

## APLICACIONES DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA EN LAS ZONAS COSTERAS DE LA BAHÍA DE CÁDIZ

Rojas J.L. (\*)-Camacho J.C. (\*)- Gómez-Enri J. (\*)-Muñoz-Nieves S. (\*)-Catalán M. (\*)-Villares P. (\*)-  
(\*) Departamento de Ingenierías de Sistemas y Automática. Escuela Superior de Ingeniería. (Universidad de Cádiz). C/. Chile s/n Cádiz, España.  
(\*) Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar (Universidad de Cádiz). Polígono Río San Pedro-Puerto Real. Cádiz, España.

### RESUMEN

*Se han analizado datos del Radar de Apertura Simétrica (SAR) procedentes del primer Satélite Europeo de Teledetección ERS-1 sobre el área de la Bahía de Cádiz en los años 1993 y 1995 bajo condiciones meteorológicas similares. Los patrones de respuesta observados en las imágenes podrían estar asociados con la existencia de dunas de arena submarinas, con por fenómenos atmosféricos de mesoescala, que afectan a la rugosidad de la superficie, y con el oleaje. Otros aspectos introducidos en este estudio, que se relacionan con la dinámica del litoral, son la detección de erosiones y derivas sedimentarias que se ocasionan en las playas. Finalmente, se han analizado diversos modos de absorción en las zonas dedicadas a salinas, que pudieran proporcionar un modelo de refracción según las diversas concentraciones de sal. Los resultados preliminares que se han obtenido permiten establecer estas relaciones y abren nuevas expectativas de investigación.*

### INTRODUCCIÓN

El radar de apertura sintética (SAR) constituye un elemento importante en la teledetección. Al ser un sensor activo que emplea las bandas de frecuencias de radiación (el ERS-1 opera en la banda C a 5.3 GHz) en donde la absorción debida al oxígeno y al vapor agua, es prácticamente nula, por lo que puede ser utilizado independientemente de la hora del día y de las condiciones atmosféricas sobre el terreno donde opera [1]. Pero, aun siendo esto importante, destaca, especialmente, sobre otros sensores por su resolución espacial, que es independiente de la altitud del satélite, y que permite el estudio de alteraciones en tierra o mares en el orden de los metros.

Las cualidades físicas que influyen en la reflectibilidad del radar son: la constante dieléctrica  $\epsilon$ , que da lugar a los conocidos efectos de polarización (permitividad  $\epsilon'$ ) y absorción (pérdida  $\epsilon''$ ) del medio donde incide, y la rugosidad de la superficie, en donde los efectos de difracción de Bragg originan pérdidas de señal por interferencia.

La primera de estas propiedades ha sido empleada en el estudio de la formación y evolución de los hielos del Ártico y la Antártida. La aparición de hielos flotantes y su evolución espacio-temporal por consolidación, variación de densidad por fusión-

aportación de sustratos de diversa composición o estructura y la incidencia de la batimetría se reflejan en los trabajos de Winebrenner y West[2], Drinkwater [3] y Barber et al[4].

Datos del SAR sobre el océano han sido estudiados ampliamente, de forma descriptiva [5], Vesecky and Stewardt) y teóricamente [6][7].

El radar responde a la rugosidad de la superficie y por esto a la interacción atmósfera-océano que afectan al espectro de las olas, y es básico en la operación del escaterómetro de viento en satélites. Los estudios con el SAR incluyen la propagación de olas superficiales y oleaje, ondas internas, corrientes turbulentas y remolinos, batimetría, barcos y sus estelas y manchas de petróleo [8].

Es también conocido que los fenómenos atmosféricos de mesoescala sobre el océano afectan a la rugosidad de la superficie y son, por tanto, detectables por el radar. Algunos ejemplos son las ondas atmosféricas de gravedad, frentes de chubascos asociados a tormentas tropicales [9] y rodillos convectivos atmosféricos[10]. Asociados a estos fenómenos atmosféricos de mesoescala se encuentra una superficie del mar variable con el viento que modula la rugosidad de corta escala y esta a los ecos del radar o sección de corte normalizada del radar (SCNR) de la superficie marina. Si la relación entre SCNR y la velocidad del viento en la superficie del mar es conocida, las variaciones en la intensidad de la imagen (en sistemas de radar lineales son proporcionales a la SCNR), pueden ser convertidas en variaciones de la velocidad en la superficie del mar (para el SAR del ERS-1 esta relación está dada por la llamada función modelo CMOD4).

