



Geología y Arqueología del Terremoto-Tsunami de finales del Siglo IV a.C. que destruyó la ciudad Romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, Sur España)

Geology and Archaeology of the late 4th century CE Earthquake-Tsunami event that struck the ancient roman city of Baelo Claudia (Cádiz, South Spain)

Silva, P.G.⁽¹⁾, Reicherter, K.⁽²⁾, García-Jiménez, I.⁽³⁾, Prados Martínez, F.⁽⁴⁾,
Pérez-Tarruella, J.⁽⁵⁾, Sánchez-Sánchez, Y.⁽⁵⁾

(1) Dpto. Geología, Universidad Salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila, 05003-Ávila España. pgsilva@usal.es

(2) Neotectonics and Natural Hazards, Dept. of Geosciences and Geography, RWTH Aachen University, Aachen, Alemania. k.reicherter@nug.rwth-aachen.de

(3) Conjunto Arqueológico de *Baelo Claudia* (CABC), Agencia Andaluz de Instituciones Culturales, Ensenada de Bolonia, Tarifa, Cádiz, España. ivan.garcia@juntadeandalucia.es

(4) Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico. Univ. de Alicante. Campus de San Vicente del Raspeig. 03690 Alicante. fernando.prados@ua.es

(5) Dpto. Geología, Universidad Salamanca, Facultad de Ciencias, Salamanca, 37008-Salamanca, España

Resumen

El presente trabajo resume el conjunto de nuevas investigaciones geológicas y arqueológicas que certifican la ocurrencia de un potente evento terremoto-tsunami que devastó la antigua ciudad romana de *Baelo Claudia* (Estrecho de Gibraltar) en la segunda mitad del siglo IV d.C. Aparte de las importantes deformaciones cosísmicas documentadas en forma de deformaciones en los restos arquitectónicos (EAEs) el presente estudio se centra en los efectos y registro sedimentario del tsunami que acompañó al terremoto. El análisis de los depósitos de tsunami en sondeos y afloramientos de la parte baja de la ciudad indican que este alcanzó una altura mínima de + 8 m por encima del nivel del mar y que penetró al menos 250 m hacia el interior alcanzando la base de los templos en la zona del Foro. Sin embargo, en los pequeños arroyos que se encuentran en la zona y en la antigua laguna litoral oriental la inundación pudo penetrar hasta algo más de un kilómetro. La capa del tsunami ha sido bien documentada dentro y fuera de la ciudad en trabajos anteriores y se encuentra bien. La tsunamita es un depósito arenoso cohesivo oscuro (de 28 a 52 cm de grosor) que contiene fragmentos de cerámica, huesos de pescado y de animales, cristalería, ladrillos y grandes bloques de mampostería y tambores de columnas. La capa también contiene conjuntos microfaunísticos con una mezcla de foraminíferos bentónicos y planctónicos, así como gasterópodos lagunares de agua salobre y numerosos restos de conchas y foraminíferos rotos reelaborados. Los datos



presentados en este trabajo indican que la capa del paleotsunami se compone principalmente de arenas finas-medias bien redondeadas procedentes de la reelaboración de depósitos eólicos y de las antiguas playas y barras litorales que en época romana cerraban la antigua bahía. Interpretamos que la mayoría de los depósitos de tsunami son depósitos de backwash (retroceso de la ola) que quedaron atrapados entre las ruinas de la ciudad y especialmente a lo largo del Decumano Máximo, Termas marítimas y Mausoleo de *Iunia Rufina* en la necrópolis oriental de la ciudad. Los hallazgos arqueológicos en este monumento derribado por el terremoto y posterior tsunami permiten establecer la edad de este suceso entre los años 350 - 390 AD.

Palabras clave: Arqueosismología, Efectos Arqueológicos de los Terremotos (EAEs), Tsunami, Baelo Claudia, Estrecho de Gibraltar, Sur de España.

Abstract

This paper summarizes the set of new geological and archaeological studies that certify the occurrence of a powerful earthquake-tsunami event that devastated the ancient Roman city of Baelo Claudia (Strait of Gibraltar) in the second half of the 4th century AD. Apart from the important coseismic deformations documented in the architectural remains (EAEs), the present study focuses on the effects and sedimentary record of the subsequent tsunami. Analysis of tsunami deposits in drill cores and outcrops along the lower part of the city indicate that the tsunami reached a minimum height of + 8m above sea level and penetrated at least 250 m inland reaching the base of the temples above the Forum area. However, in the small creeks around the area and in the ancient eastern littoral lagoon, flooding could have penetrated up to about one kilometre. The tsunami layer is a dark cohesive sandy deposit (28 to 52 cm thick) containing fragments of pottery, fish and animal bones, glassware, bricks and large boulders of masonry blocks and column drums. The layer also contains microfaunal assemblages with a mixture of benthic and planktonic foraminifera as well as lagoonal brackish-water gastropods and numerous shell debris and broken reworked foraminifera. Data presented in this work indicate that the tsunami layer is mainly composed of well-rounded fine-medium sands originating from the reworking of aeolian and littoral beach deposits of the old roman spit-bar enclosing the ancient embayment. We interpret most of the tsunami layer as backwash deposits trapped within the ruins of the city after the earthquake destruction, as testified by recent excavations along the decumanus maximum, Termas Marítimas and the funerary mausoleum of *Iunia Rufina* in the eastern necropolis. The archaeological findings in this funerary monument toppled by the earthquake and the subsequent tsunami allow to establish the age of this event between 350 - 390 AD.

Key words: Archaeoseismology, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Tsunami, Baelo Claudia, Gibraltar Strait, South Spain.

1. Introducción

Baelo Claudia constituye uno de los conjuntos arqueológicos romanos más importantes de la zona del Estrecho de Gibraltar. Según antiguas referencias (Estrabón) era el punto de embarque para el paso del Estrecho durante época romana. La ruta *Baelo-Tingis*, la actual Tánger en la antigua Mauritania. Además, *Baelo* era un auténtico foco comercial que se nutría de la rica industria de la salazón de pescado y de

la producción de *garum*, la salsa de pescado fermentada tan popular en el mundo romano. La ciudad adquirió su máximo esplendor a partir de la segunda mitad del siglo I d.C. cuando el emperador Claudio le concedió el rango de *municipium* (Sillières, 1997; 2005). En este periodo se procedió a la monumentalización de la ciudad. Muralla, templos, *Foro*, termas, *Basilica*, *Curia*, *Macellum*, Teatro, *cardos* y *decumanus* etc. fueron reforzados, ampliados o nuevamente contruidos. Excepto

la breve mención citada del historiador Estrabón (año 18 d.C.) y algún que otro epígrafe, no existe documentación escrita sobre *Baelo Claudia*. Toda su historia se encontraba enterrada entre sus restos, sus ruinas. La historia ha tenido que reconstruirse piedra a piedra, vasija a vasija, moneda a moneda, losa a losa, con la labor de innumerables excavaciones arqueológicas y trabajos científicos realizados desde que a inicios del siglo XX el arqueólogo hispano-británico Jorge Bonsor y el arqueólogo francés Pierre Paris empezaran a estudiar la zona (París et al., 1923).

Estos estudios indican que la ciudad romana experimentó dos grandes periodos: uno anterior y otro posterior a la adquisición de su condición de municipio romano en el que la ciudad disfrutó su mayor prosperidad. Este periodo de bonanza se extendió hasta finales del siglo IV d.C. y curiosamente se abrió y culminó consecuencia de dos importantes catástrofes: Los dos grandes terremotos que afectaron a esta ciudad romana en los siglos I y IV d.C. (Menanteau et al., 1983; Sillières, 2005; Silva et al., 2005; 2009). Estos dos terremotos quedaron especialmente preservados en la parte baja de la ciudad, a orillas del mar, y muy especialmente de su vía decumana principal o “*decumanus maximus*”, que enlazaba la puerta de *Gades* (Oeste) y *Carteia* (Este) de la ciudad a cuya vera se levantaban las necrópolis más importantes extramuros (Fig. 1). En este trabajo nos centraremos en los efectos y registro a lo largo de la vía decumana y zonas adyacentes del segundo terremoto acaecido entre los años 360 y 390 d.C. (Menanteau et al., 1983; Silva et al., 2005; 2016; Prados et al., 2020). Este segundo terremoto vino acompañado por un importante tsunami que arrasó toda la parte baja, anteriormente monumentalizada, de la ciudad (Röth et al., 2015; Silva et al., 2022; Reicherter et al., 2022). Esta catástrofe culminó en la destrucción, ruina y casi total abandono de la zona sur de *Baelo Claudia*. El proceso se solapó al proceso de declive del imperio romano en occidente y que prácticamente acabó con el fin del periodo romano en esta zona de la Península Ibérica. Los monumentos de la ciu-

dad romana no fueron reconstruidos y entre sus ruinas se construyó un discreto poblado medieval de pescadores del que se registran necrópolis visigodas extramuros de los siglos VI-VII d.C. Tras estas ocupaciones la zona prácticamente quedó despoblada tras la invasión musulmana del siglo VIII d.C. (Sillières, 1997). Los nuevos hallazgos arqueológicos y dataciones geológicas del segundo evento sísmico en la necrópolis oriental permiten asegurar que el evento tuvo lugar muy a finales del siglo IV (datos arqueológicos) o muy a principios del siglo V (dataciones C¹⁴). Así los trabajos más recientes se refieren a él de forma genérica como el terremoto-tsunami del año 400 d.C. (Prados et al., 2020; Reicherter et al., 2022).

2. La paleogeografía de la Bahía de Bolonia en época Romana: aspectos a tener en cuenta

Para entender propiamente los efectos del terremoto-tsunami de finales del siglo IV, tenemos que situar la ciudad romana en su antiguo contexto paleogeográfico, incluyendo las relaciones de su tejido urbano con el antiguo trazado del litoral. Diferentes investigaciones que incluyen el análisis de fotografías aéreas, imágenes satélites, prospecciones geofísicas del subsuelo (georadar y tomografía eléctrica), análisis geoarqueológicos, excavaciones arqueológicas e incluso arqueología submarina en el interior de la Bahía de Bolonia, han permitido reconstruir el paisaje litoral de la zona en época romana (e.g. Alonso Villalobos et al., 2003; Silva et al., 2005; 2009; 2015; 2016; Röth et al., 2015; Reicherter et al., 2022).

