

# Las marismas costeras como archivos geológicos de las variaciones recientes en el nivel marino

## *Coastal salt-marshes as geological archives of recent sea-level changes*

Ane García-Artola <sup>(1)</sup>, Alejandro Cearreta <sup>(1)</sup>, Eduardo Leorri <sup>(2)</sup>, María Jesús Irabien <sup>(3)</sup> y William H. Blake <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Micropaleontología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco/EHU, Apartado 644, 48080 Bilbao. E-mail: anetxu456@hotmail.com, alejandro.cearreta@ehu.es.

<sup>(2)</sup> Department of Geological Sciences, East Carolina University, Graham Building, Room 103b, Greenville, NC 27858-4353, USA. E-mail: leorrie@ecu.edu.

<sup>(3)</sup> Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco/EHU, Apartado 644, 48080 Bilbao. E-mail: mariajesus.irabien@ehu.es.

<sup>(4)</sup> Consolidated Radioisotope Facility, University of Plymouth, Plymouth, UK. E-mail: william.blake@plymouth.ac.uk.

### ABSTRACT

*In order to evaluate the accuracy and regional significance of salt-marsh reconstructions of former sea level based on foraminiferal transfer functions, we have calibrated the foraminiferal assemblages of a salt-marsh core from the Urdaibai estuary using the regional transfer function constructed previously for the southern Bay of Biscay. The foraminifera-based reconstructions were placed into a temporal framework using Pb-210, heavy metal concentrations, and Cs-137-derived sediment accumulation rates. The resulting relative sea-level curve has been compared with the nearest tide-gauge data (Santander) and with other geological records from regional salt-marshes. Relative sea-level trends from core sediments support in all cases the idea of accelerating sea levels over the last century when compared to previous centuries, providing a regional relative sea-level rise of 2.0 mm yr<sup>-1</sup> for the 20th century.*

**Key words:** Salt-marsh foraminifera, transfer function, geochemical dating, sea level, southern Bay of Biscay.

*Geogaceta*, 47 (2009), 109-112  
ISSN: 0213683X

### Introducción

La posible estimación de las variaciones recientes en el nivel marino a partir del registro sedimentario obtenido en las marismas costeras ofrece un gran potencial para complementar la base global de observaciones instrumentales del nivel marino obtenida a partir de los mareógrafos. De hecho, la investigación de los depósitos marismesños recientes en el Atlántico norte ha aportado la primera indicación de que las velocidades relativas del ascenso marino durante los últimos 100 años en esta región parecen ser más rápidas que la velocidad de ascenso detectada a medio plazo (800-1000 años) y de que el momento temporal de esta aceleración puede estar relacionado con el cambio climático de origen antrópico en curso (Gehrels *et al.*, 2002; Donnelly *et al.*, 2004). Durante los últimos años, a partir del desarrollo de las funciones de transferencia basadas en foraminíferos, se han producido avances significativos en las reconstrucciones de alta resolución del nivel marino (Hayward *et al.*, 2004; Horton y Edwards, 2006). Los foraminíferos presentes en las secuencias sedimentarias se han utilizado como indicadores de las variaciones en la eleva-

ción de las marismas mediante la cuantificación de la relación actual existente entre los datos microfaunísticos (abundancia relativa de las diferentes especies) y los datos ambientales (elevación) en los ambientes de marisma. Estas relaciones actuales han sido posteriormente aplicadas a los registros sedimentarios de los sondeos con el fin de reconstruir los antiguos niveles mareales a partir de las asociaciones enterradas (subfósiles) que permiten determinar la elevación de las superficies de las paleomarismas. En la zona meridional del Golfo de Vizcaya, Leorri *et al.* (2008) han desarrollado una función de transferencia basada en foraminíferos actuales procedentes de diferentes marismas de la costa vasca. La relación entre la elevación observada y la determinada por los foraminíferos era muy robusta, permitiendo así reconstrucciones precisas de los niveles marinos pretéritos con rangos de error entre 0,11 y 0,19 m. En ese mismo trabajo, la función de transferencia fue utilizada para calibrar las asociaciones de foraminíferos presentes en un sondeo de 50 cm de longitud perforado en la marisma de Ostrada (Ría de Plentzia). Posteriormente, Leorri y Cearreta (2009) reconstruyeron las variaciones en el nivel

