

El final de la crisis de salinidad Messiniense: integración de un modelo matemático con las evidencias geomorfológicas

The end of the Messinian Salinity Crisis: integration of a mathematical model with geomorphological evidences

Ferran Estrada⁽¹⁾, Gemma Ercilla⁽¹⁾, Daniel Garcia-Castellanos⁽²⁾, Christian Gorini⁽³⁾, Belén Alonso⁽¹⁾, Carmen Juan⁽¹⁾, Abdellah Ammar⁽⁴⁾ y Mohammed Elabbassi⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias del Mar, CSIC. Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003 (Barcelona), España. festrada@icm.csic.es, gemma@icm.csic.es, belen@icm.csic.es, cjuan@icm.csic.es.

⁽²⁾ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, CSIC. Solé i Sabarí s/n Barcelona, España. danielgc@ictja.csic.es.

⁽³⁾ Université Pierre et Marie Curie-Paris 6 ISTEP, Francia. christian.gorini@upmc.fr

⁽⁴⁾ Université Mohammed V-Agdal Rabat, Marruecos. ammar@fsr.ac.ma, elabbassimohammed@hotmail.fr

ABSTRACT

The mathematical modeling of the catastrophic event that put an end to the Messinian Salinity Crisis is integrated with the geomorphological features defined on the Messinian top surface, based on the analysis of a dense net of seismic profiles surveyed in the surroundings of the Strait of Gibraltar and Alboran Sea. The mapped morphosedimentary features as terraces and great erosive channel that crosses the entire Alboran basin coupled with the five Zanclean flooding phases (0 to 4) of the mathematical model, have allowed a more precise interpretation and timing of the geological processes related to the flooding. Likewise, this integration permits quantifying the catastrophic magnitude of that flooding which had been difficult to infer from the geomorphological evidences.

Key-words: Mathematical model, geomorphology, Messinian, Alboran Sea, Zanclean flooding.

RESUMEN

La modelización matemática del evento catastrófico que puso fin a la crisis de salinidad del Messiniense se ha integrado con los elementos geomorfológicos definidos en la superficie del techo del Messiniense en base al estudio de una densa red de perfiles sísmicos localizada en el Estrecho de Gibraltar y en el Mar de Alborán. La integración de la cartografía de los elementos geomorfológicos, como terrazas y un gran surco erosivo que atraviesa toda la cuenca de Alborán, con las cinco fases de la inundación del zancliense (0 a 4) determinadas por el modelo matemático, ha permitido una mayor precisión en la interpretación y el establecimiento de la cronología de los procesos relacionados con la inundación. Igualmente, esta integración permite cuantificar la magnitud de la inundación, la cual hubiera sido difícil de inferir solo a partir de las evidencias geomorfológicas.

Palabras clave: Modelo matemático, Geomorfología, Messiniense, Mar de Alborán, Inundación del Zancliense.

Geogaceta, 50-2 (2011), 153-155.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 15 de Febrero de 2011
Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011
Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

El estudio de la evolución del relieve mediante la modelización matemática en combinación con el análisis geomorfológico es una herramienta muy útil para comprender los procesos que han intervenido en la formación del relieve. El modelado matemático permite tener una visión continua en el tiempo entre el relieve original y la morfología resultante así como la interacción entre los parámetros responsables de la formación del relieve. En el presente trabajo se analiza cómo se ajusta un modelo matemático de erosión fluvial (García-Castellanos *et al.*, 2009) y unas evidencias geomorfológicas obtenidas a partir del análisis de perfiles sísmicos (Estrada *et al.*, 2011) de un evento de carácter catastrófico que puso fin

a la crisis de salinidad mesiniense en el Mediterráneo hace 5,33 ma.

La crisis de salinidad mesiniense comprende un período de 0,63 ma en el cual las cuencas Oriental y Occidental del Mediterráneo quedaron aisladas del resto de océanos (Krijgsman *et al.*, 1999). Como resultado de este aislamiento, y por un déficit hídrico, se produjo la práctica desecación de todo el Mar Mediterráneo (Hsü *et al.*, 1973). El final de la crisis de salinidad vino marcada por la súbita reconexión del Mediterráneo con el Atlántico, a través del Estrecho de Gibraltar mediante un evento singular conocido como la inundación zancliense. La dimensión de esta inundación, difícilmente imaginable a escala humana, se hace patente con el modelo matemático y queda corroborada por las observaciones

geomorfológicas y el estudio de los sedimentos que indican un cambio rápido de un ambiente restringido y salobre a uno de mar abierto (Pierre *et al.*, 2006).