### METODOLOGÍA

Se seleccionaron tres imágenes en el formato "Precision Image" (PRI) proporcionados por la ESA (fig. 1) sobre el golfo de Cádiz, que comprenden un área de 100x110 Km. y tomadas durante las fechas 27/01/93, 4/04/95 y 27/10/95. Estas imágenes están en proyección terrestre (ground range) y "multi-look", es decir se obtienen de la descomposición y promediado de bloques de datos (tres) proporcionados por el Doppler en distintos pulsos. La resolución espacial es de 12,5 x 12,5 m por pixel y los valores proporcionados son enteros de 16 bits en unidades arbitrarias. El valor digital  $n_p$  de cada pixel, se

relaciona con la sección eficaz de retrodispersión (backscattering)  $\sigma^0$  [11] según la expresión

$$n_d^2 = K(\alpha)\sigma^0$$

en donde  $K(\alpha)$  es una función que depende del ángulo de incidencia local dado por

$$K(\alpha) = K \frac{\text{sen } \alpha_{ref}}{\text{sen } \alpha}$$

siendo ahora  $K$  la constante de calibración, que proporciona la agencia en sus datos.

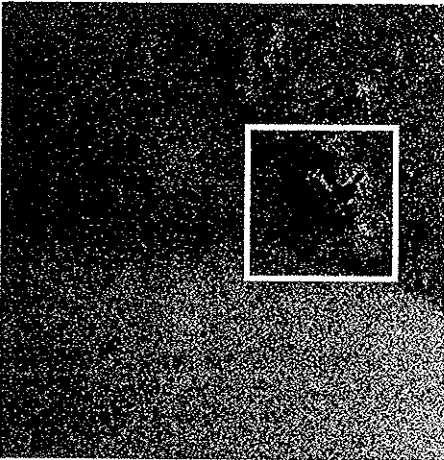


Fig. 1. Escena del SAR sobre el Golfo de Cádiz, perteneciente a la órbita 22398, del 27 de octubre de 1995, correspondiente a un área de 100x110 Km.

Estas conversiones se han practicado en las secciones transversales seleccionadas, mientras que el conjunto de los datos se comprimieron al rango de

256 valores, para la representación y tratamiento de las imágenes, resolución que no ha mermado significativamente los resultados obtenidos.

La selecciones de estas escenas por homogeneidad de las condiciones atmosféricas locales (vientos suaves), han permitido un análisis comparativo en el área de la Bahía de Cádiz (fig. 2) en las que se muestran diversas zonas de refracción que caracterizan las condiciones de las proximidades de la costa, en donde los suelos arenosos y húmedos de las playas se sumergen bajo el agua dando patrones de respuesta que podrían relacionarse con las condiciones de oleaje y con el efecto de la batimetría del litoral. Este fenómeno puede compararse en otras zonas de marisma y de salinas en donde tales variables no afectan y si lo hacen, las condiciones del relieve o de las características de absorción de los componentes disueltos en las aguas someras.

Particular mención cabe hacerse de la imagen correspondiente al día 27/10/1995, en la que aparecen estriados quasi-periódicos que semejan a las manifestaciones sobre la superficie del mar de la capa límite de los rodillos atmosféricos que fueron observados, primeramente, en las imagenes SAR en la banda L sobre el oceano Atlantico fuera de las costas de Florida desde aviones de la National Aeronautics and Space Administration (NASA)[10] y más tarde con el SAR de banda L del SEASAT [5], desde el trasportador espacial Columbia en el experimento Shuttle Imagine Radar-A (SIR-A) y en los trabajos de Alpers y Brümmer [12] sobre imagenes del SAR en el ERS-1.

Sobre esas imágenes se escogieron secciones significativas en el mar, en la zona de playa y áreas de salinas. Tanto en secciones de mar, como las del litoral comprenden 100 metros de ancho por lo que cada valor representa un área de 100x12,5 m.

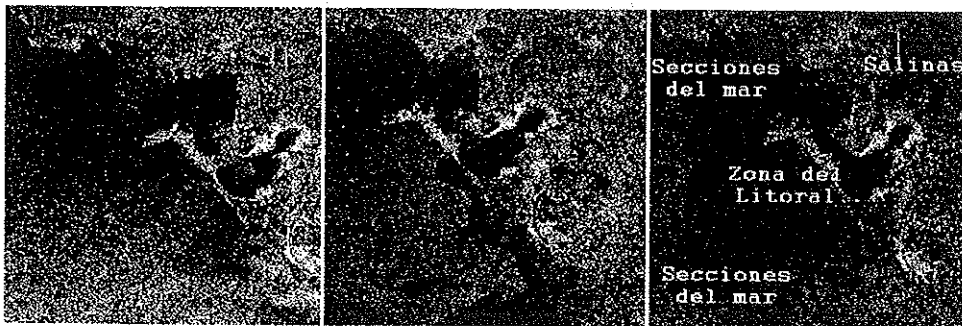


Figura 2.- Zonas seleccionadas de imagenes del SAR del ERS-1 sobre la Bahía de Cádiz. a) Imagen tomada el 27 de enero de 1993; b) imagen correspondiente al 4 de abril de 1995; c) imagen del 27 de octubre de 1995. Sobre esta última se señalan las secciones y áreas del estudio.