La Figura 1 ofrece una imagen de la paleogeografía de la zona en época romana, poniendo de relieve tres puntos principales que articulaban el entramado urbano con el litoral:

- (a) Existencia de **antiguas barras litorales** pocos cientos de metros por delante de la línea de costa actual que daba lugar a una **bahía protegida** del oleaje muy apta para **zona portuaria**. En la actualidad se encuentran sumergidas en la actual bahía y

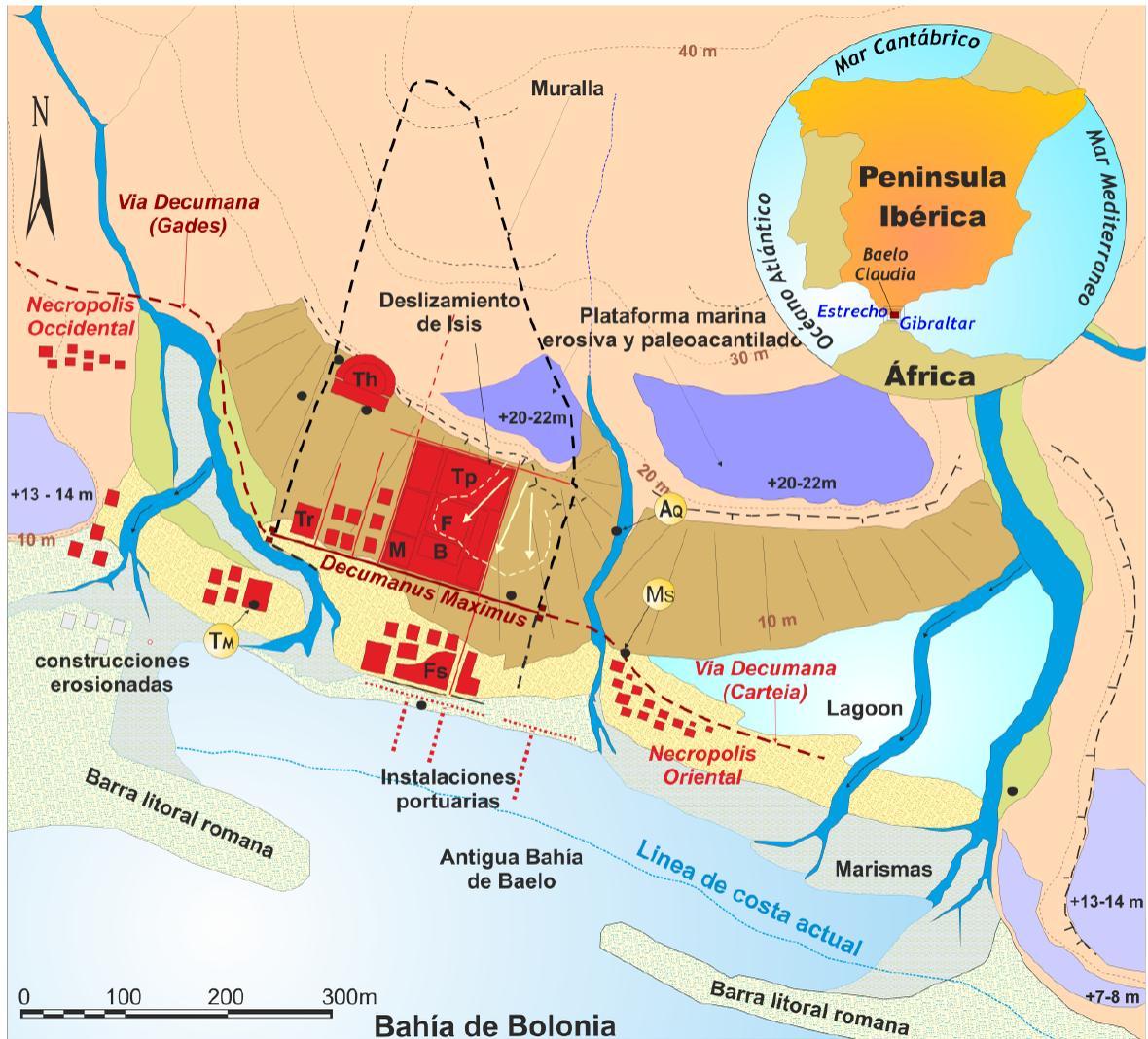


Figura 1: Paleogeografía de la antigua Bahía de Bolonia en época romana (siglos II-V d.C.) antes del terremoto-tsunami del año 400 d.C. mostrando la localización de la ciudad entre los distintos cursos fluviales y masas de agua (lagunas litorales, estuarios-marismas) que rodeaban la ciudad y necrópolis. **AQ**: Acueducto dañado; **DM**: Decumanus maximus; **MS**: Mausoleo *Iunia Rufina*; **TM**: Thermae maritimes. **Tp**: Templos; **F**: Foro; **B**: Basílica; **M**: Macellum; **Tr**: Baños; **Th**: Teatro. Modificado de Silva et al. (2016). Ver leyenda en Fig. 2.

Figure 1: Paleogeography of the ancient Bolonia Bay in Roman times (2nd-5th century CE) before the earthquake-tsunami of 400 AD showing the location of the city among the different river courses and bodies of water (coastal lagoons, estuaries-marshes) surrounding the city and necropolis. **AQ**: Damaged aqueduct; **DM**: Decumanus maximus; **MS**: Mausoleum *Iunia Rufina*; **TM**: Maritime thermal baths. **Tp**: Temples; **F**: Forum; **B**: Basilica; **M**: Macellum; **Tr**: Baths; **Th**: Theater. Modified from Silva et al. (2016). See legend in Fig. 2.

forman una serie de barras arenosas muy irregulares que pueden llegar a emerger parcialmente en momentos de marea muerta (marea baja mínima).

(b) Existencia de un **cordón litoral de playas y sistemas dunares** que delimitaba la línea

de costa por el interior de la antigua bahía (Fig. 2). Este se encontraba fuertemente antropizado y sobre él se encontraban las instalaciones portuarias, fábricas de salazones, termas marítimas y la necrópolis oriental. En esta zona el cordón litoral **cerraba una antigua laguna litoral**

de poca profundidad (lagoon) y quedaba a modo de isla o “*Isola Sacra*” (Prados *et al.*, 2011). Por el interior de este antiguo cordón litoral discurría la “*via decumana*” que atravesaba de Oeste (*Puerta de Gades*) a Este (*Puerta de Carteia*) la ciudad. Con posterioridad al abandono progresivo de la ciudad, a partir del siglo VII toda la parte baja de la ciudad quedaría cubierta por un importante sistema de dunas que, alcanzando alturas de hasta 4-5 metros sepultarían la zona. Las primeras excavaciones de Jorge Bonsor se centraron en desmontar el sistema dunar para desenterrar los restos arqueológicos (Sillières, 1997).

- (c) Hacia el interior el entramado urbano se encontraba aterrazado aprovechando la existencia de una serie de **antiguas terrazas marinas** que se situaban a altitudes de +5-6 m (*Decumanus*, *Foro Basílica*, etc.), +13-14 m (Teatro y Templos) y +20-22 m que conformaba un antiguo paleoacantilado a cuyo pie se extendía la parte baja de la ciudad construida y monumentalizada en las terrazas inferiores durante la segunda mitad del siglo I d.C (Fig. 3). El nivel marino de +20-22 m ocupaba la parte más alta de la ciudad, actualmente muy poco excavada. Estudios geocronológicos (dataciones Th/U) en estos depósitos marinos a lo largo del Estrecho de Gibraltar (Zazo *et al.* 1999; 2008) indican que estas terrazas marinas escalonadas corresponden al último interglaciario (c. 126 - 80 ka). Solo la plataforma erosiva superior a +20-22 m puede adscribirse al Pleistoceno Medio con una edad superior a los 130 ka (Zazo *et al.* 1999; Silva *et al.*, 2005).
- (d) Durante y con posterioridad a la ruina de la ciudad provocada por el evento sísmico de finales del siglo IV d.C. comienza a formarse un importante **depósito de ladera (coluvión)** a partir del paleoacantilado asociado al nivel de +20-22 m que acaba por cubrir total o parcialmente la parte baja de la ciudad y por tanto enmascarando el aspecto aterrazado de la misma

(Silva *et al.*, 2005; 2016). Este coluvión post-romano llegó a colmatar el antiguo lagoon oriental de la ciudad y en la zona urbana, se extendió hasta la zona del *Decumanus* donde se interdigitaba con los sistemas de dunas (Figs. 1 y 2). Por otro lado, el trazado E-O en la parte baja de la ciudad hizo de la *via decumana* una importante trampa de sedimentos. En ella confluyen los depósitos del cordón litoral romano, los depósitos de ladera depositados después del abandono de la ciudad y las arenas eólicas de las dunas post-romanas que lo cubrieron todo. Entre estos depósitos cabe destacar un cuarto tipo de material las **tsunamitas** del evento sísmico que se analiza en este trabajo que quedaron atrapadas entre los enlosados del siglo IV d.C. y los mencionados depósitos que las cubren (Roth *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2022).

Un último aspecto a tener en cuenta es que toda la zona monumental baja de la ciudad se construyó sobre las ruinas que dejó el antiguo terremoto de mediados de siglo I d.C. Análisis arqueológicos y geoarqueológicos indican que un primer terremoto ocurrió entre los años 45 y 60 d.C. Sillières (1997; 2005) y la construcción del nuevo Municipio Romano se cimentó sobre un extenso “**nivel de demolición**” constituido por una amalgama de escombros (Fig. 3), que sirvió para nivelar topográficamente toda la parte baja de la ciudad sobre la que construir los nuevos Templos, *Foro*, *Basílica*, *Curia*, *Macellum* y *Decumanus* (Silva *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2009). Los trabajos estratigráficos de Sillières (1997; 2005) certifican que todas las construcciones anteriores de “época augusta” correspondientes a la primera mitad del siglo I d.C., fueron arrasadas y niveladas, concentrándose cubiertas por al menos 1 m de escombros, sobre el que se cimentaron las nuevas edificaciones. Similares “horizontes de demolición” son descritos en el Mediterráneo Oriental y Oriente Medio en el proceso de reconstrucción de importantes ciudades afectadas por grandes terremotos y tsunamis. Importantes ejemplos los encontramos en la denominada “*Crisis*

