

## EFFECTO DE LA INUNDACIÓN SOBRE EL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN DE LAS MARISMAS DE DOÑANA EN DISTINTOS SWATHS Y POLARIZACIONES DE ASAR/ENVISAT

B. Martí (\*), C. López (\*\*), y J. Dolz (\*).

(\*). Grupo FLUMEN, Universitat Politècnica de Catalunya. Jordi Girona 1, D1-208, 08034 Barcelona.  
belen.marti@upc.edu

(\*\*). R.S.Lab. Dept. Teoria Senyal i Comunicacions. Universitat Politècnica de Catalunya. Jordi Girona 1, D3-  
203, 08034 Barcelona.

### RESUMEN

El Espacio Natural de Doñana cuenta con 27.000 ha de marisma que se inundan cada año en otoño y se desecan en verano. El grupo de investigación FLUMEN, de la Universidad Politécnica de Cataluña, dispone de 49 imágenes ASAR/Envisat de Doñana adquiridas en polarizaciones HH y VV, con 6 ángulos de incidencia diferentes, durante el año hidrológico 2006/07. Estas imágenes se adquirieron con el objeto de observar la evolución de la superficie inundada. En este estudio se determina la signatura temporal de los tipos de suelo de la marisma discernibles en las imágenes ASAR y se analiza el efecto de la inundación sobre el coeficiente de retrodispersión de los mismos. Finalmente se extraen conclusiones sobre los swaths más adecuados para determinar la superficie inundada. Éstos dependen del tipo de cobertura, grado de inundación y estado fenológico de la vegetación, pero el swath IS2 en trayectoria ascendente se revela como una buena opción en todos los casos.

### ABSTRACT

Doñana National Park marshes flood every year in autumn and dry out at the beginning of the summer season. The FLUMEN Research Group, at the Technical University of Catalonia, acquired 49 ASAR/Envisat images of Doñana in HH and VV polarizations, and in 6 different incidence angles, during the hydrological year 2006/07. The aim was to observe the flood extent evolution. In this study, the temporal signature of the marshes soil cover types that are distinguishable in the ASAR images is extracted, and the effect of the flooding on the backscattering coefficient of the different cover types is analysed. Finally, conclusions about the most appropriate swaths for flood mapping in Doñana are drawn. These swaths depend on the cover type, inundation level and vegetation phenological stage, but swath IS2 in ascending track shows up as an advantageous option in all cases.

**Palabras clave:** radar, ASAR, Doñana, marisma, inundación, swath, polarización.

### INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional de Doñana está situado en la margen derecha del río Guadalquivir, junto a su desembocadura en el océano Atlántico. Ocupa una superficie de 54.251 ha, aproximadamente la mitad de las cuáles forman las marismas de Doñana. Durante la época de inundación las marismas crean un lugar de paso, cría e invernada crucial para cientos de miles de aves migratorias cada año. Doñana fue declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1980 e inscrito en la lista de Patrimonios de la Humanidad en 1994.

En 1998 el Ministerio de Medio Ambiente planteó el proyecto *Doñana 2005*, destinado a la restauración del sistema hídrico natural de la marisma, fuertemente alterado por la acción del hombre durante buena parte del siglo XX (Saura *et al.* 2001). Dentro del contexto de *Doñana 2005*, el

grupo de investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña recibió el encargo de desarrollar y calibrar un modelo numérico que simule la hidrodinámica de la marisma. La calibración rigurosa del modelo hidrodinámico apuntó la necesidad de disponer de observaciones regionales de la marisma que mostraran la superficie inundada en distintos momentos del año hidrológico. Con el objeto de obtener estas observaciones FLUMEN adquirió 49 imágenes de Doñana del sensor Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) de la Agencia Espacial Europea (ESA) durante el año hidrológico 2006/07.

Este documento describe el análisis que se ha efectuado de las imágenes para determinar las características de retrodispersión de los principales tipos de cobertura de la marisma y el efecto que tiene en ellas la inundación, con el fin último de discriminar la superficie inundada.

## ÁREA DE ESTUDIO

27.000 ha del Espacio Natural de Doñana es zona de marisma. Cada año durante los meses de otoño la marisma se inunda, en mayor o menor proporción según la pluviometría, y se deseca hacia finales de la primavera o principios del verano (Clemente *et al.* 2004). La topografía de la marisma es extremadamente llana, con una diferencia de cota máxima de 2,50 m y pendientes inferiores al 1,3% en el 98% de su superficie. El relieve de la marisma, a pesar de su sutileza, tiene una incidencia trascendental en el hidropériodo o tiempo medio que permanece inundada cada zona, lo cual determina a su vez las especies vegetales que se desarrollan en ella (García, Mintegui y Robredo 2005). A grandes rasgos se distinguen en la marisma: zonas elevadas o paciles, zonas deprimidas, coincidiendo con los centros de los caños y lucios o lagunas, y zonas de transición entre las anteriores, que corresponden a cauces colmatados.