El estudio de secciones transversales en las proximidades de las costas que se señalan en las imágenes, proporcionan los datos que se representan en la figura 3. Bajo condiciones de viento favorables ( $< 2\text{ms}^{-1}$ ), las secciones tomadas de la imagen del 27/10/95 que se observa en la gráfica intermedia, presentan una disminución de los valores de  $\sigma^0$  al acercarse a la costa, lo que podría, en este caso, relacionarse con la batimetría. El análisis de Fourier efectuado sobre un conjunto de secciones de la misma imagen (Fig. 4) muestran longitudes de onda ( $\lambda$ ) (distancia entre crestas) que oscilan entre 90 y 120m aproximadamente. Este efecto no aparece en las restantes imágenes.

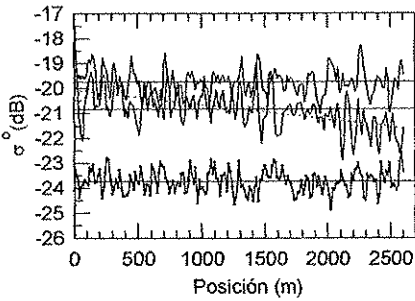


Fig. 3. Secciones transversales correspondientes a las escenas a) b) y c) en la zona exterior de la bahía.

Los anteriores resultados, hacen poco probable establecer una correlación de los estriados cuasi-periódicos detectados con los rodillos atmosféricos a que hemos aludido y están más próximos a los patrones de estriados estudiados en las costas

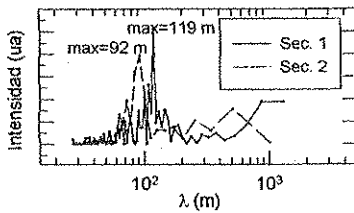


Fig.4. Valores de las transformadas correspondientes a dos secciones de mar en la imagen del 27/10/95.

holandesas[13], en donde existen ondulaciones de arena de 2 a 6 m de altura y una distancia entre crestas de 400 m. En general, otros estudios que analizan las respuestas en radares de diferentes bandas, sugieren que las condiciones en superficie, fundamentalmente producidas por el viento, interfieren sobre reflexiones que podrían originarse

en la batimetría, siendo en la banda C en donde esta interferencia se hace más pronunciada. Todo lo anterior sugiere como improbable la presencia de estos patrones de batimetría en las imágenes obtenidas del ERS-1.

**Zona del litoral:**

En las proximidades del litoral el coeficiente de reflexión disminuye hasta casi su anulación lo que parece indicar una gran absorción de las zonas de playa arenosas y húmedas. Este fenómeno permite analizar la dinámica del litoral y terrenos de aluvión su relación con las variantes climáticas y antrópicas. En la fig. 5 se han representado los coeficientes de reflexión media sobre 100 m. en la línea de playa en tramos consecutivos. Frente a ellos se han representado los niveles del mar correspondientes. La evolución de la marea parece estar presente en el aumento de la reflexión en lugares más próximos a la línea de costa que se corresponde con el límite urbano. La figura inferior (1/93) eleva el perfil en esta línea lo que podría estar relacionado con la existencia de mayores depósitos de arena que las corrientes han rebajado en el año 1995.

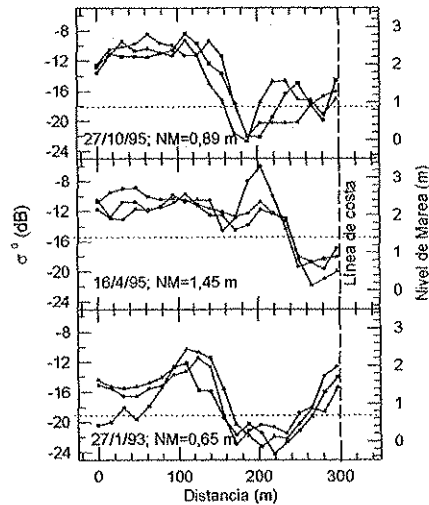


Fig. 5. Secciones transversales de las imágenes sobre la línea del litoral y niveles relativos de marea.

**Zona de salinas:**

Las zonas de salinas se caracterizan por una concentración de sales y materia orgánica en suspensión que se incrementa desde la primavera al final del verano. Los estudios practicados sobre salinas de gran extensión muestran promedios del histograma de valores de  $\sigma^0$  que señalan esa correlación (fig. 6), lo que nos sugieren la necesidad de realizar un estudio en mayor profundidad para establecer cuantitativamente las relaciones existentes mediante medidas in-situ de las concentraciones y

otras variables físico-químicas que pudieran influir en las correspondientes imágenes.