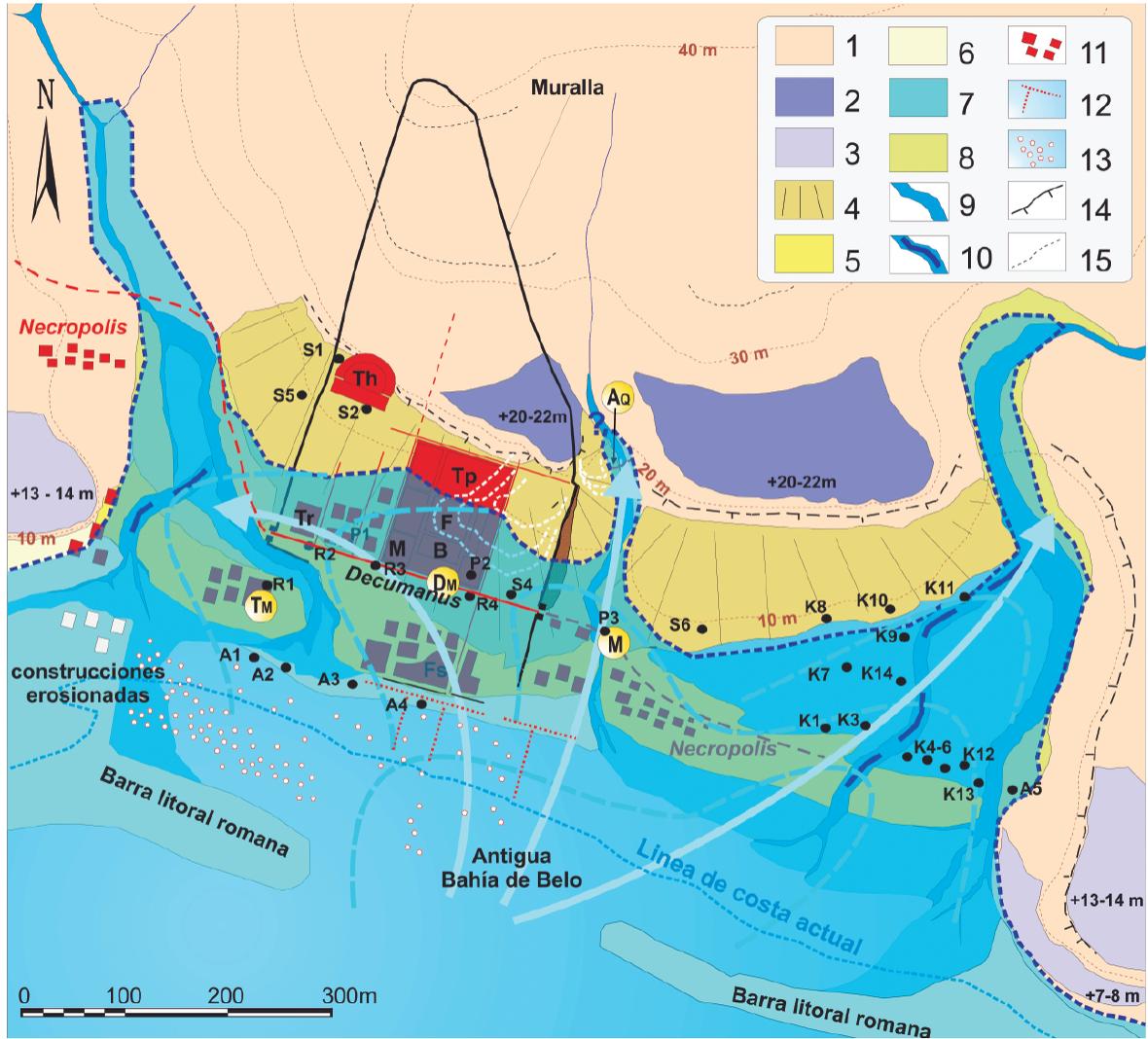


Figura 2: Paleogeografía de Baelo Claudia en época romana (siglo II-V d.C.) mostrando la zona inundada por el tsunami del 400 d.C. de una altura estimada máxima de +8 m en el interior del entramado urbano. **Leyenda:** 1 Sustrato Bético (Fm. Almarchal. Cretácico-Eoceno), 2 y 3 Terrazas marinas pleistocenas, 4 Coluviones postromanos, 5 Barrera de playa (c. 4 ka BP) 6 Depósitos romanos de espigón y playa, 7 Llanuras de inundación costeras de lagunas, marismas y ríos, 8 Terrazas fluviales modernas, 9 Canales activos, 10 Paleocanales, 11 Edificios romanos, 12 Amarres portuarios, 13 Sillares y bloques sumergidos posiblemente arrastrados por el tsunami, 14 Escarpes, 15 Zonas inundadas por el tsunami. Sondeos S1-S5 en Silva *et al.* (2005); A1-A5 sitios de muestreo Alonso-Villalobos *et al.* (2003); R1-R4 sitios de muestreo Röth *et al.* (2015); K1-K11 sondeos Reicherter *et al.* (2022); P1-P3 sitios de muestreo Silva *et al.* (2022). AQ: Acueducto dañado; DM: Decumanus maximus; M: Mausoleo Iunia Rufina; TM: Thermas marítimas.

Figure 2: Paleogeography of Baelo Claudia in Roman times (2nd-5th century A.D.) showing the area inundated by the tsunami of 400 A.D. with an estimated maximum height of +8 m inside the urban fabric. **Legend:** 1 Betic substratum (Almarchal Fm. Cretaceous-Eocene), 2 and 3 Pleistocene marine terraces, 4 Post-Roman colluvium, 5 Beach barrier (c. 4 ka BP) 6 Roman breakwater and beach deposits, 7 Coastal floodplains of lagoons, marshes and rivers, 8 Modern fluvial terraces, 9 Active channels, 10 Paleochannels, 11 Roman buildings, 12 Port moorings, 13 Submerged ashlar and blocks possibly washed away by tsunami, 14 Escarpments, 15 Tsunami inundated areas. Boreholes S1-S5 in Silva *et al.* (2005); A1-A5 sampling sites Alonso-Villalobos *et al.* (2003); R1-R4 sampling sites Röth *et al.* (2015); K1-K11 Boreholes Reicherter *et al.* (2022); P1-P3 sampling sites Silva *et al.* (2022). AQ: damaged aqueduct; DM: Decumanus maximus; M: Mausoleum Iunia Rufina; TM: Maritime thermas.

Paroxismica Bizantina ("Early Byzantine Tectonic Paroxysm") que asoló el Mediterráneo Oriental durante la segunda mitad del siglo IV d.C. (Pirazzoli *et al.*, 1996; Stiros, 2001).

Durante este periodo de importante sismicidad se produjo el famoso terremoto-tsunami de Creta del 21 de Julio del 365 d.C. de magnitud igual o superior a 8,5 Mw (Stiros, 2010). El tsunami arruinó litorales, instalaciones portuarias en gran parte de la cuenca mediterránea oriental como Creta, Chipre, Grecia, Egipto, Libia, Túnez, Italia y Sicilia (Kelly, 2004). Curiosamente los primeros catálogos sísmicos españoles recogen este gran evento sísmico que según el historiador romano *Amiano Marcelino* afectó a las costas de Málaga, Granada, Almería (Galbis, 1932; Kelly, 2004). Ante la coincidencia de fechas Menanteau *et al.* (1983) relacionaron inicialmente la destrucción de *Baelo Claudia* con el histórico evento de Creta. Trabajos posteriores indican que no existen datos arqueológicos que justifiquen daños de este tsunami más al Oeste del Estrecho de Sicilia (Stiros, 2001; 2010). Actualmente, el **terremoto de Creta del año 365 d.C.** ha desaparecido del Catálogo de Terremotos históricos de la Península Ibérica (Martínez Solares y Mezcuá, 2002) y no se considera como causa de destrucción de *Baelo Claudia*. Los estudios existentes apuntan

a un terremoto cercano (local) ocurrido mar adentro en las inmediaciones de la Bahía de Bolonia a finales del siglo IV d.C. (Silva *et al.*, 2009; Grützner *et al.*, 2012) y que más recientemente hemos denominado de forma genérica el terremoto-tsunami del año 400 d.C. (Prados *et al.*, 2020; Reicherter *et al.*, 2022).

Así pues, esta ciudad romana experimentó los efectos contiguos de un terremoto y posterior tsunami. Aunque no tuvo las dimensiones de los modernos terremoto-tsunami de Indonesia 2004 o Japón 2011, este tuvo muy importantes consecuencias en la antigua Bahía de Bolonia. Este evento tiene un **doble registro** en la ciudad romana y muy especialmente a lo largo de la **via decumana** e instalaciones anexas en la parte baja de la ciudad paralelas al litoral. Un **primer tipo de efecto** serían los efectos del terremoto sobre enlosados y construcciones o lo que se denominan efectos arqueológicos de los terremotos (EAEs - *Earthquake Archaeological Effects*; Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011) estudiados y catalogados en el yacimiento por Silva *et al.* (2009; 2016; 2019) y Giner Robles *et al.* (2013; 2018). Un **segundo tipo de efecto** lo constituirían los sedimentos dejados por el tsunami atrapados en el decumano y zonas anexas (Termas marítimas y Necrópolis oriental) analizados por Röth *et al.* (2015), Silva *et al.* (2022) y descri-

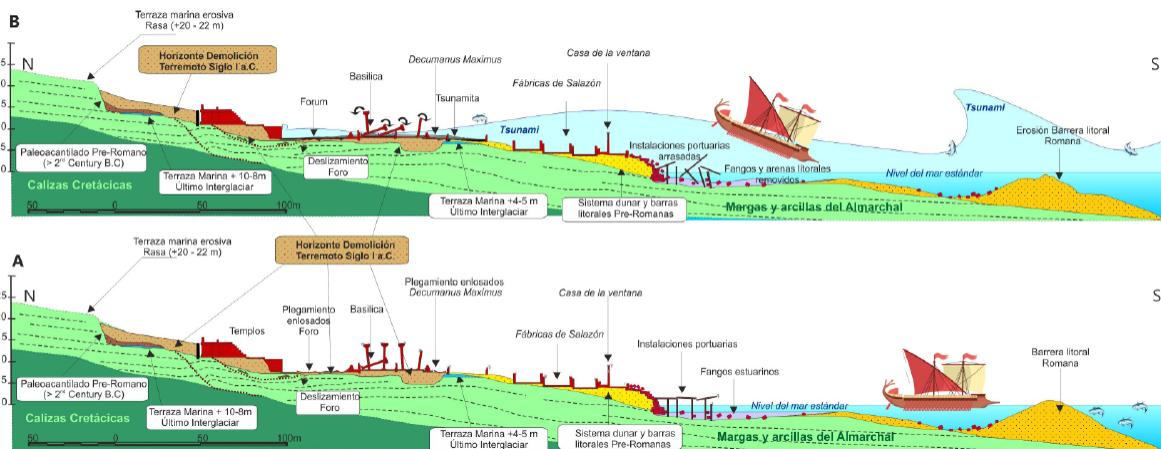


Figura 3: Cortes geológicos N-S mostrando los materiales y efectos del terremoto (A) y posterior tsunami (B) durante finales del siglo IV d.C.

Figure 3: N-S geological cross-sections showing the materials and effects of the earthquake (A) and subsequent tsunami (B) during the late 4th century AD.

tos en detalle mediante sondeos y dataciones en Reicherter *et al.* (2022). La figura 4 ilustra los diez principales lugares en los que existe un registro geoarqueológico importante de las deformaciones e inundación ocasionadas por el evento sísmico en relación con la vía decumana y estructuras colindantes. Solo el acueducto romano escapa de estas dos categorías, ya que se trata de una estructura arrasada por la penetración y retroceso del tsunami situado unos metros tierra adentro de la vía decumana (Silva *et al.*, 2022).

3. Las huellas del terremoto de finales del siglo IV d.C.

Son multitud los ejemplos de estructuras de deformación generadas en los edificios y enlosados de la ciudad por este terremoto, catalogadas como EAEs (Silva *et al.*, 2016; 2019). Entre ellas caben destacar los efectos de deformación y plegamiento de los enlosados de los pavimentos (estructuras tipo pop-up) en el decumano y foro, marcas de impacto por caídas orientadas de sillares, así como roturas y fracturación orientadas de los enlosados (Silva *et al.*, 2009; 2016; 2019). Aquí únicamente nos centraremos en aquellas que afectan al *decumanus maximus*.