Adaptándose a la capacidad de observación de ASAR y atendiendo al objetivo prioritario de discriminar la superficie inundada, en este estudio se distinguen los siguientes tipos de cobertura:

Las zonas más profundas de la marisma, los **centros de los lucios**, son las primeras en inundarse y las últimas en desecarse, es decir, son las zonas de mayor hidropériodo. Se caracterizan por la ausencia de vegetación y están formadas por suelo arcilloso.

Los **paciles**, las zonas más elevadas, son bancos de sedimentos fluvio-mareales situados entre cauces y lucios. Los paciles sólo se inundan los años de mayor pluviometría y en ellos crecen pastizales como el almajar y el almajar mixto (García, Mintegui y Robredo 2005). El almajar está presidido por *Arthrocnemum macrostachyum* (almajo salado), matorral de altura comprendida entre 0,5 y 1,3 m. El almajar mixto está dominado por el *Arthrocnemum macrostachyum* y el *Juncus subulatus* (candilejo). Ocupa zonas de cota ligeramente inferior al almajar y tiene, por tanto, un hidropériodo algo mayor. Cuando los paciles se inundan, lo hacen con calados que raramente superan los 30 cm, con lo que la mayor parte del almajo queda emergido.

Las **zonas de transición** entre los paciles y el fondo de los cauces y lucios se inundan casi todos los años, y en ellas se desarrollan comunidades de grandes helófitos, fundamentalmente: *Scirpus maritimus* (castañuela) y *Scirpus litorales* (bayunco) (García, Mintegui y Robredo 2005). La castañuela es una hierba de talla comprendida entre 0,6 y 1,0 m. El bayunco es junquiforme y a menudo presenta

alturas superiores a 1 m. Ambas especies comienzan a emerger de la superficie del agua de la marisma a finales de febrero o principios de marzo. Durante la primavera experimentan un crecimiento especular, de forma que sobre abril o mayo ya forman densas masas de vegetación que alcanzan el 90% de cobertura. La castañuela y el bayunco se secan y mueren durante el verano. Sus hojas secas emergen del agua tras las primeras inundaciones del otoño, y acaban por pudrirse y desaparecer bajo la superficie del agua hacia el mes de diciembre.

## DATOS

FLUMEN dispone de cinco estaciones de medida en las marismas de Doñana que registran de forma continua nivel de agua y variables meteorológicas como precipitación y velocidad del viento.

Entre septiembre de 2006 y julio de 2007 el grupo FLUMEN adquirió 49 imágenes ASAR de Doñana en modo de polarización alternada y en los canales de polarización HH y VV. El sensor ASAR utiliza la banda C (5.34 GHz) y está instalado a bordo de Envisat, satélite de órbita heliosíncrona con ciclo de repetición de 35 días (ESA 2006). Cuando funciona en modo de polarización alternada, ASAR proporciona una resolución espacial de 30 m y su swath puede seleccionarse variando el ángulo de elevación del haz de emisión. Existen siete swaths predeterminados que se designan de IS1 a IS7, de menor a mayor ángulo de elevación, aunque durante el período de estudio el swath IS5 no estuvo operativo. La capacidad de direccionamiento del haz de emisión de ASAR permite adquirir hasta 14 imágenes de Doñana en 35 días. Las imágenes de este estudio se solicitaron en los seis swaths operativos de ASAR con el objeto de maximizar la frecuencia de observación.

Coincidiendo con la adquisición de las imágenes ASAR de Doñana se efectuaron diversas campañas de toma de datos de verdad terreno.

## METODOLOGÍA

Todas las imágenes se recibieron de la ESA corregidas por efectos de elevación, diagrama de radiación y range spreading (ESA 2006), y georreferenciadas. La calibración absoluta de las imágenes y determinación del coeficiente de retrodispersión  $\sigma^0$  en cada píxel se efectuó aplicando la expresión (Rosich y Meadows 2004):

$$\sigma^0 = \frac{DN^2}{K} \sin(\alpha)$$

donde:

- $K$  es la constante de calibración absoluta, facilitada para cada imagen por la ESA;
- $DN^2$  es el valor de intensidad del píxel;
- $\alpha$  es el ángulo de incidencia en cada píxel.