El modelo matemático

El modelo matemático obtenido por García-Castellanos *et al.* (2009) parte de la base de que el canal erosivo observado en el Estrecho de Gibraltar fue excavado por la inundación zancliense. Para validar dicha hipótesis, el modelo calcula cómo evoluciona en el tiempo la entrada del flujo de agua atlántica a la Cuenca Mediterránea así como la incisión causada por este flujo en la zona del Estrecho de Gibraltar. Este cálculo se realiza mediante la combinación de un modelo de erosión de roca por flujo acuoso

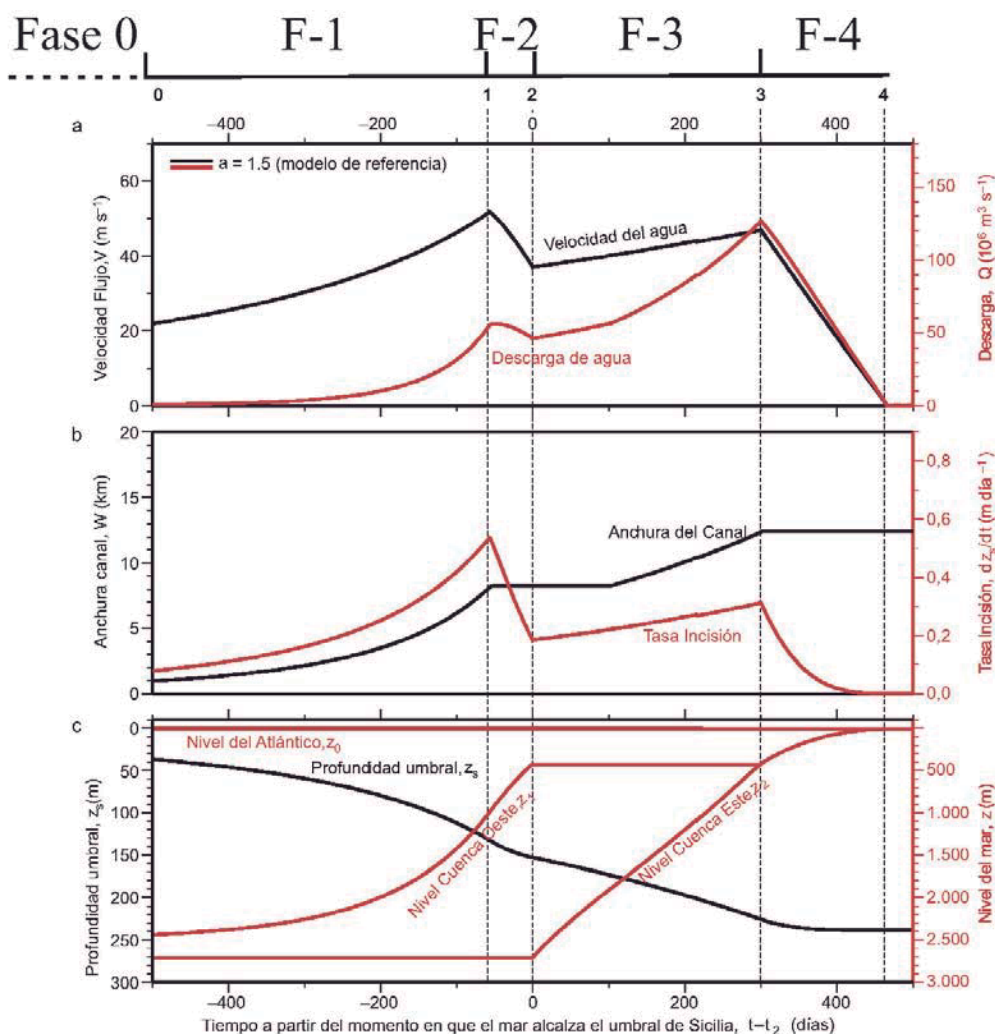


Fig. 1.- Modelo matemático de la inundación zancliense en el Estrecho de Gibraltar. A) Velocidad del flujo (negro) y descarga de agua (rojo). B) Anchura (negro) y tasa de la incisión (rojo). C) Profundidad del umbral (negro) y nivel del Atlántico, Mediterráneo Oriental y Occidental (rojo). Modificado de García-Castellanos *et al.* (2009).