Esta vía principal de la ciudad esta pavimentada con grandes losas de geometría irregular, las cuales permiten reconocer un buen número de EAEs ligados a la deformación de la zona pavimentada (Figs. 3 y 4). Como ya se indicó en diferentes estudios (Silva *et al.*, 2005; 2009), la geometría irregular del enlosado de la vía decumana permite un registro de direcciones de deformación más fidedignas que las que se obtienen a partir del enlosado rectangular del Foro. En este, el enlosado rectangular E-O/N-S condicionó las direcciones de plegamiento. De esta forma las estructuras de plegamiento (sinclinales y anticlinales) del *Decumanus* se orientan preferentemente en dirección NO-SE indicando una dirección máxima de deformación NE-SO (Fig. 5). Los pliegues se encuentran extendidos a lo largo de todo el Decumanus, y la mayoría de ellos

presentan orientaciones similares a las definidas en el mercado y en la zona sur de la Foro y en la plaza de la Basílica (Silva *et al.*, 2009; Giner-Robles *et al.*, 2013). El análisis del modelado digital de las deformaciones del decumano muestran direcciones y amplitudes de plegamiento muy acordes a las de ondas sísmicas superficiales provenientes del SSO (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2022). No obstante, también se registran estructuras plegadas y subsidencias más marcadas condicionadas por la presencia de estructuras de drenaje subterráneas (Giner-Robles *et al.*, 2017). En estos casos las deformaciones han sido exageradas por la erosión y lavado posterior de los sedimentos alrededor de tales estructuras.

Aparte de las notorias estructuras de plegamiento otros EAEs quedan registrados en el decumano indicándonos el origen sísmico de las deformaciones, como pueden ser: **(a)** fracturación por cizalla de losas individuales; **(b)** roturas orientadas en las esquinas de losas individuales; y **(c)** marcas de impacto por caída de elementos (Fig. 5). Todos estos EAEs indican un movimiento preferente del terreno en dirección NNE-SSO coincidente con las direcciones de plegamiento del enlosado. Las marcas de impacto por la caída orientada de los capiteles de las columnatas del Mercado (Macellum) y Basílica, todas hacia el SO/SSO indican que esta es la dirección preferente de donde procedía el movimiento del terreno (sacudida sísmica). Es decir, indican una fuente sísmica situada mar adentro en la Bahía de Bolonia (Silva *et al.*, 2005; 2009). Investigaciones geofísicas offshore (Grüztner *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2016) han reconocido varias fallas normales de dirección N-S en el interior de la Bahía de Bolonia que también podrían considerarse como potenciales fuentes sísmicas del terremoto-tsunami.

Un aspecto muy importante que considerar sobre este conjunto de deformaciones en enlosados y pavimentos es que estos se produjeron sobre un nivel de escombros poco compactados. Así es, todas las deformaciones en decumano, basílica, foro y en general sobre la

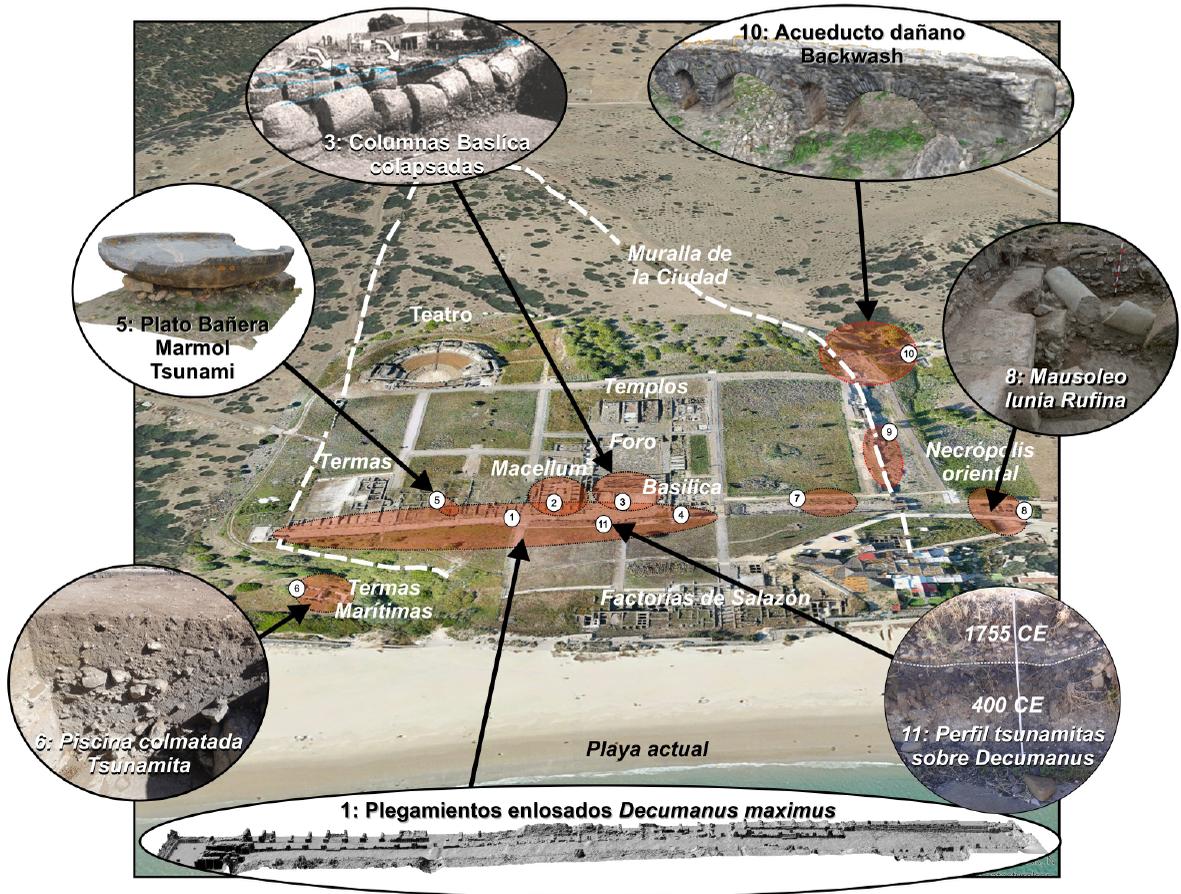


Figura 4: Vista aérea del conjunto arqueológico romano de Baelo Claudia desde el Sur (Mar) mostrando los diez lugares principales donde se observan los efectos del terremoto y posterior tsunami a lo largo de la vía decumana y zonas anexas. Modificada de Sánchez-Sánchez *et al.* (2022).

Figure 4: Aerial view of the Roman archaeological site of Baelo Claudia from the south (Sea) showing the ten main locations where the effects of the earthquake and subsequent tsunami can be observed along the via decumana and adjacent areas. Modified from Sánchez-Sánchez *et al.* (2022).

parte baja de la ciudad afectaron a un nivel de relleno romano de bajas prestaciones geotécnicas. Es el nivel denominado **“nivel de demolición”** que se ejecutó durante las labores de nivelación del terreno para la reconstrucción y monumentalización de la ciudad tras el terremoto de la segunda mitad del siglo I d.C. (Silva *et al.*, 2005; 2016). Sin la existencia de este nivel de relleno antrópico, de bajas capacidades geotécnicas, las estructuras de deformación del terremoto de finales del siglo IV d.C. no serían tan evidentes. En otras palabras, este nivel de escombros poco compactados amplificó las deformaciones (pliegues y pop-ups) que afectan al decumanus aumen-

tando además la destrucción de la parte baja de la ciudad.

Las catas arqueológicas realizadas en el extremo SE del Foro identifican estructuras de deformación sinsedimentarias (pseudo-convolutas) asociadas a deformaciones muy marcadas del enlosado. Estas estructuras fueron inicialmente interpretadas como procesos de soliflucción por Menanteau *et al.* (1983) acorde a las características vérticas - expansivas y pobres propiedades geotécnicas del nivel de demolición y el sustrato arcilloso de la zona. No obstante, estas se pueden clasificar como estructuras de deformación cósmicas. Si-

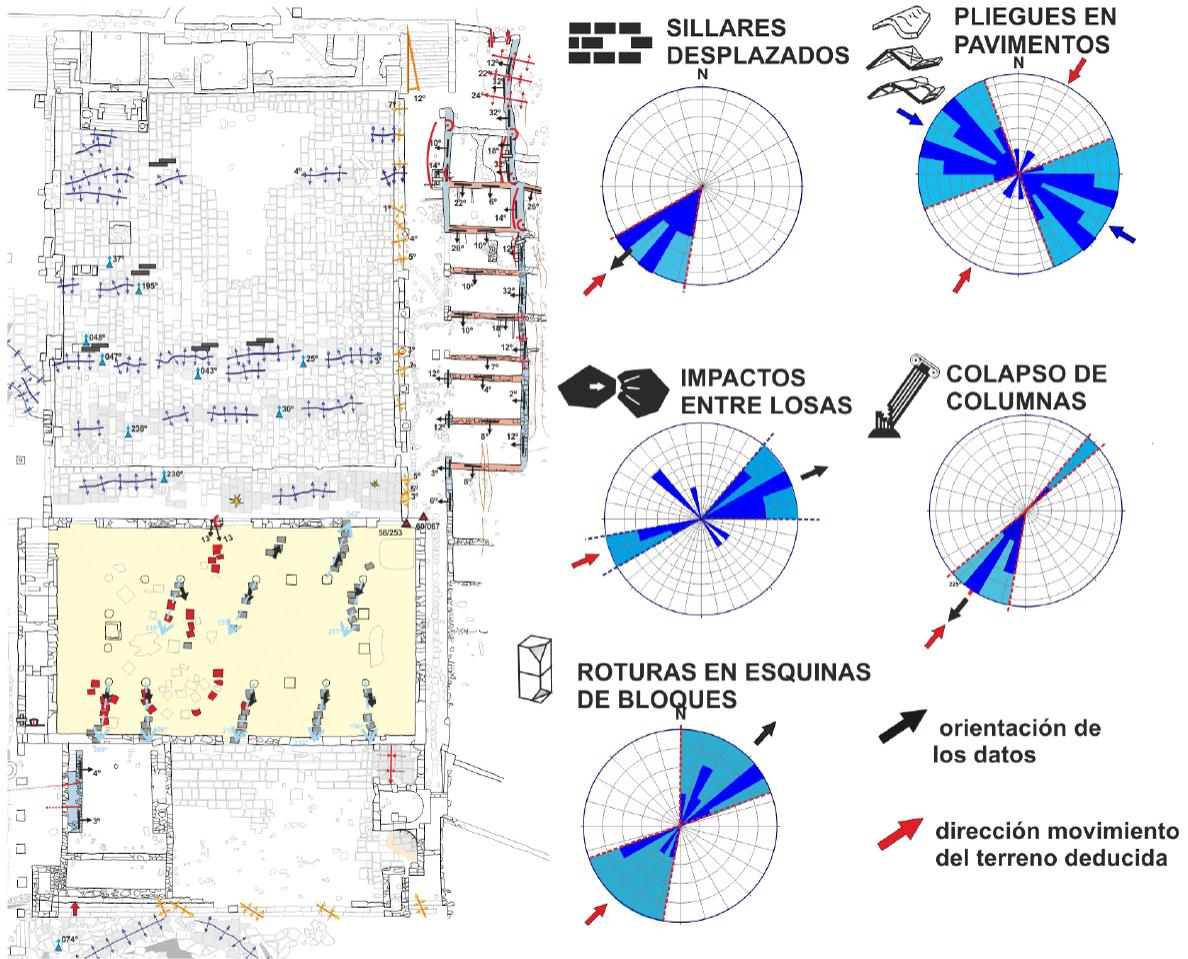


Figura 5: Cartografía de las deformaciones en la zona de la Basílica y Foro al norte del decumanus maximus resultado de varios tipos de EAEs: sillares desplazados, pliegues en pavimentos, impactos entre losas, colapso de columnas (caídas orientadas) y roturas en esquinas de bloques. Los diagramas de la parte izquierda indican la coherencia estadística en la orientación de daños de los diferentes efectos arqueosismológicos evidenciando su claro carácter cosísmico. Modificado de Giner-Robles et al. (2018).