marino reciente a partir del análisis de otro sondeo perforado en la marisma de Muskiz (Ría de Muskiz). La curva del nivel marino así obtenida muestra una gran similitud con los datos procedentes de los mareógrafos regionales, sugiriendo una velocidad de ascenso del nivel marino relativo en esta zona costera de aproximadamente 2,0 mm año<sup>-1</sup> para el siglo XX.

Por otra parte, Tel y García (2001) y Marcos *et al.* (2005) estudiaron las variaciones recientes (años 1943-2001) del nivel marino en la costa norte de España mediante el análisis de los datos procedentes de los mareógrafos con los registros más dilatados en esta zona costera (Vigo en la costa atlántica, y A Coruña y Santander en la costa cantábrica). Tel y García (2001) calcularon una velocidad media de 2,08 mm año<sup>-1</sup> de ascenso relativo del nivel marino (2,32 mm año<sup>-1</sup> después de corregir los efectos del rebote isostático postglacial) en sintonía con las tendencias del nivel marino observadas posteriormente por Marcos *et al.* (2005). Además, Marcos *et al.* (2007) analizaron las series temporales del nivel marino procedentes del altímetro TOPEX y de los mareógrafos del Golfo de Vizcaya durante el periodo 1993-2002. El ascenso medio del nivel marino aportado por los datos del

