectivamente. (c) En rojo: perímetro de inundación determinado a partir de la imagen ASAR. La malla coloreada muestra la inundación obtenida con Íber en el instante de la adquisición de la imagen.

5 Conclusiones

La construcción de modelos numéricos de simulación en dos dimensiones ha exacerbado la necesidad de disponer de medidas bidimensionales de los datos de entrada a los modelos. La teledetección ofrece la posibilidad de obtener la distribución espacial de variables necesarias para alimentar los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. Tales variables incluyen: mapas recientes de usos del suelo, estimaciones de la cantidad y tipo de vegetación, mapas de coeficientes de rugosidad, mapas indicativos de humedad del suelo, etc.

La cartografía de inundación de Doñana a partir de imágenes satelitales del sensor Envisat/ASAR ha permitido observar en distintas fechas el desplazamiento de masas de agua debido al arrastre del viento. Estas observaciones están posibilitando la calibración del efecto hidrodinámico del viento en el modelo Íber de las

marismas de Doñana. Si bien el proceso de calibración no ha concluido, los resultados obtenidos hasta el momento han sido altamente satisfactorios, como demuestran resultados incluidos en este documento.

Como se ha comentado en el apartado 3.1, el coeficiente n del perfil de vientos propuesto por Wilson (1981) depende de la estabilidad atmosférica y, por tanto, varía en el tiempo dependiendo de las condiciones atmosféricas. Actualmente se está trabajando en la simulación del efecto del viento a través de la aproximación de Arya (2001), que modela la dependencia entre la estabilidad atmosférica y el arrastre del viento. La estabilidad atmosférica se estima a partir de la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y el aire, como proponen Donelan (1982), Hsu et al. (1999) y Hsu et al. (2003). Estas temperaturas se adquieren de forma continua en las estaciones de medida instaladas en la marisma.

6 Agradecimientos

Las escenas Envisat/ASAR usadas en este trabajo fueron proporcionadas por la Agencia Espacial Europea en el marco de un acuerdo de Usuario de Categoría I con el Instituto Flumen. Los trabajos descritos en este artículo se han desarrollado como parte de proyectos financiados por el Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación posibles gracias al soporte del desarrollado como parte de los (proyectos CGL2006-02247/BOS y CGL2004-05503-C02), por la Agencia Andaluza del Agua y por el VII Programa Marco de la European Commission (proyecto RAMWASS GOCE-CT-2006-037081).

Los autores desean expresar su agradecimiento a los investigadores del Espacio Natural de Doñana y de la Estación Biológica de Doñana por su valiosa y siempre amable ayuda.

7 Referencias bibliográficas

- Arya, S.P.S., 2001. "Introduction to micrometeorology" 2 edn., San Diego California, Academic Press.
- Bustamante, J., R. Díaz-Delgado y D. Aragonés, 2005. "Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección", *Revista de Teledetección*, 24: 107-111.
- Chuvieco, E., 1996. "Fundamentos de teledetección espacial" 3rd ed., Madrid, Rialp.
- Donelan, M. A., 1982. "The dependence of the aerodynamic drag coefficient on wave parameters", *Proc., 1st Int. Conf. on Meteorology and Air/Sea Interaction of Coastal Zone*, American Meteorological Society, Boston, 381-387.
- Elachi, C. and Van Zyl, J., 2006. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing* 2nd ed., New York, John Wiley & Sons cop.
- European Space Agency, 2006. "ASAR Product Handbook", ESA.
- Helmschrot, J., W. A. Flugel, 2001. "Land use characterisation and change detection analysis for hydrological model parameterisation of large scale afforested areas using remote sensing", *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 711-718.
- Horritt, M. S., 2006. "A methodology for the validation of uncertain flood inundation models", *Journal of Hydrology*. 326, 153-165.
- Hsu, S. A., Blanchard, B. W. y Yan, Z., 1999. "A simplified equation for Paulson's $C_m(Z/L)$ formulation for overwater applications", *J. Appl. Meteorol.*, 38, 623-625.
- Hsu, S.A., 2003. "Estimating overwater friction velocity and exponent of power-law wind profile from gust factor during storms", *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 129 (4), 174-177.

- Ibáñez, E. y J. Gili, 2008. "Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la marisma del parque nacional de Doñana", PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Jensen, J. R., 2000. "Remote sensing of the environment: an earth resource perspective", Upper Saddle River Prentice Hall.
- Julien, Y., Sobrino, J. A., Verhoef, W., 2006. "Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999", *Remote Sensing of Environment*, Volume 103, Issue 1, 43-55.
- Kutser, T, 2009. "Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters", *International Journal of Remote Sensing*, Volume 30, Issue 17, 4401-4425.
- Nickola, P. W., 1977. "The Hanford 67-Series: a volume of atmospheric field diffusion measurements, Appendix C". Battelle Pacific Northwest Laboratories, Report PNL-2433, UC-11.
- Ruhl, C. A., D. H. Schoellhamer, R. P. Stumpf and C. L. Lindsay, 2001. "Combined Use of Remote Sensing and Continuous Monitoring to Analyse the Variability of Suspended-Sediment Concentrations in San Francisco Bay, California", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 53, Issue 6, 801-812.
- Sanchez, J.M., G. Scavone, V. Caselles, E. Valor, V.A. Copertino, V. Telesca, 2008. "Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region", *Journal of Hydrology*, Volume 351, Issues 1-2, 58-70.
- Sobrino J. A., Raissouni N., 2000. "Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco", *International Journal of Remote Sensing*, Volume 21, Number 2, 353-366(14).
- Van Dorn, W. C., 1953. "Wind Stress on an Artificial Pond", *Journal of Marine Research*, 12.
- Wilson, D. J., 1981. "Along-wind diffusion of source transients", *Atmospheric Environment*, 15(4), 489-495.