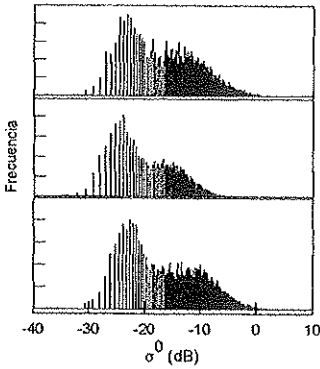


Fig.6 Histogramas correspondientes a las salinas los días a) 27 de octubre de 1995, b) 16 de abril de 1995 y c) 27 de enero de 1995.

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Del estudio efectuado con el radar de apertura sintética del satélite ERS-1 en el entorno de la Bahía de Cádiz se deduce que en esta zona se dan eventualmente determinadas condiciones de oleaje y viento en la superficie marinas adecuadas, para el posible estudio de la batimetría costera con el radar de apertura sintética en la banda C. Las imágenes estudiadas muestran la posible existencia de dunas u olas de arena en el fondo marino que aparecen en determinadas condiciones meteorológicas. Su ausencia en otras imágenes puede ser debida a las especiales condiciones de las corrientes de deriva del litoral o al efecto de interferencias locales. Otras variables que afectan las zonas litorales y su incidencia sobre las reflexiones del radar son la producción de partículas y residuos en suspensión originados por ríos o emisarios.

El análisis de datos de costa sugiere que si bien la influencia de las variables meteorológicas es importante, el SAR ofrece amplias posibilidades para el estudio de la dinámica del litoral complementando la información existente en las bases de datos disponibles. El estado de las mareas y niveles del mar son factores conocidos, y por tanto, eliminables respecto de la repercusión sobre las variables de interés. Respecto de los datos medidos en las salinas es evidente que el grado de concentración afecta a las imágenes presentando un especial interés para el estudio de las aplicaciones que se deriven para conocer los efectos adicionales en estuarios, emisarios, etc.

### AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Investigación de Teledetección (G.I.T.) quiere agradecer al programa de acciones integradas su apoyo a través de la acción 182B, a la

Agencia Europea Espacial la información sobre el ERS-1 dentro del programa A02.E101, a la agencia AVISO, así como al Eurimage Radarsar Spot-Image Consortium por las facilidades en el suministro de datos del SAR.

### BIBLIOGRAFÍA

1. J.C. Curlander and R.N. McDonough: Synthetic Aperture Radar. System and Signal Processing., *J. Wiley & sons* (1991),
2. D.P. Winebrenner, E.D. Nelson and R. Colony, Observation of melt onset on multiyear Arctic sea ice using the ERS-1 synthetic aperture radar. *J. Geophys. Res.* 99, C11, 22 425(1994).
3. M.R. Drinkwater LIMEX'87 ice surface characteristics: Implication for C-band SAR backscatter signatures, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27(5), 501, (1989).
4. D.G. Barber and T.N. Papakyriakou, On the relationship between energy fluxes, dielectric properties, and microwave scattering over snow covered first-year sea ice during the spring transition period. *J. Geophys. Res.*, 99, C11, 22401(1994).
5. L.L. Fu and B. Holt, Seasat views oceans and ice with synthetic-aperture radar, *JPL Publ.* 81 (1982)
6. Vesecky, J.F. and R.H. Steward, The observation of ocean surface phenomena using imagery from Seasat synthetic aperture radar: An assesment, *J. Geophys. Res.*, 87, 3397 (1982).
7. Hasselmann, K., R.K. Raney, W.J. Plant, W. Alpers, R.A.Shuchman, D.R. Lyzenga, C.L. Rufenach and M.J. Tucker, Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: A MARSEN View, *J. Geophys. Res.*, 90, 4659 (1985).
8. Fu, L.-L., and R.H. Holt, Some examples of detection of oceanic mesoscale eddies by the Seasat synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 88, 1844 (1983).
9. Thomson, R.E., P.W. Vachon and G.A. Borstad, Airborne synthetic aperture radar imagery of atmospheric gravity waves, *J. Geophys. Res.* 97, 14249 (1992).
10. Thomson, T.W., W.T. Liu and D.E. Weissman, Synthetic aperture radar observation of ocean roughness from rolls in an unstable marine boundary layer, *Geophys. Res. Lett.*, 10, 1172 (1983).
11. H. Laur et al, *Derivation of Backscattering coefficients  $\sigma^0$  in ESA ERS SAR PRI Product*, ESA ES-TN-RS-PM-HL09, 1996
12. Alpers, W. and B. Brümmer, Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite, *J. Geophys. Res.*, 99, C6, 12613 (1994).
13. Vogelzang, J., G.J. Wensink, C.J. Calkoen y M.W.A. Van der Koöij, Mapping submarine sand waves with multiband imaging radar, *J. Geo. Res.* 102, C1, 1183(1997).