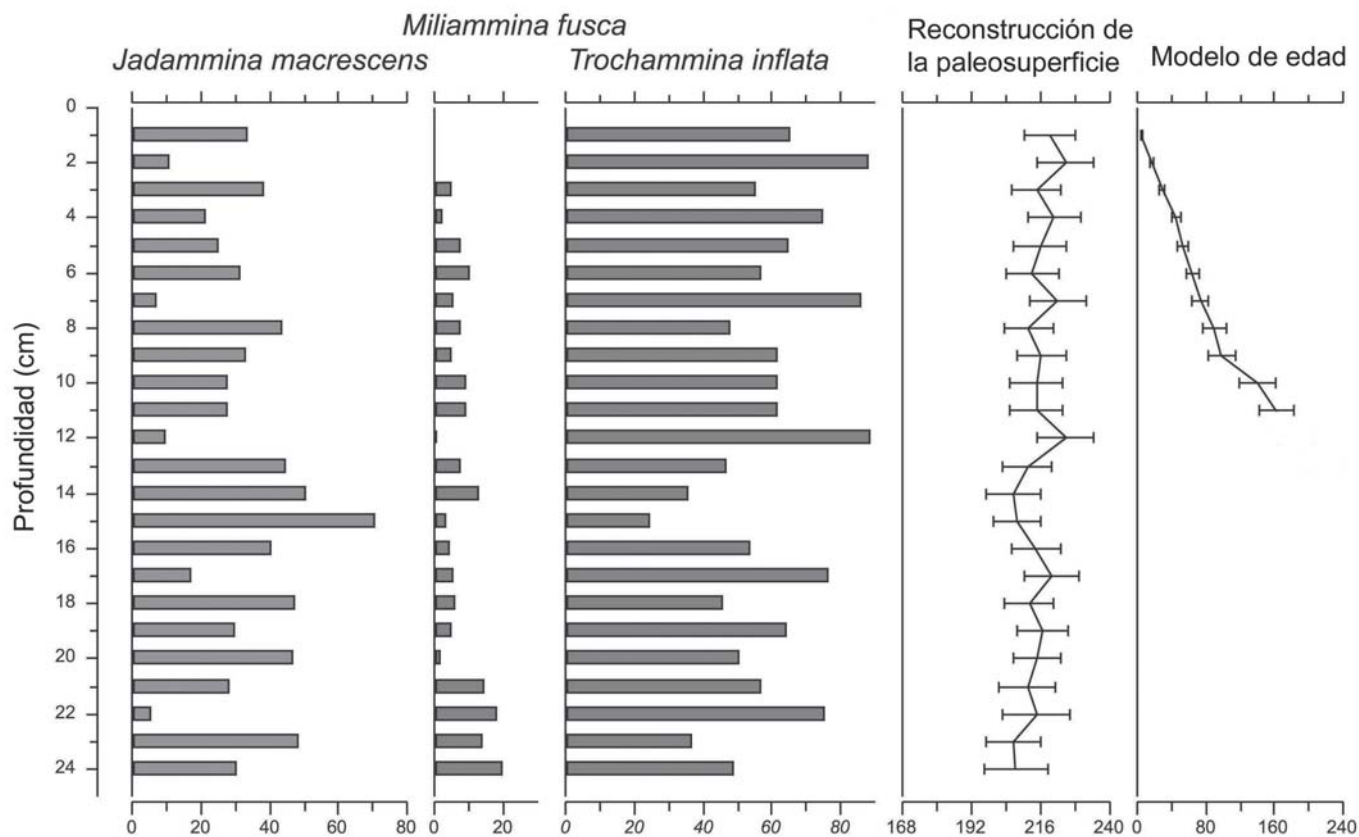


Fig. 1.- Abundancia relativa de las principales especies de foraminíferos, paleoelevación reconstruida a partir de la función de transferencia y edad derivada de las tasas de sedimentación en función de la profundidad (cm) en el sondeo Kanala (estuario de Urdaibai).

Fig. 1. – Relative abundance of main foraminiferal species, predicted paleoelevation produced by the transfer function and sedimentation rates-derived age with depth (cm) for the Kanala core (Urdaibai estuary).

altímetro TOPEX fue de  $3,09 \pm 0,21$  mm año<sup>-1</sup>, similar a la velocidad estimada de ascenso global del nivel marino, mientras que los mareógrafos aportaron un valor medio de  $3,89 \pm 0,62$  mm año<sup>-1</sup> ( $2,01 \pm 0,85$  mm año<sup>-1</sup> corrigiendo los movimientos verticales terrestres mediante registros GPS).

El análisis de sondeos aislados en diferentes estuarios podría reflejar con mayor intensidad los procesos locales en detrimento de los procesos de carácter más regional. Sin embargo, se considera que tanto las señales regionales como las de carácter más global debieran de aparecer registradas en las diferentes áreas marismeñas y además ser coincidentes con los registros de los mareógrafos. En consecuencia, en este trabajo se aplica la función de transferencia desarrollada previamente por Leorri *et al.* (2008) a los primeros 24 cm de longitud de un sondeo recogido en la marisma de Kanala (Reserva de la Biosfera de Urdaibai). Se describe la aplicación de esta función de transferencia y se evalúa asimismo su capacidad para la reconstrucción de las variaciones en la elevación de la superficie de paleomarisma. Se compara esta reconstrucción tanto con la curva del nivel marino previamente obtenida a partir de las

marismas de Ostrada y Muskiz como con los datos del mareógrafo regional de Santander, a fin de obtener una evaluación cuantitativa del potencial de los foraminíferos intermareales en la investigación del nivel marino relativo en la costa sur del Golfo de Vizcaya.

**Materiales y Métodos**

En Marzo 2004 se perforó un sondeo de 38 cm de longitud en la marisma de Kanala (Reserva de la Biosfera de Urdaibai), aunque en este trabajo se presentan únicamente los resultados obtenidos en los 24 cm más superficiales que, en base a las tasas de sedimentación determinadas, corresponden a los últimos 430 años. La compactación del sedimento durante el muestreo fue inapreciable debido a su carácter mineralogénico y al gran diámetro del tubo utilizado. La marisma de Kanala se encuentra situada en la mitad inferior del estuario de Urdaibai y se caracteriza por la presencia de *Juncus maritimus* como vegetación dominante (Gobierno Vasco, 1996). El estuario de Urdaibai está constituido por la sección del río Oka sometida a la influencia mareal, ocupa un área de 22.000 ha, y presenta 12,5 km de longitud y 1 km de anchura media. El