Al aplicar esta calibración se asumió terreno llano, es decir, se obvió la corrección del ángulo de incidencia local debido al relieve. Esta simplificación introduce un error relativo máximo en el coeficiente de retrodispersión del 5% en los puntos de pendiente superior a 1.3% (menos del 2% de la superficie de la marisma) en las imágenes de swath IS1, error que desciende por debajo del 1% en los mismos puntos de las imágenes de swath IS7.

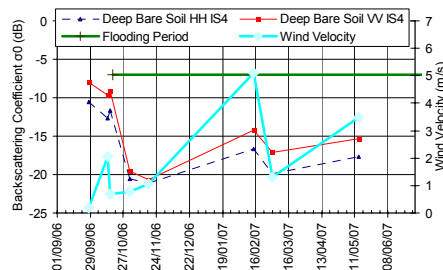
Una vez calibradas las imágenes se definieron 15 regiones de interés, de unos 1000 píxeles (15,6 ha) de extensión cada una, representativas de los principales tipos de cobertura de la marisma. Estas regiones se escogieron de modo que abarcaran áreas aproximadamente homogéneas en cota y vegetación. La ubicación de las áreas de interés es la siguiente: 3 de las 15 regiones se sitúan en el centro de lucios y representan la clase Deep Bare Soil. 7 regiones de interés se han definido en la zona de transición entre centros de lucios y paciles. 4 de estas 7 regiones corresponden a comunidades dominadas por la castañuela y pertenecen a la clase Castañuela. En las 3 regiones restantes domina el bayunco y representan la clase Bayunco. 5 áreas de interés se sitúan en el almajar de los paciles. 2 de ellas se definieron en zonas de almajar mixto que se inundaron durante el período de estudio y se han designado como Lower Almajar. Las 3 áreas restantes permanecieron emergidas y se denominan Emerged Almajar.

Para cada región de interés se calculó el coeficiente de retrodispersión medio (media aritmética) en las dos polarizaciones de las 49 imágenes. La evolución del coeficiente de retrodispersión medio de una clase a lo largo del año constituye su signatura temporal. Así se obtuvo la signatura temporal en el año hidrológico 2006/07 de las principales tipos de cobertura de la marisma, en los seis swaths de ASAR y en las polarizaciones HH y VV.

## RESULTADOS

La signatura temporal de la clase Deep Bare Soil muestra que la retrodispersión de esta clase es superior en polarización vertical que en horizontal en todos los swaths, tanto antes como después de la inundación. Durante el período de

estudio sólo fue posible observar el suelo arcilloso de la clase Deep Bare Soil en 7 fechas de septiembre y octubre de 2006, en swaths IS1, IS3, IS4 e IS6. El coeficiente de retrodispersión medio de estas regiones disminuye en todos los swaths cuando se inundan. La diferencia de  $\sigma^0$  del suelo emergido e inundado es mínima en días de viento intenso debido al aumento de la retrodispersión que produce el oleaje (Ulaby, Moore and Fung 1982). Esta diferencia es similar en HH y VV, y es superior a 3 dB en IS6, 5 dB en IS4 (Figura 1), 3 dB en IS3, y prácticamente nula en IS1.



**Figura 1.-** Signatura temporal de la clase Deep Bare Soil en swath IS4 y velocidad del viento promediada en las tres horas previas a cada imagen.

Las regiones que caracterizan el Emerged Almajar no se inundaron en el año hidrológico 2006/07. En la signatura temporal del Emerged Almajar se observa un comportamiento parejo de  $\sigma_{HH}^0$  y  $\sigma_{VV}^0$ , con un cociente  $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0$  bastante estable a lo largo de año, que toma valores entre 0.7 y 0.8. Las variaciones de  $\sigma^0$  se deben fundamentalmente a la humedad del suelo y se observa su relación con la precipitación caída en los últimos días.

La signatura temporal del Lower Almajar en los días previos a la inundación es similar a la del Emerged Almajar. Cuando las regiones de Lower Almajar se inundan, la retrodispersión HH disminuye ligeramente, mientras que la VV experimenta un reducción importante en los swaths IS2, IS3 e IS4 (de IS1 no hay datos suficientes) de modo que el cociente  $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0$  pasa de valores entorno a 0.75 a valores superiores a 2. En IS6 e IS7 el efecto de la inundación sobre la retrodispersión del Lower Almajar es leve.