Figure 5: Map of the deformations in the area of the Basilica and Forum north of the decumanus maximus resulting from various types of EAEs: displaced ashlars, folds in pavements, impacts between slabs, collapse of columns (oriented falls) and dipping broken corners in blocks. The diagrams on the left indicate the statistical coherence in the damage orientation of the different archeoseismological effects, evidencing their clear co-seismic character. Modified from Giner-Robles et al. (2018).

milares abombamientos del enlosado se observan en la zona del decumanus situada inmediatamente al sur de la plaza de la Basílica (Giner-Robles et al., 2013; 2018).

La Figura 5 muestra la serie de deformaciones (EAEs) que se registran en la Plaza de la Basílica, Basílica y Foro, inmediatamente al norte de la vía decumana. En ella se observan los

plegamientos de los muros N-S de la galería de tiendas de la zona oriental del Foro, así como la significativa ondulación y plegamiento del antiguo pavimento romano, con estructuras de pop-ups claramente cósmicas. Esta importante perturbación de enlosados y muros es reflejo del comportamiento plástico del sustrato y pavimento romano (plegamiento) y frágil de las estructuras murarias suprayacen-

tes, en la que el deslizamiento diferencial de los sillares acomoda la deformación mediante fracturación intra e interbloque (Giner-Robles *et al.*, 2013).

4. Las huellas del tsunami de finales del siglo IV d.C.

La hipótesis de que un importante tsunami acompañó al segundo terremoto que asoló *Baelo Claudia*, empezó a tomar fuerza a partir de la excavación de las termas marítimas situadas extramuros en la zona más próxima al litoral del conjunto urbano entre los años 2010 y 2012 (Bernal *et al.*, 2017). La piscina principal de la terma se encontraba totalmente rellena por escombros y sedimentos que presentaban anómalas estructuras tractivas hacia el mar y contenían restos de maderos que fueron datados entre los años 129 y 338 d.C y restos arqueológicos atribuibles a una fecha cercana al 400 d.C. (Röth *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016; Bernal *et al.*, 2017). Estos autores advirtieron que sedimentos similares se encontraban recubriendo el decumanus en prácticamente toda su extensión aflorando en la pared sur del mismo aun sin excavar y que actualmente queda como “testigo estratigráfico” del tsunami. Análisis al microscopio de los sedimentos permitieron clasificarlos como un depósito de tsunami (tsunamita) ya que entre los diversos elementos contenía mezcla de microfauna marina (foraminíferos)

tanto planctónicos como bentónicos. Los foraminíferos son de especial interés, especialmente las formas planctónicas cuya presencia en sedimentos litorales son indicativas de procesos de alta energía tipo EWE (Extreme Wave Events) y muy especialmente de eventos de tipo tsunami (e.g. Lario *et al.* 2010; Smedile *et al.* 2020).

4.1. El Nivel de Tsunami (Tsunamita)

La tsunamita de *Baelo Claudia* se encuentra caracterizada por un “nivel negruzco” de 30 a 42 cm de espesor rico en materia orgánica, multitud de restos arqueológicos y elementos fósiles. Este nivel se encuentra en prácticamente todos los afloramientos de la ciudad al Sur y al Este del decumanus incluyendo los rellenos de las termas marítimas (Röth *et al.*, 2015) y los niveles de destrucción del mausoleo de *Iunia Rufina* (Prados *et al.*, 2020) en la necrópolis oriental (Fig. 4). Los datos de excavaciones anteriores indican que este nivel negruzco también se encontraba recubriendo directamente los enlosados del Foro y la Basílica (Menanteau *et al.*, 1983; Sillières, 1997; Silva *et al.*, 2005), cubriendo y englobando multitud de elementos (sillares, tambores de columnas, capiteles, etc..) caídos durante el terremoto y/o arrastrados por el posterior tsunami (Fig. 6). Muchas marcas de impacto en los enlosados por la caída de capiteles y tambores de las columnas en el *Foro*, *Basílica*, *Macellum* y *Decumanus*, indican que tales



Figura 6: Depósito de tsunami con grandes sillares y bloques de construcción en la parte oriental del decumano al este de la basílica excavada en 2020. El martillo de geólogo descansa sobre el nivel correspondiente al decumano.

Figure 6: Tsunami deposit with large ashlars and building blocks in the eastern part of the decumanus east of the basilica excavated in 2020. The Estwing hammer rests on the level corresponding to the decumanus.

elementos cayeron de forma directa sobre los enlosados descartando un periodo de ruina intermedio y certificando el proceso de colapso súbito de tales estructuras todavía en funcionamiento (Sillières, 1997; Silva *et al.*, 2005; 2009). En la actualidad los edificios anteriores se encuentran restaurados y sus enlosados limpios de los depósitos de tsunami y escombros que les recubrían. Los depósitos de tsunami también se encuentran directamente recubriendo los enlosados marmóreos excelentemente preservados de las termas marítimas (Bernal *et al.*, 2017) y del Mausoleo de *Iunia Rufina* (Prados *et al.*, 2020).

El nivel del tsunami responde a una capa caótica, con material pobremente clasificado y una clara secuencia granocreciente (coarsening upwards) formado mayoritariamente por arena rica en granos de cuarzo (65%) bien redondeados y moderadamente seleccionados. Granulométricamente es una arena con una selección moderada-alta, con cola de finos y gruesos. A pesar de esta aparente selección, la mediana del tamaño de grano es alta (>150 μm) y la presencia de detríticos y fragmentos líticos y arqueológicos de tamaño decimétrico sitúan la muestra como un depósito caótico y de alta energía dentro de las clasificaciones sedimentológicas más comunes (e.g. Passega, 1964). Estas características indican: (a) su procedencia de sistemas dunares costeros y barras litorales con arenas bien seleccionadas; y (b) la participación de un evento de alta energía en su depósito o lo que se denominan EWE (Extreme Wave Event) que incluyen depósitos de tsunami (Lario *et al.*, 2010). Muchos granos de cuarzo aparecen rotos o fracturados certificando el carácter energético del evento que los depositó (Silva *et al.*, 2022). Los materiales incluyen grandes bloques y sillares que quedaron “flotando” en la parte superior del depósito (Fig.6). Dentro de este nivel caótico es posible diferenciar multitud de elementos arqueológicos y restos de faunas marinas y continentales difíciles de explicar en condiciones normales (Fig. 6; Röth *et al.* 2015; Silva *et al.*, 2022). Los análisis de microscopio realizados por estos autores identifican una gran variedad de elementos

exóticos dentro de la fracción gruesa (>150 μm) entre los que encontramos (Fig. 7):

- Foraminíferos retrabajados del Mioceno y Plioceno (*Neoglobobulina acostaensis*, *G. inflata*, *G. sacculifer*, *Orbulina universa*, *Cibicides spp*, *Lenticulina spp.*), así como cantos litorales con perforaciones de litófagos (*Lithophaga sp.*) procedentes de zonas intermareales.
- Restos de fauna continental como huesos de macrofauna, huesos, vértebras de roedores, restos de huesos de aves, excrementos de micromamíferos, gasterópodos continentales (caracoles)
- Restos de fauna marina que incluyen fragmentos rotos de conchas de bivalvos, briozoos, radiolas, restos de equinoideos (espinas), bioclastos diversos, así como múltiples espinas, dientes y vértebras de atún y otras especies de peces
- Restos antropogénicos (carbón vegetal, fragmentos redondeados de cerámica, tejas, madera, metal y vidrio).
- Fragmentos de rocas procedentes de materiales de construcción u ornamentales de la ciudad (areniscas silíceas, calizas, calcarenitas, pizarras, mármoles y gabros).

Entre los hallazgos aparecen granos de cuarzo eólicos fracturados, y foraminíferos bentónicos litorales (*Ammonia sp.*, *Cibicides sp.*, *Elphidium sp.*) y planctónicos (*Globigerina sp.*), así como una importante cantidad de piritas framboidales (Fig. 6). Las piritas son comunes en ambientes submareales someros restringidos (lagoons, marismas, etc.) en el Golfo de Cádiz (Borrego *et al.*, 2003; Mediavilla *et al.*, 2023). En concreto, las piritas framboidales son características de zonas contaminadas con un alto grado de eutrofización (falta de oxígeno). En el caso de *Baelo Claudia* se ha propuesto que pudieran proceder del lagoón oriental en la que el vertido de restos de las fábricas de salazón podría haber causado un

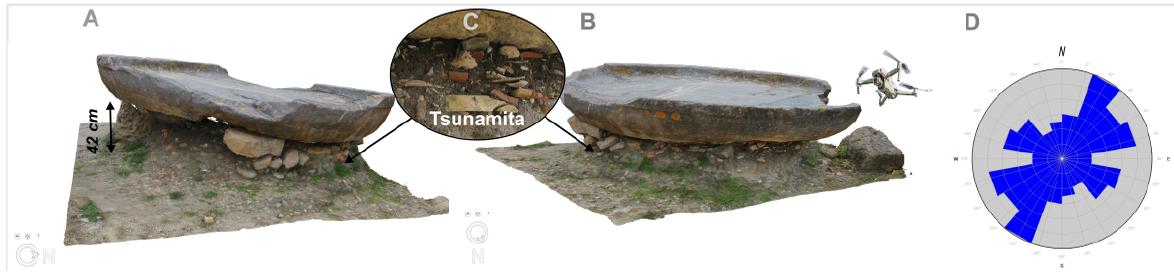


Figura 7: A.B: Modelos 3D del gran plato de mármol (pileta - labrum) arrastrado por la ola de retroceso del tsunami (Backwash) preservando el depósito de este bajo el mismo (ver localización en figura 3). C: Imagen aumentada mostrando la gran variedad de elementos exóticos en la fracción gruesa del depósito del tsunami. Medidas de imbricaciones de los cantos realizadas sobre el modelo 3D indican una orientación NE-SO del sentido de la corriente del tsunami similar a los EAes catalogados en la zona (ver figura 5). Modificado de Sánchez-Sánchez *et al.*, 2020).

Figure 7: A.B: 3D models of the large marble plate (labrum) washed away by the tsunami backwash preserving the tsunami deposit under the tsunami (see location in Figure 3). C: Magnified image showing the large variety of exotic elements in the coarse fraction of the tsunami deposit. Measurements of pebble imbrications made on the 3D model indicate a NE-SW orientation of the tsunami current direction similar to the EAes catalogued in the area (see Figure 5). Modified from Sánchez-Sánchez *et al.*, 2020).

proceso de contaminación y eutrofización de las aguas (Silva *et al.*, 2022). No obstante, muchas de estas piritas pueden proceder de su retrabajo miento de la Unidad de Arcillas del Almarchal, donde son también muy abundantes. Múltiples sondeos en la zona del antiguo lagoon litoral de la zona oriental de la ciudad registran el nivel de tsunamita en el interior de la antigua laguna, donde también aparecen niveles de inundación más discretos asociados al tsunami de Lisboa de 1755 (Fig. 2; Reichert *et al.*, 2022).