estudio de fotografía aérea e histórica indica que la zona seleccionada no ha sido previamente ocupada con fines agrícolas. Además, el análisis sedimentológico no ha revelado ningún horizonte agrícola en el sondeo como los que han sido identificados en otras zonas marismeñas del litoral cantábrico (e.g. Cearreta *et al.*, 2002). Dos tubos de PVC (12,5 cm de diámetro) fueron insertados en el sedimento con el fin de obtener suficiente material para determinar el tamaño de grano, el contenido en foraminíferos bentónicos, las características geoquímicas del sedimento, y la geocronología Pb-210 y Cs-137. El sondeo fue descrito y fotografiado antes de ser muestreado en secciones de 1 cm de espesor. Asimismo, fue determinada la elevación topográfica de la zona perforada (GPS Leica de doble frecuencia, RTK; error:  $\pm 0,035$  m) y esta información se presenta en relación al nivel 0 regional (bajamar más extrema del Puerto de Bilbao, 27 de Septiembre 1878; situado 1,73 m por debajo del nivel marino establecido en Alicante).

Con el fin de aplicar correctamente la función de transferencia previamente establecida, se ha calculado la frecuencia de inundación de cada punto de muestreo dentro de la secuencia sedimentaria, y se

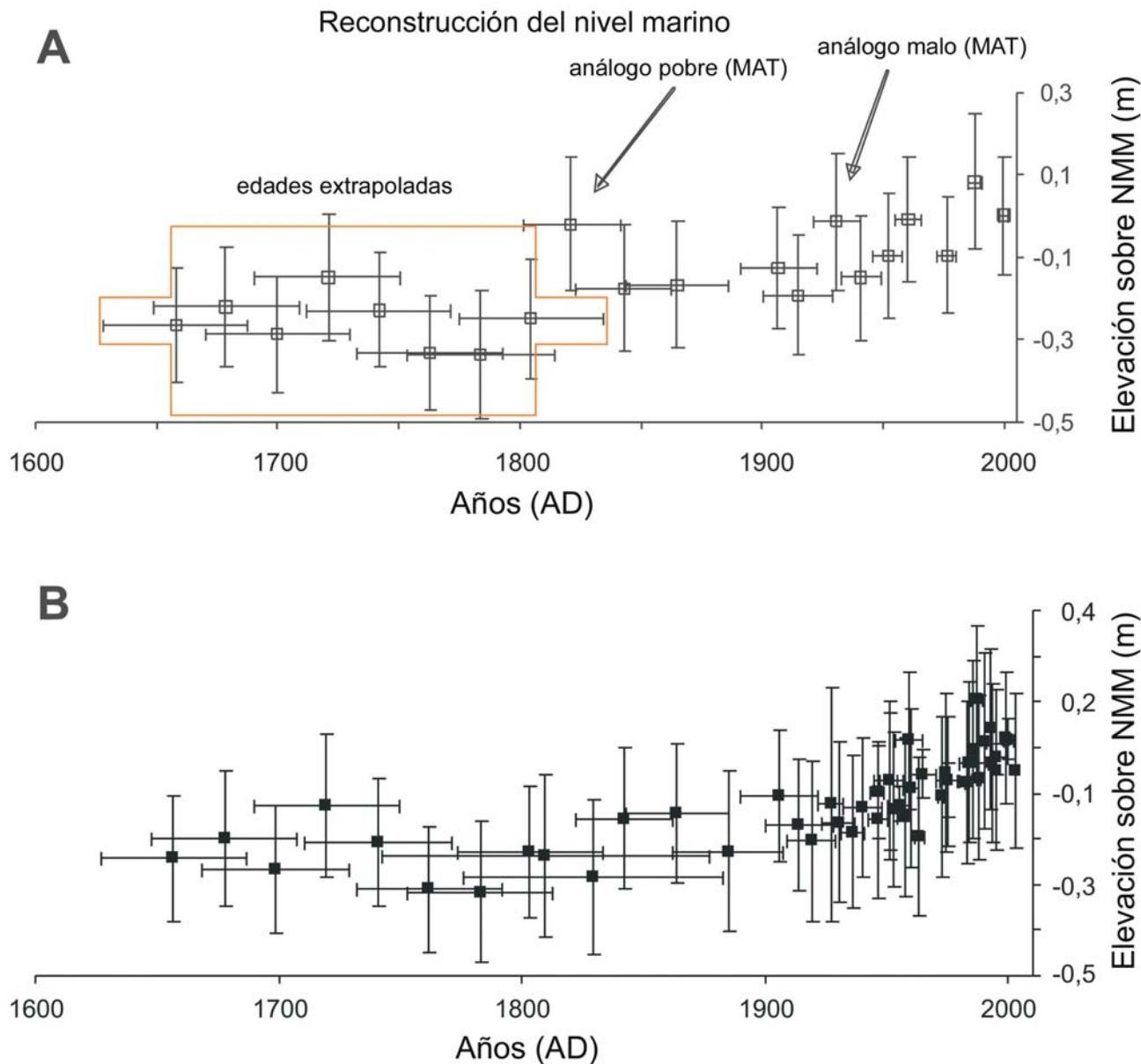


Fig. 2.- Curva relativa del nivel marino obtenida a partir de la reconstrucción de las elevaciones (con sus rangos de error) mediante la función de transferencia y la cronología del modelo de edad. En la horizontal se representa la edad de las diferentes muestras analizadas (años AD) y en la vertical la elevación (m) sobre el nivel mareal medio. A: sondeo Kanala (estuario de Urdaibai), B: síntesis de los resultados instrumentales (mareógrafo de Santander-Leorri y Cearreta, 2009) y sondeos (Ostrada-Leorri *et al.*, 2008, Muskiz-Leorri y Cearreta, 2009, y Kanala) estudiados en el litoral cántabro.