Fig. 1.- Mathematical model of the Zanclean flooding in the Strait of Gibraltar. A) Water velocity (black) and discharge (red). B) Channel width (black) and incision rate (red). C) Sill depth (black) and level of the Atlantic, Western and Eastern Mediterranean (red). Modified from García-Castellanos *et al.* (2009).

y ecuaciones hidrodinámicas, modelo validado en estudios fluviales. Una premisa para el cálculo de la evolución de la inundación modelada en la Figura 1 es la incisión final observada actualmente en el umbral del Estrecho de Gibraltar (240 m). El modelo prueba combinaciones de los parámetros erosionales que se ajusten a una incisión final de 240 m (para más información ver García-Castellanos *et al.*, 2009).

El modelo matemático predice cinco fases en la evolución de la inundación zancliense (Fig. 1). La fase 0 corresponde a un periodo de larga duración donde la reducida entrada de agua atlántica, inducida por la profundidad de 1 m establecida (impuesta) por el modelo matemático en el tiempo $t=0$, genera una erosión poco significativa. En la fase 1, el Estrecho de Gibraltar se hace más profundo y ancho, aumentando de forma exponencial su tasa de

erosión y de flujo de agua atlántica. En la fase 2, se produce una reducción del gradiente hidrológico entre el Océano Atlántico y el Mediterráneo Occidental (Fig. 2) que resulta en una disminución de la velocidad del flujo y de la descarga de agua, así como de la tasa de erosión. Durante esta fase toda el agua atlántica que entra por el Estrecho de Gibraltar se invierte en rellenar la Cuenca Mediterránea Occidental. La Cuenca Oriental permanece aislada. En la fase 3, el nivel del mar alcanza el umbral de Sicilia y el gradiente hidrológico se mantiene constante en la Cuenca Occidental, ya que el agua que entra por el Estrecho de Gibraltar es transferida a la Cuenca Oriental, produciendo en ésta un ascenso rápido del nivel del mar. Finalmente, en la fase 4, el nivel del mar asciende sincrónicamente en ambas cuencas mediterráneas hasta nivelarse con el Océano Atlántico.

Evidencias geomorfológicas

El estudio geomorfológico del impacto de la inundación Zancleanse en la zona del Estrecho de Gibraltar y Cuenca de Alborán, fue realizado por Estrada *et al.* (2009; 2010 y 2011) en base al análisis de una densa red de perfiles sísmicos que han permitido elaborar una imagen detallada de la superficie del fondo marino de hace 5,33 ma (Fig. 2), cuando la Crisis de Salinidad Mesiniense terminó abruptamente (Krijgsman *et al.* 1999; Blanc, 2002; Pierre *et al.*, 2006). Este estudio pone de manifiesto la existencia de un gran canal erosivo y la presencia de varias terrazas.

El canal erosivo se origina en el Estrecho de Gibraltar y cruza de Oeste a Este toda la Cuenca de Alborán por la zona más profunda y a lo largo de 390 km (Fig. 2). Presenta una sección transversal en forma