La excepcional mezcla de elementos faunísticos marinos y continentales junto con elementos arqueológicos de toda índole certifican que la tsunamita es un depósito dejado por el retroceso de la ola del tsunami (backwash), que quedó especialmente represado en la vía decumana. Los datos más recientes a lo largo de la muralla y necrópolis oriental de Baelo Claudia, sugieren que la inundación principal se produjo desde la zona de la laguna oriental (más baja). La ola pudo superar la muralla, ya que desde la segunda mitad del siglo I d.C. en esa zona se había acumulado un importante vertedero de basuras y escombros al pie de la muralla evaluado en 1500 m³ formando una rampa (Arévalo *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2022). Esta inmensa cantidad de escombros y basura podría explicar la incorporación al depósito de tsunamis de tal gran cantidad de diferentes

elementos arqueológicos y paleontológicos marinos y continentales.

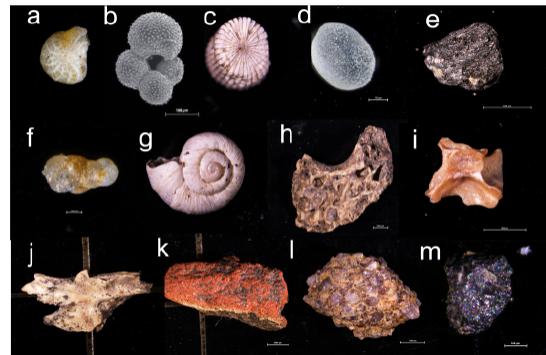


Figura 8: Diferentes elementos paleontológicos, arqueológicos y geológicos que aparecen dentro de los depósitos de tsunami en su estudio al microscopio.

a: Foraminífero bentónico; b: Foraminífero planctónico; c: Espina de equinodermo; d: Grano de cuarzo eólico (dunar); e: Fragmento de Carbón vegetal; f: Foraminífero Planctónico retrabajado; g: Gasterópodo terrestre (caracol); h: Huesos de ave; i: Espinas de pescado (Atún); j: Mandíbula de roedor; k: Fragmento de cerámica; l: Fragmento de arenisca de construcción; m: Piritas framboidales.

Figure 8: Different paleontological, archaeological and geological elements that appear within the tsunami deposits in their microscopic study. a: Benthic foraminifera; b: Planktonic foraminifera; c: Echinoderm spine; d: Aeolian quartz grain (dune); e: Charcoal fragment; f: Reworked planktonic foraminifera; g: Terrestrial Gastropod (snail); h: Bird bones; i: Fish bones (Tuna); j: Rodent jaw; k: Ceramic fragment; l: Fragment of sandstone; m: Fragment of framboidal pyrite.

4.2. Los efectos destructivos del Tsunami

Los recientes hallazgos en el Mausoleo de *Lunia Rufina* de la necrópolis oriental, acabaron por despejar todas las dudas. El Mausoleo erigido en la segunda mitad del siglo I d.C. preserva las diferentes etapas de su súbita destrucción durante el siglo IV d.C., con **(a)** el colapso orientado de columnas y escombros; y **(b)** su posterior enterramiento por los depósitos del tsunami (Fig. 4; Prados *et al.*, 2020; Reicherter *et al.*, 2022). De la misma manera la datación de estos elementos arrastrados por la inundación puede explicar las fechas anómalas que llevaron a posicionar erróneamente el segundo terremoto que asoló la ciudad en la segunda mitad del siglo III d.C. (Silva *et al.*, 2009; Grützner *et al.*, 2012). Muchos de estos elementos podrían haber sido arrastrados desde las escombreras y basureros del paramento exterior de la muralla, incorporando elementos más antiguos (siglos II - III d.C.) al depósito del tsunami.

Estos nuevos datos también ayudan a interpretar antiguas imágenes de archivo de las excavaciones en los años 70 y 80 (Sillières, 1997) en las que se observa como el colapso orientado “en dominó” de las columnas más meridionales de la Basílica se apoyan sobre



Figura 9: Fotos de Archivo del Conjunto Arqueológico romano de Baelo Claudia mostrando la caída orientada de la columnata de la Basílica hacia el SSO durante las excavaciones de los años 1972 - 1973.

Figure 9: Archive photos from the Roman Archaeological Site of Baelo Claudia showing the oriented fall of the Basilica colonnade towards the SSW during the excavations of the years 1972 - 1973.

un nivel de escombros caóticos. Ahora entendemos que estos niveles que rodean los tambores de las columnas corresponden a los niveles de escombros incorporados a la tsunamita represados por los restos inferiores del muro exterior destruido (Fig. 9). Casi con toda seguridad la caída orientada de la columnata de la basílica también pudo estar motivada, o al menos facilitada por la ola de retroceso del tsunami. En cualquier caso, las cotas de los depósitos del tsunami conservados en la parte sur del decumano nos indican que estos derrumbes estarían prácticamente rodeados y enterrados por estos depósitos.

Esto queda especialmente patente en el registro estratigráfico del derrumbe del Mausoleo de *Lunia Rufina* (Fig. 10), donde claramente se preserva el nivel de colapso y derrumbe orientado hacia el NE provocado por el terremoto y el posterior nivel de la tsunamita que lo recubre. El nivel de colapso cósmico contiene la caída orientada de las columnas del monumento funerario, incluido capiteles y el dintel con el epígrafe de *Lunia Rufina*, situada a unos 3-4 m de la base del monumento original (Prados *et al.*, 2020). El nivel de colapso lo hace sobre un nivel de uso que contiene fragmentos de cerámica y monedas de mediados del siglo IV d.C. (en concreto, dos ases de Constancio II acuñados hacia 340 d.C.) que definitivamente fechan el evento (Reicherter *et al.*, 2022). El nivel de colapso se encuentra claramente embebido en un nivel negro, con gran cantidad de escombros y conchas y fragmentos de organismos marinos (Prados *et al.*, 2020).

Un último aspecto del tsunami, está relacionado con aspectos erosivos y destructivos del mismo, especialmente de su ola de retroceso (backwash). Aunque los depósitos del tsunami nos indican que la ola no rebasó los +8 m sobre el nivel del mar y que seguramente quedo reducida hasta la zona de las escaleras de acceso a los templos desde Foro, en zonas más bajas la ola tuvo mayor poder de penetración (Fig. 3). Esto es especialmente cierto en los pequeños valles de los arroyos que rodean la ciudad y que en época romana desembocaban en la antigua laguna litoral de la zona oriental

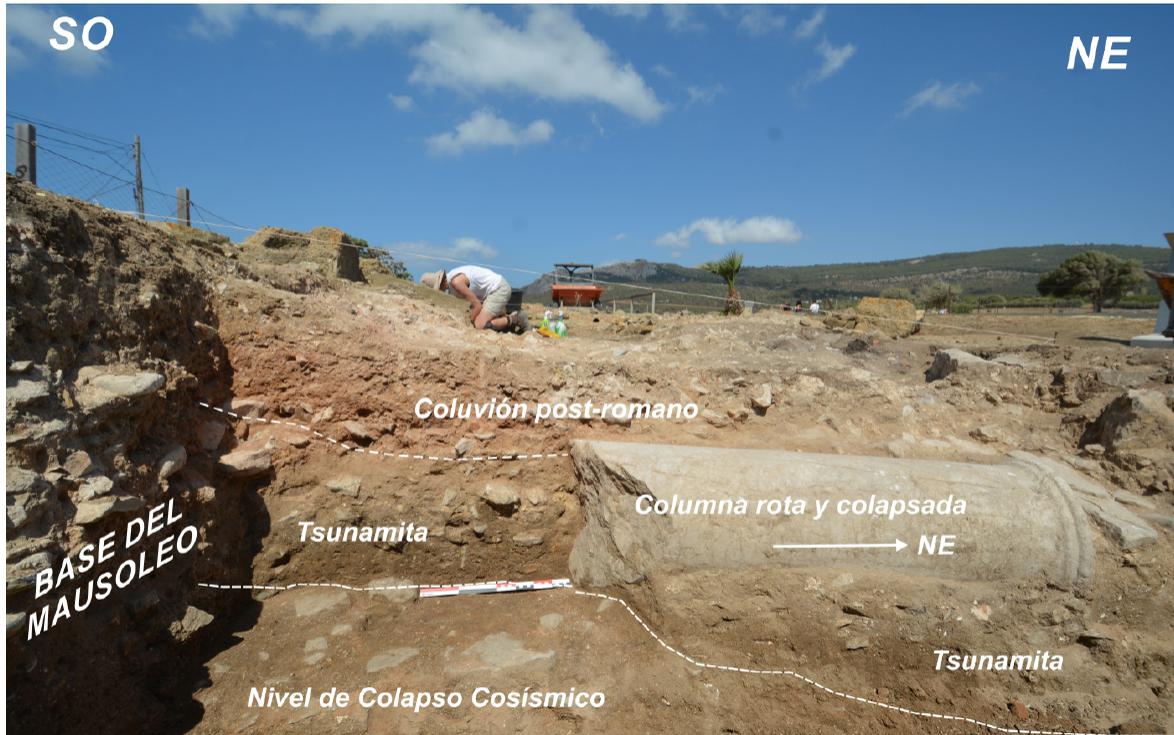


Figura 10: Vista de la excavación del Mausoleo de “Iunia Rufina” que muestra la secuencia sedimentaria del terremoto-tsunami. Véase la ubicación del Mausoleo en la Fig. 1.

Figure 10: View of the excavation of the “Iunia Rufina” Mausoleum showing the sedimentary sequence of the earthquake-tsunami event. See location of the Mausoleum in Fig. 1.

de la ciudad. En estas zonas la ola pudo canalizarse valle arriba, adquiriendo más energía y penetrando acaso cerca de un kilómetro hacia el interior (Reicherter *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Fig. 3). Este sería el pequeño caso del Arroyo de la Villa en el que aparece destruido, arrastrado y colapsado la única arcada de acueducto que se conserva en el entorno de la ciudad (Fig. 10). El acueducto presenta colapsada su pared oriental hacia el valle (SSO) y arrastrada y cizallada su prolongación hacia el interior de la ciudad en la ladera Oeste del valle, que dio lugar al colapso parcial del mismo. En principio, estos efectos se interpretaron como efectos del terremoto con un colapso orientado hacia el SSO en la ladera oriental y un pequeño deslizamiento cosísmico de la ladera occidental (Silva *et al.*, 2009). No obstante, la destrucción y erosión de puentes en sus estribos laterales por socavación y arrastre es también característica de procesos de grandes inundaciones o riadas. Este no puede

ser el caso del acueducto ya que la pequeña vaguada que atraviesa comienza apenas 400 metros aguas arriba del mismo, con una cuenca de recepción de tan solo 1300 m² (Fig. 2), claramente insuficiente para generar grandes caudales incluso durante grandes episodios de tormenta. Por el contrario, la entrada y retroceso de una energética ola de tsunami sí podría explicar tales efectos (Fig. 10) que se sumarían, o incluso provocarían o amplificarían, a las deformaciones generadas por el anterior terremoto y el deslizamiento cosísmico. En determinadas zonas que han sufrido grandes terremotos a la vez que grandes procesos de inundación o tsunamis estos riesgos múltiples se encadenan facilitando la destrucción de puentes. Especialmente importante es la acumulación de debris, escombros y vegetación en la ola de retroceso, así como la erosión diferencial en los estribos al sobrepasar o igualar el caudal la altura del obstáculo (Ganesh Prasad *et al.*, 2013; Kameshwar *et al.*, 2021).