Fig. 2.- Relative sea-level curve derived from both the reconstruction of the elevations (with assigned errors) produced by the transfer function and the age-model chronology. Horizontal line represents the age of the different samples analyzed (in years AD) and vertical line represents elevation (m) above mean tidal level. A: Kanala core (Urdaibai estuary); B: composite of the instrumental results (Santander tide gauge-Leorri and Cearreta, 2009) and different cores (Ostrada-Leorri *et al.*, 2008, Muskiz-Leorri and Cearreta, 2009, and Kanala) from the Cantabrian coast.

ha estandarizado su elevación en relación al rango mareal regional siguiendo Hamilton y Shennan (2005).

Para determinar su contenido en foraminíferos bentónicos, las muestras fueron levigadas con agua utilizando tamices de 1 mm (para eliminar los fragmentos vegetales más grandes) y 63 micras con el objetivo de eliminar los materiales de tamaño limo y arcilla. Se recogieron los caparazones de microfósiles hasta obtener un número representativo superior a 300 indi-

viduos que posteriormente fueron estudiados bajo una lupa estereoscópica binocular de luz reflejada. Se han extraído más de 10.000 foraminíferos pertenecientes a 5 especies diferentes.

Para su análisis radiométrico mediante espectrometría gamma, las muestras fueron secadas, homogeneizadas e introducidas en discos Petri sellados de 50 mm. Los radionucleidos fueron medidos utilizando un detector EG&G Ortec planar (GEM-FX8530-S N-type) HPGc. La actividad

radiométrica de las muestras fue contada durante 24 horas y se fueron seleccionando muestras progresivamente más profundas hasta alcanzar su límite inferior detectable para producir perfiles que pudieran ser utilizados con fines geocronológicos.