En septiembre de 2006 el suelo de la marisma y las plantas de castañuela y bayunco estaban secos. El coeficiente de retrodispersión de las clases Castañuela y Bayunco en este mes es muy bajo, del orden de -15 dB, en los swaths IS3, IS4,

IS6 e IS7. IS1 parece mucho más sensible a estas condiciones, y muestra valores de retrodispersión alrededor de -6.5 db. En IS2 no se dispone de datos previos a la inundación. Tras las primeras lluvias de octubre, que humedecen el suelo sin llegar a inundarlo,  $\sigma^0$  aumenta en unos 4 dB en todos los swaths. Una vez inundadas, y antes de que emerja la vegetación en primavera, la retrodispersión de la clases Bayunco y Castañuela es la de la superficie de agua libre, con valores cercanos al nivel de ruido de ASAR (-20dB) en IS6 e IS7, y básicamente condicionada por la velocidad del viento en el resto de los swaths. A principios de marzo la castañuela y el bayunco verdes comienzan a emerger de la superficie del agua, lo que provoca el doble rebote de la señal radar (Ulaby, Moore and Fung 1982). La magnitud de este fenómeno se incrementa a medida que la vegetación se desarrolla en altura y densidad. Como consecuencia, la retrodispersión del Bayunco y Castañuela aumenta a lo largo de la primavera, alcanzando en el mes de mayo incrementos de  $\sigma^0$  HH del orden de 15 dB en en swaths IS2 e IS3. La signatura temporal de las clases Bayunco y Castañuela es semejante en otoño e invierno. En primavera, sin embargo, la retrodispersión del Bayunco es notablemente superior.

## CONCLUSIONES

Los resultados indican que el coeficiente de retrodispersión de la clase Deep Bare Soil disminuye considerablemente con la inundación en los swaths IS3, IS4 e IS6 (presumiblemente también en IS7). Así pues, estos swaths permiten discriminar la inundación en los suelos del tipo Deep Bare Soil. El oleaje inducido por el viento aumenta la señal de la superficie de agua libre en IS1 (y probablemente en IS2), y dificulta el distinguirla del suelo desnudo emergido. Los registros meteorológicos de Doñana muestran claros ciclos diarios de velocidad de viento, siendo ésta aproximadamente de calma en la primera mitad del día. ASAR toma imágenes de Doñana en trayectoria ascendente alrededor de las 10:30 horas, con lo que una posibilidad de evitar en muchos casos el efecto del oleaje en las imágenes IS1 e IS2 es solicitarlas en trayectoria ascendente.

En cuanto al almajar de los paciles, los resultados son contundentes: muestran claramente que la inundación es discernible en IS2, IS3 e IS4, y no lo es en IS6 e IS7. En situaciones de cota de inundación elevada que afecte a los paciles, los swaths IS6 e IS7 no son apropiados.

El coeficiente de retrodispersión en swaths IS3, IS4, IS6 e IS7 de las clases Castañuela y Bayunco tras el verano, cuando la vegetación y el

suelo están muy secos, toma los mismos valores que cuando estas clases están inundadas, antes de que emerja la vegetación verde. Así, la determinación de la inundación de este tipo de cobertura en los swaths mencionados no puede basarse exclusivamente en el coeficiente de retrodispersión y debe contemplar datos auxiliares como época del año o precipitaciones recientes. De todos modos, el swath IS1 (y probablemente también el IS2) sí parece distinguir la superficie de agua libre de la de castañuela y bayunco con suelo seco.

En primavera la castañuela y el bayunco inundados son identificables en todos los swaths. En IS2, IS6 e IS7 (no hay suficientes datos en IS1), sin embargo, se observan las mayores diferencias entre ambas especies vegetales, que no son discriminables en las imágenes de otoño e invierno.

## BIBLIOGRAFÍA

Clemente, L., Ventura-García, L., Espinar, J. L., Cara, J. S. and Moreno, A. 2004. Las marismas del Parque Nacional Doñana, *Investigación y Ciencia*.

ESA 2006. *Envisat ASAR Product Handbook*, Is.2.1

García, J. I., Mintegui, J. A. and Robredo, J. C. 2005. *La vegetación en la marisma del Parque Nacional de Doñana en relación con su régimen hidráulico*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Rosich, B., and Meadows, P. 2004. Absolute calibration of SAR Level-1 products generated with PF-ASAR. *ESA technical note*, version 1.4, 23.01.

Saura, J., Bayán, B., Casas, J., Ruiz de Larramendi A. and Urdiales, C. 2001. *Documento marco para el desarrollo del proyecto Doñana 2005*, Ministerio de Medio Ambiente, Sevilla.

Ulaby, F. T., Moore, R. K. and A.K. Fung 1982. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. II*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.