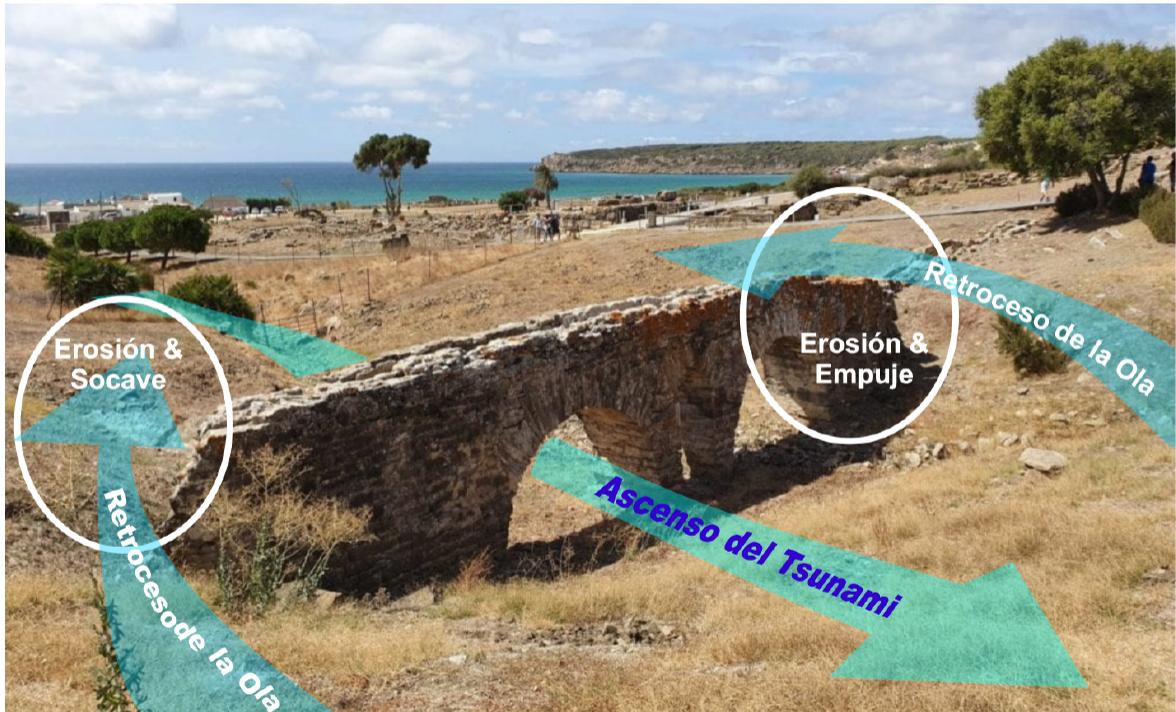


Figura 11: Fotografía del acueducto dañado en el sector oriental de la ciudad que muestra la interpretación de los daños debidos a la probable penetración y retirada del tsunami causando erosión bilateral. Véase la ubicación del acueducto en la Fig. 1.

Figure 11: Photo of the damaged aqueduct in the eastern sector of the city displaying interpretation of damage due to probable tsunami run-up and subsequent landfall causing bilateral erosion. See location of the Aqueduct in Fig. 1.

5. Conclusiones

Los estudios arqueológicos y geológicos desarrollados desde los inicios del siglo XXI, certifican que la ciudad romana de *Baelo Claudia* sufrió dos importantes terremotos. Uno en la segunda mitad del siglo I d.C. y el segundo a finales del siglo IV d.C. Ambos eventos sísmicos tuvieron un impacto directo sobre el urbanismo de la ciudad y el segundo de ellos provocó la destrucción y abandono paulatino de la ciudad y de su principal actividad económica: las factorías de salazones, que quedaron totalmente inactivas. Todo este proceso se solapó con el momento de crisis que se pone en relación con el declive del Imperio Romano en Occidente. El segundo evento vino acompañado de un importante tsunami del que se conservan importantes efectos sedimentarios y erosivos. Los dos terremotos y en especial el segundo tienen un importante registro en los restos arqueológicos y aflora-

mientos geológicos que se observan a lo largo de la vía decumana de la ciudad.

Los hallazgos arqueológicos en la vía decumana, Termas marítimas y necrópolis oriental de la ciudad (Mausoleo de *Iunna Rufina*), claramente colocan al terremoto-tsunami en la segunda mitad del siglo IV d.C., entre los años 360 y 390 d.C. (Prados *et al.*, 2020). Coincidiendo con las primeras determinaciones arqueológicas (cerámica y monedas) utilizadas por Menanteau *et al.* (1983) para fechar el evento. No obstante, dataciones C^{14} indican una edad ligeramente posterior a comienzos del siglo V d.C., entorno al año 400 d.C. (Reicherter *et al.*, 2022). En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la mayoría de las dataciones C^{14} aportadas por estos autores poseen indeterminaciones mínimas de ± 30 años, que nos sitúan el tsunami entre los años c. 360 y 420 d.C. que pueden explicar la pequeña discordancia y solapamiento entre la

datación por elementos arqueológicos (monedas, cerámica, etc.) y por radiocarbono. En todo caso, un enterramiento infantil excavado sobre los niveles de colapso del terremoto permite poner cerco al evento: tanto el ánfora que lo contuvo a modo de sarcófago, como el esqueleto datado por C^{14} , lo sitúan mediados del siglo V (Prados et al., 2020). Así pues, el evento sísmico tuvo lugar con certeza entre los años 360 y 450 y muy probablemente más próximo a la primera fecha como indican otros elementos arqueológicos.

Los análisis arqueosismológicos del entorno urbano indican que ambos terremotos tuvieron una intensidad igual o superior a VIII grados en la escala Mercalli de intensidades. La acción del tsunami en el segundo evento elevó la destrucción a intensidad IX, con la destrucción de amplias zonas de la parte baja de la ciudad y el derrumbe de diversos tipos de edificios tan públicos como privados (Sillières, 2005; Silva et al., 2005; 2009). El inventario y catalogación de daños orientados indican que la dirección del movimiento del terreno fue SSO-NNE (Fig. 5) al igual que la dirección de inundación y retirada del tsunami (Fig. 7). Los análisis sedimentológicos certifican la existencia de un depósito de tsunamita negruzco de entre 30 y 42 cm de espesor que contiene una gran colección de material exótico de carácter arqueológico, antrópico y paleontológico. Entre estos últimos la mezcla de microforaminíferos bentónicos y planctónicos sugieren la participación de un evento de alta energía en su depósito.

La gran variedad de elementos arqueológicos (fragmentos de cerámicas, tejas, rocas ornamentales, metales, vidrios, etc.) y paleontológicos (fragmentos de grandes huesos, conchas de bivalvos y gasterópodos, espinas de pescado, restos de aves, roedores, etc.) sugieren que el depósito del tsunami se produjo por el represamiento del retroceso del tsunami (backwash) a lo largo de la vía decumana e infraestructuras anexas, como la basílica, las temas marítimas o los mausoleos de la necrópolis oriental (Fig. 4). Todos estos hallazgos sugieren que la inundación prin-

cipal se produjo desde el SE arrastrando los sedimentos desde la laguna litoral y la gran cantidad de escombros y basura que se había acumulado desde el siglo II d.C. a lo largo del lienzo oriental de la muralla de la ciudad. Los nuevos hallazgos sedimentológicos (Silva et al., 2022) registran una importante presencia de “pirita framboidal” en la fracción arenosa (c. 100 -150 μm) de estos depósitos (Fig. 7). Los framboides de pirita son también comunes en ambientes litorales lagunares y estuarinos, especialmente bajo condiciones casi euxínicas en aguas sulfatadas pobremente oxigenadas y comúnmente relacionadas con la degradación de materia orgánica por actividad bacteriana (e.g. Wilkin et al., 1996). Los framboides metálicos aparecen como productos diagenéticos tempranos del sedimento cerca de las interfases redox situadas justo debajo de la interfase sedimento-agua y son comunes en depósitos litorales recientes cercanos al yacimiento (Mediavilla et al., 2023). La aparición de framboides de pirita es también un producto diagenético común en aguas altamente contaminadas por la actividad minera, industrial y de residuos orgánicos en zonas estuarinas del Golfo de Cádiz (Borrego et al., 2006).

En definitiva, los datos conseguidos a lo largo de estos últimos 10 años indican que las olas del tsunami arrasaron la antigua barra romana y la laguna oriental de la ciudad y que los escombros retrocedieron en dirección OSO hacia la ciudad, sobrepasando y destruyendo parcialmente sus muros orientales, alcanzando una altura de entre 8 y 10 m. Sin embargo, en los pequeños valles que rodean la ciudad, la ola pudo canalizarse y penetrar tierra adentro a mayor altura. Esta puede ser la causa de los daños observados en el pequeño acueducto al este de la ciudad cuyos estribos presentan erosión y socave bilateral, arrastre ladero abajo y destrucción parcial compatible con una llegada enérgica del tsunami desbordando la estructura (Fig. 10). Esta interpretación también puede explicar el importante número de escombros y basuras incorporados a la capa de tsunami, ya que la ola pudo movilizar parte del anómalo volumen (c. 1.500 m^3) de

residuos acumulados contra el lado exterior de la muralla oriental de la ciudad durante los siglos I y II d.C. (Arévalo *et al.*, 2017). Por otro lado, la aparición de pirita framboidal podría indicar un caso de contaminación temprana de la zona lagunar, quizá relacionada con residuos orgánicos procedentes de la producción intensiva de las múltiples factorías de pescado de la ciudad. Sin embargo, las piritas son comunes en la formación cretácea de Almarchal que aflora en los alrededores de la zona y no se puede descartar su reelaboración. Esta hipótesis necesitará de análisis geoquímicos adicionales de los depósitos lagunares. Sea como fuere, dentro de la ciudad las calles N-S (Cardos) dirigieron el flujo de retroceso hacia el mar, pero el decumano máximo de dirección E-O actuó como una importante trampa de sedimento.