El análisis geoquímico (metales pesados) de las muestras requería su cribado a través de un tamiz de 1 mm, el secado de las mismas a 45 °C y su envío al Activation Laboratories Ltd. de Ontario (Canadá) donde fueron analizadas. Después de una diges-

tión en agua regia durante 2 horas a 95°C, fueron determinadas las concentraciones elementales utilizando el método Inductively Coupled Plasma-Optic Emission Spectrometry (ICP-OES). Los límites más bajos de detección fueron de 0,01% para el Al, 0,2 mg kg<sup>-1</sup> para el Cd, 1 mg kg<sup>-1</sup> para el Zn, Cu y Ni y 2 mg kg<sup>-1</sup> para Pb y Cr.

## Resultados y Discusión

El techo del sondeo Kanala se encuentra situado a 4,055 m sobre el nivel de referencia en una zona vegetada de marisma alta. Los 24 cm más superiores están constituidos por fango (limo y arcilla) laminado de color progresivamente más oscuro hacia el techo con un pequeño contenido en arena (media 2,1%; rango 0,5-5,5%).

El análisis micropaleontológico ha permitido identificar 5 especies diferentes de foraminíferos en este sondeo, de las cuales *Trochammina inflata* (media 58,8%; rango 25,1-89,0%), *Jadammina macrecens* (media 33,6%; rango 5,7-71,2%) y *Miliammina fusca* (media 7,4%; rango 0,4-20,2%) son especies dominantes, mientras que *Arenoparrella mexicana* y *Haplophragmoides wilberti* son especies muy minoritarias (Fig. 1). En general, las asociaciones de foraminíferos encontradas fueron abundantes, estaban constituidas exclusivamente por caparzones de naturaleza aglutinante y no presentaron ningún individuo alóctono.

Las asociaciones de foraminíferos muestran sólo una ligera variación en la abundancia relativa de las principales especies a lo largo de los 24 cm superiores del sondeo (Fig. 1). La función de transferencia aplicada corresponde al componente 3 del modelo descrito por Leorri et al. (2008) basada en la técnica denominada «weighted averaging partial least squares». Por otro lado, se ha utilizado la técnica denominada «modern analogue technique» (MAT) para determinar si las muestras del sondeo presentaban buenos análogos en la matriz de datos actuales utilizada por Leorri et al. (2008). Dos muestras, situadas a -7 cm y -12 cm, presentan análogos modernos pobres o malos (Fig. 2A) y, en consecuencia, no se han utilizado para la interpretación de las variaciones del nivel marino.

Con el fin de proporcionar un marco cronológico a las variaciones indicadas por la función de transferencia, se ha utilizado la tasa de sedimentación derivada de la actividad del Pb-210. Esta cronología ha sido apoyada por los resultados de Cs-137 y la distribución de los metales pesados a lo largo del sondeo (ver Leorri et al. 2008). Esta técnica permite datar con precisión los últimos 150-200 años, que en este caso

corresponden a los 11 cm más superficiales del sondeo. A falta de otros indicadores cronológicos para los 13 cm restantes, se han extrapolado hacia abajo en el sondeo las tasas de sedimentación para proporcionar un marco temporal a esa sección del registro sedimentario, aunque estos datos han de tomarse con extrema precaución (Fig. 2A). En cualquier caso, los resultados obtenidos en este sondeo apoyan los estudios previos realizados en esta zona que indicaban una aceleración del ascenso del nivel marino durante el siglo XX, frente a un nivel marino relativamente estable durante los siglos precedentes. Estos nuevos datos, junto a los ya disponibles, proporcionan una estimación del ascenso marino de 2,0 mm año<sup>-1</sup> durante el siglo XX, frente a un ascenso prácticamente nulo durante los dos siglos y medio anteriores (Fig. 2B). Aunque el error vertical en cada una de las reconstrucciones individuales que genera la función de transferencia es aproximadamente ± 10 cm, el error de las diferentes tendencias analizadas se reduce significativamente con la progresiva inclusión de más puntos en la reconstrucción (Lyons, 1991), produciendo en este caso una tendencia con un error vertical total de ± 5,3 cm para todo el siglo XX.