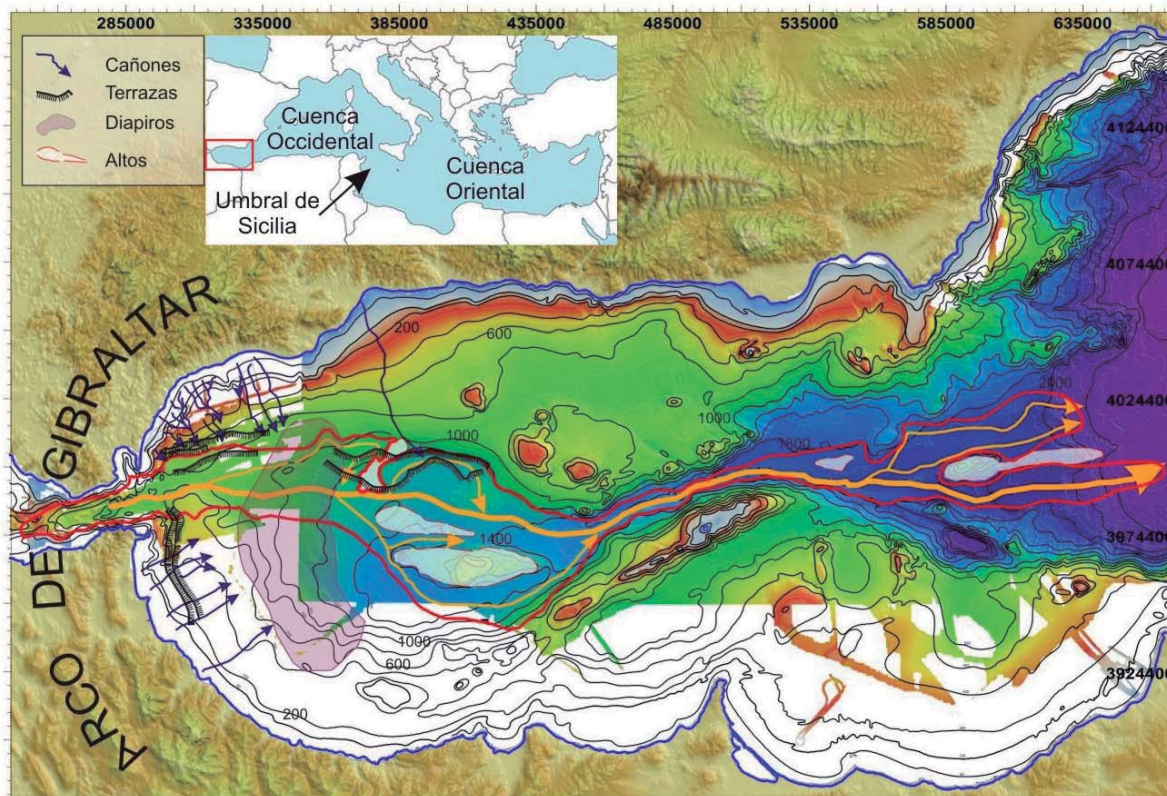


Fig. 2.- Mapa batimétrico del Mar de Alborán mostrando el trazado del corredor erosivo (flechas naranjas) y la zona afectada por la erosión de la inundación (línea roja), así como los principales elementos morfológicos relacionados con la inundación zancliense.

Fig. 2.- Present-day bathymetric map showing the Zanclean corridor path (orange arrows) as well as the area affected by the flooding erosion (red lines). Note the main morphologic features as canyons, terraces and highs.

de U cuyas dimensiones de orden kilométrico, en general, decrecen con la distancia respecto del Estrecho de Gibraltar. Este canal erosivo trunca la superficie regional del Mesiniense incidiéndose más de 600 m en los depósitos del Mioceno superior. Asimismo, interrumpe la parte distal de varios cañones de edad Mesiniense desarrollados en el margen continental español cerca del Estrecho de Gibraltar.

Las terrazas se desarrollan en la Cuenca Oeste de Alborán fuera del área de influencia del canal erosivo, identificándose dos grupos situados a diferente profundidad, entre 650 y 2450 ms (tiempo doble) en los márgenes ibérico y africano (Fig. 2). Las terrazas inferiores están mejor desarrolladas en el margen ibérico, más expuesto al impacto directo del flujo atlántico. Las terrazas superiores se identifican en los márgenes africano e ibérico y se desarrollan en algunos casos sobre los depósitos caóticos atribuidos a la crisis de salinidad, cuando éstos se han preservado. También se observa en este caso un mejor desarrollo de las terrazas superiores en el margen ibérico.

Discusión y conclusiones: integración de los modelos matemático y geológico

Las diferentes fases de la inundación zancliense, establecidas por el modelo matemático, permiten integrar ambos modelos y ordenar cronológicamente los elementos geomorfológicos y asociarlos a una fase concreta de la inundación. El primer nivel de terrazas, las más profundas, probablemente están asociadas a la fase 0 del modelo matemático, dada la profundidad a la que se desarrollan. Representarían morfologías formadas justo antes de la gran inundación por un curso de agua reducido y que quedaron colgadas por la posterior incisión del canal erosivo. No se descarta que también puedan estar relacionadas con un estadio inicial de la inundación, durante la fase 1, cuando empezó a incidirse el corredor.