## Conclusiones

Como consecuencia de la importancia económica y social que presenta el ascenso del nivel marino, la falta de datos instrumentales en la costa sur del Golfo de Vizcaya anteriores a los años 1940 hace imprescindible el uso de técnicas alternativas que permitan determinar sus posibles variaciones durante los siglos precedentes y estimar así con mayor precisión el futuro ascenso en el nivel del mar. Con este objetivo, la aproximación geológica basada en indicadores micropaleontológicos ha demostrado ser muy precisa extendiendo los resultados sobre las variaciones en el nivel marino para la costa sur del Golfo de Vizcaya hasta el inicio del siglo XX y proporcionando además las primeras indicaciones sobre sus variaciones en los siglos anteriores. Se observa una clara aceleración durante los últimos 100 años, tal y como se ha detectado en otras áreas del Atlántico norte.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los siguientes proyectos: Grupos de investigación del Sistema Universitario Vasco GIC07/32-IT-332-07, Acción Integrada Hispano-Portuguesa HP2007-0098/Ação Integrada Luso-Espanhola n° E-20/80 (Assessing palaeoenvironmental

proxies in the Iberian coast: marsh foraminifera as sea-level indicators), y Convenio UPV/EHU-Ihobe SA Estudio de las variaciones recientes del nivel marino en la costa vasca en el marco del proyecto K-Egokitzen-Cambio climático: impacto y adaptación (Etortek). Ane García Artola ha recibido una ayuda predoctoral del Gobierno Vasco para la formación de investigadores (BFI08.180) y Eduardo Leorri un contrato postdoctoral de la Fundação para a Ciência e a Tecnologia-Portugal (SFRH/BPD/44750/2008). Este trabajo es asimismo una contribución al IGCP Project 495 (Late Quaternary Land-Ocean Interactions: Driving Mechanisms and Coastal Responses) y al Northwest Europe working group de la INQUA Commission on Coastal and Marine Processes.

## Referencias

- Cearreta, A., Irabien, M.J., Ulibarri, I. Yusta, I., Croudace, I.W. y Cundy A.B. (2002). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 54, 863-886.
- Donnelly, J.P., Cleary, P., Newby, P. y Ettlinger, R. (2004). *Geophysical Research Letters*, 31, L05203.
- Gehrels, W.R., Belknap, D.F., Black, S. y Newnham, R.M. (2002). *The Holocene*, 12, 383-389.
- Gobierno Vasco (1996). *Catálogo abierto de espacios naturales relevantes de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 635 p.
- Hamilton, S. y Shennan, I. (2005). *Quaternary Science Reviews*, 24, 1479-1498.
- Hayward, B.W., Cochran, U., Southall, K., Wiggins, E., Grenfell, H.R., Sabaa, A., Shane, P.R. y Gehrels, W.R. (2004). *Quaternary Science Reviews*, 23, 1651-1667.
- Horton, B.P. y Edwards, R.J. (2006). *Journal of Foraminiferal Research, special publication* 40, 1-97.
- Leorri, E., Horton, B.P. y Cearreta, A. (2008). *Marine Geology*, 251, 60-74.
- Leorri, E. y Cearreta, A. (2009). *Scientia Marina*, 73, 287-296.
- Marcos, M., Gomis, D., Monserrat, S., Álvarez-Fajul, E., Pérez, B. y García-Lafuente, J. (2005). *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2004JC002522.
- Lyons, L. (1991). *A practical guide to data analysis for Physical Science students*. Cambridge University Press, 107 p.
- Marcos, M., Wöppelmann, G., Bosch, W. y Savcenko, R. (2007). *Journal of Marine Systems*, doi:10.1016/j.jmarsys.2007.02.006.
- Tel, E. y García, M.J. (2001). *Mean sea level changes along the northern Iberian peninsular coast*. Final Workshop of COST Action 40, Hydrographic Institute of the Republic of Croatia.