El canal erosivo, que cruza de oeste a este todo el Mar de Alborán, se formaría en la fase 1 de la inundación, cuando el impacto del agua atlántica fue mayor debido al marcado gradiente hidráulico exis-

tente entre el Océano Atlántico y la Cuenca del Mediterráneo; probablemente se formó en los primeros estadios de esta fase, antes de que la reducción del gradiente hidráulico por el relleno del Mediterráneo redujera el impacto de la inundación en el fondo marino de la Cuenca de Alborán. El modelo matemático predice un ascenso del nivel del mar de 10 m por día en el clímax de la inundación (García-Castellanos *et al.*, 2009).

El segundo nivel de terrazas, más someras, se desarrollaría durante la fase 3 del modelo matemático, cuando el nivel del mar se estabilizó temporalmente al alcanzar el umbral de Sicilia y toda el agua que entraba por el Estrecho de Gibraltar era invertida en el relleno de la Cuenca Oriental del Mediterráneo (Fig. 2). Estas terrazas presentan un desarrollo parecido tanto en el margen africano como en el ibérico, aunque la orientación del Estrecho de Gibraltar respecto al margen ibérico favoreció sensiblemente el desarrollo de las terrazas ibéricas. Recientemente, terrazas similares se han observado en zonas alejadas del Estrecho

de Gibraltar como en la Isla de Alborán y la Isla de Mallorca (Just *et al.*, 2011). Finalmente, durante la fase 4 del modelo matemático, se restablece la conexión entre el Mediterráneo y el resto de océanos del mundo.

La integración entre el modelo matemático y el geomorfológico muestra el gran beneficio de la aproximación interdisciplinar en general, y en particular, permite explicar con más precisión la historia de la inundación zancliense en el Mar de Alborán. Las observaciones geológicas ofrecen los datos principales y necesarios para acotar las variables que deben aplicarse al modelo matemático. El modelo numérico permite encajar los elementos geomorfológicos en un encuadre/sucesión temporal, y por lo tanto establecer la evolución de los diferentes procesos sedimentarios, su interacción con

el entorno, las variaciones paleoambientales y la historia de la inundación Zancliense del Mar de Alborán.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por varios proyectos de investigación como: TOPOMED (Ref: ESF-CGL2008-03474-E/BTE), CONTOURIBER (Ref: CTM2008-06399-C04-04/MAR) y MONTERA (Ref: CTM-14157-C02-02/MAR).

Referencias

Blanc, P.L. (2002). *Geodinamica Acta*, 15, 303-317.
 Estrada, F., Gorini, C., Ercilla, G., García-Castellanos, D., Ammar, A., Alonso, B., Maldonado, A. y Vázquez, J.T. (2009). *13th Congress RCMNS, abstract book*, 343-344.
 Estrada, F., Ercilla, G., Gorini, C., Alonso, B., Vázquez, J.T., Maldonado, A. y Ammar, A. (2010).

Deep Water Circulation: Processes & Products, International Congress, Baiona, (Spain). *Geo-Temas*, 11, 41-42.

Estrada, F., Ercilla, G., Gorini, C., Alonso, B., Vázquez, J.T., García-Castellanos, D., Juan, C., Maldonado, A., Ammar, A. y Elabbassi, M. (2011). *Geo-Marine Letters*, doi: 10.1007/s00367-011-0249-8.
 García-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernàndez, M., Vergés, J. y de Vicente, R. (2009). *Nature*, 462, 778-782.
 Hsü, K.J., Ryan, W.B.F. y Cita, M.B. (1973). *Nature*, 242, 240-244.
 Just, J., Hübscher, C., Betzler, C., Lüdmann, T. y Reicherter, K. (2011). *Geo-Marine Letters*, 31, 51-64. doi: 10.1007/s00367-010-0213-z.
 Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J. y Wilson, D.S. (1999). *Nature*, 400, 652-655.
 Pierre, C., Caruso, A., Blanc-Valleron, M.M., Rouchy, J.M. y Orzsag-Sperber, F. (2006). *Sedimentary Geology*, 188-189, 319-340.