Las excavaciones arqueológicas indican que tanto en la basílica, termas marítimas y Mausoleo de *Iunia Rufina* el nivel de colapso del terremoto se produjo sobre niveles de uso, siendo claras las marcas de impactos por la caída orientada de columnas y capiteles (Silva *et al.*, 2009; Giner-Robles *et al.*, 2018) o la presencia de elementos arqueológicos (monedas o cerámica) de la segunda mitad del siglo IV d.C. (Prados *et al.*, 2020; Reichter *et al.*, 2022) que quedan atrapadas en el mismo. Tal y como muestran las figuras 10 y 11 los restos colapsados quedan atrapados y embebidos por la tsunamita que, como ya se ha mencionado, corresponde a depósitos y escombros arrastrados por el retroceso de la ola del tsunami que quedaron represados entre las ruinas del terremoto inmediatamente anterior. No se puede descartar que parte de la destrucción y caídas orientadas se produjeran como consecuencia de la ola de retroceso del tsunami. Los datos arqueosismológicos recogidos desde el año 2005 indican que el nivel de destrucción sísmica puede asociarse a un terremoto de intensidad VIII - IX en la Escala ESI-07 o la MSK (Silva *et al.*, 2019). Los nuevos datos del tsunami, con una altura de 8-10 m, una penetración de hasta 250-300 m en la ciudad, pero de hasta algo más de un kilómetro en los valles que rodean la ciudad, arrastre

masivo de escombros y sedimentos, generando una tsunamita de algunas decenas de centímetros de espesor y participación importante en los daños, hace que este pueda clasificarse con intensidad IX en la Escala de efectos ambientales de los tsunamis (TEE-16) propuesta por Lario *et al.*, (2016). Según esta escala entraría en la categoría de tsunamis destructivos caracterizados por: “*Altura del tsunami entre 6-8m y un run-up máximo cercano a los 12-16m. Las zonas inundadas se pueden extender varios cientos de metros tierra adentro. Presencia de extensas capas de arena de espesor centimétrico (tsunamitas) ampliamente distribuidas, así como de grandes bloques y cantos en zonas cercanas al litoral. También pueden registrarse efectos erosivos significativos (scours, socaves, etc.) en zonas de playa, barras litorales y arroyos cercanos a la costa*”. Por tanto, este terremoto-tsunami es el más importante registrado en las costas del Estrecho de Gibraltar (IX) y el segundo más importante registrado en las costas de la península, después del de Lisboa de 1755 (X).

Agradecimientos

Esta investigación forma parte del Proyecto de Investigación Español I+D+i PID2021-123510OB-I00 (QTECIBERIA-USAL) financiado por el MICIN AEI/10.13039/501100011033/ y por el Instituto de Neotectónica y Riesgos Naturales de la Universidad RTWH Aachen (Alemania). Esta es una contribución del Grupo de Trabajo QTECT-AEQUA. Los autores agradecen la revisiones y comentarios de dos revisores anónimos que han ayudado a mejorar el trabajo.

Bibliografía

- Alonso-Villalobos, F.J.; Gracia-Prieto, F.J.; Ménanteau, L.; Ojeda, R. Benavente, J. & Martínez, J.A. (2003). Paléogeographie de l'anse de Bologne (Tarifa, Espagne) à l'époque romaine. In: *The Mediterranean World Environment and History*. Elsevier S.A.S. Amsterdam, 407-417.
- Arévalo, A., Bernal, D., Muñoz, A., *et al.* (2016). Recientes actuaciones arqueológicas en la mu-

- ralla oriental y en la necrópolis tardorromana de Baelo Claudia. *III Jornadas Internacionales de Baelo Claudia*. Casa de Velázquez, Madrid, 215-236.
- Bernal D, Díaz J. J., Expósito J.A. (2017). Les thermes maritimes de Baelo Claudia et le suburbium occidental. *Mélanges de la Casa de Velázquez, Nouv Sér*, 47 (1)133-150. <https://doi.org/10.4000/mcv.7404>
- Borrego, J., Monterde, J., Morales, J.A., *et al.* (2003). Early diagenetic pyrite morphology in recent sediments of the Odiel Estuary (SW Spain). *Geogaceta*, 33: 99-101.
- Galbis, R.J., (1932). Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 50ºE y 20ºW de Greenwich y los paralelos 45º y 25ºN. Tomo I. Dirección General del Instituto Geográfico. Catastral y de Estadística, Madrid.
- Ganesh Prasad, G.; Banerjee, S. (2013). The Impact of Flood-Induced Scour on Seismic Fragility Characteristics of Bridges. *Journal of Earthquake Engineering*, 17, 803-828. <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.771593>
- Giner-Robles, J.L.; Silva, P.G.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Pérez-López, R. & Bardají, T. (2013) Mapa de efectos arqueológicos de terremotos (EAEs) en la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz, España). *Libro-Guía Excursiones VIII Reunión Cuaternario Ibérico* (Anexo), AEQUA, Sevilla, 2013.
- Giner-Robles, J. L., Rodríguez-Pascua, M. A., Silva, P. G., Pérez-López, R. (2018). Efectos sísmicos en yacimientos arqueológicos: catalogación y cuantificación arequeosismológica. *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1), 445- 463. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.018>
- Grützner; C.; Reicherter, K.; Hübscher, C.; Silva, P.G. (2012). Active faulting and neotectonics in the Baelo Claudia area, Campo de Gibraltar (Southern Spain). *Tectonophysics*, 554-557, 127-142. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.025>
- Kameshwar, S., Park, H., Cox, D.T., Barbosa, A.R. (2021). Effect of disaster debris, floodwater pooling duration, and bridge damage on immediate post-tsunami connectivity. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102119>
- Kelly, G. (2004). Ammianus and the Great Tsunami. *The Journal of Roman Studies*, 94: 141-167. <https://doi.org/10.1017/S0075435800064212>
- Lario, J.; Luque, L.; Law, C., Goy, J.L; Spencer, C.; Cabero, A.; Bardaji, T.; Borja, F.; Dabrio, C.; Civis, J.; Gonzalez-Delgado, J.A.; Borja, C.; Alonso-Azcarate, J. (2010). Tsunami vs. Storm surge deposits: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave events (EWE) during the Holocene in the gulf of Cadiz, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54 (3), 301 - 316. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054S3-0029>
- Lario, J.; Bardaji, T.; Silva, P.G.; Zazo, C.; Goy, J.L. (2016). Improving the coastal record of tsunamis in the ESI-07 scale: Tsunami Environmental Effects Scale (TEE-16 scale). *Geologica Acta*, 14 (2), 179 - 193.
- Martínez Solares, J.M. y Mezcuca, J. (2002). Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1900). Ministerio de Fomento, Monografía nº 8, Madrid. 256 pp.
- Mediavilla, R.; Santisteban, J.I., Val-Peón, C.; Galán L., Mathes-Schmidt, M.; López-Sáez, J.A.; Gracia, F.J.; Reicherter, K. (2023). 26,000 years of environmental evolution of an incised valley in a rocky coast (La Janda wetland, SW Iberia). *Continental Shelf Research* 262(3), 105028. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105028>
- Menanteau, L.; Vanney, J.R.; Zazo, C. (1983) *Belo II: Belo et son environment (Detroit de Gibraltar), Etude physique d'un site antique*. Pub. Casa de Velazquez, Serie Archeologie 4., Ed. Broccard, París. 83 pp.
- Paris, P., Bonsor, G., Laumonier, A., Ricard, R., Mergelina C. De (1923). Fouilles de Belo (Bolonía, Province de Cadix), 1917- 1921, Tome 1, La Ville et sus dependances, Bordeaux, France
- Pirazzoli, P., Laborel, J., Stiros, S., (1996). Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times. *Journal of Geophysical Research* 101, 6083 - 6097. <https://doi.org/10.1029/95JB00914>
- Prados Martínez, F. (2011). La necrópolis oriental de Baelo Claudia (Tarifa, Cádiz) en el contexto de la religiosidad púnico-mauritana. Una lectura a partir de las últimas actuaciones arqueológicas. *Zephyrus*, 68. 191 - 210. <https://revistas.usal.es/uno/index.php/0514-7336/article/view/8758>
- Prados Martínez, F., Jiménez-Vialás, H., Abad L. (2020). Primeros avances de la intervención arqueológica en los mausoleos de la puerta sureste de *Baelo Claudia*: el monumento de *Iunia Rufina*. *Zephyrus*, 85: 163-184. <https://doi.org/10.14201/zephyrus202085163184>
- Passaga, R. (1964). Grain size representation by CM patterns as a geologic tool. *Journal of Sedimentary Research*, 34(4), 830-847. <https://doi.org/10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D>

- Reicherter, K., Prados, F., Jiménez-Vialás, H., *et al.* (2022). The Baelo Claudia tsunami archive (SW Spain): archaeological deposits of high energy events, in: *Historical Earthquakes and Tsunamis in the Iberian Peninsula: An Interdisciplinary Dialogue* (Álvarez-Martí-Aguilar M, Machuca-Prieto F, Eds). Springer, Germany 236-256. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1979-4_13
- Rodríguez-Pascua, M. A.; Pérez-López, R.; Silva, P. G.; Giner-Robles, J. L.; Garduño-Monroy, V. H.; Reicherter, K. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242, 20 - 30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.04.044>
- Röth, J.; Mathes-Schmidt, M.; García Jiménez, I.; Rojas Pichardo, F.J.; Grützner, C.; Silva, P.G.; Reicherter, K. (2015). The Baelo Claudia tsunami hypothesis: results from a multi-method sediment analysis of late-Roman deposits (Gibraltar Strait, Southern Spain). *Miscellanea INGV*, 27.418-422.
- Sánchez-Sánchez, Y.; Elez, J.; Silva, P.G.; Santos, G.; Giner-Robles, J.L.; Reicherter, K. (2022). 3D Modelling of Archaeoseismic Damage in the Roman Site of Baelo Claudia (Gibraltar Arc, South Spain). *Remote Sensing*, 12, 5223. <https://doi.org/10.3390/app12105223>
- Sillières, P. (1997). Baelo Claudia: Una ciudad Romana de la Bética. Junta de Andalucía- Casa de Velázquez, Madrid. 237 pp.
- Sillières, P. (2005). Las investigaciones arqueológicas en Baelo. *Aljandra*, 59, 8-13.
- Silva, P.G.; Borja, F.; Zazo, C.; Goy, J.L.; Bardají, T.; De Luque, L.; Lario J.; Dabrio, C.J. (2005). Archaeoseismic record at the ancient Roman City of Baelo Claudia (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics*, 408 (1-4). 129-146. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.031>
- Silva, P.G.; Reicherter, K.; Grützner, Ch.; Bardají, T.; Lario, J.; Goy, J.L.; Zazo, C.; Becker-Heidmann, P. (2009) Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolonia Bay area, Cádiz (south Spain). *Geological Society of London, Special Publication*, 316. 93-121. <https://doi.org/10.1144/SP316.6>
- Silva, P.G., Bardají, T., Roquero, E., *et al.* (2015). Seismic palaeogeography of coastal zones in the Iberian Peninsula: Understanding ancient and historic earthquakes in Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 29: p.31-56. <https://doi.org/10.17735/cygv29i1-2.31012>
- Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Reicherter, K., Rodríguez-Pascua, M.A., Grützner, C., García-Jiménez, I., Carrasco, P., Bardají, T., Santos, G., Roquero, E., Röth, J., Perucha, M.A., Pérez-López, R., Fernández Macarro, B., Martínez-Graña, A.M., Goy, J.L., Zazo, C. (2016). Los terremotos antiguos del conjunto arqueológico romano de Baelo Claudia (Cádiz, Sur de España): Quince años de investigación arqueosismológica. *Estudios Geológicos*, 72(1), e050 (24pp). <https://doi.org/10.3989/egol.42284.392>
- Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., Elez, J., Huerta, P., García-Tortosa, F., Bardají, T., Perucha, M.A., Vicente Gómez, P., Pérez-López, R., Lario, J., Roquero, E., Bautista Davila, M.B. (2019). Catálogo de Efectos Geológicos de los terremotos en España, 2ª Edición (Revisada y ampliada). IGME *Serie Riesgos Geológicos y Geotecnia*, 6. 804 pp. IGME. Madrid, España.
- Silva, P.G., Elez, J., Pérez-Tarruella, J. Sánchez-Sánchez, Y., Santos, G., Carrasco-García, P., Giner-Robles, J.L., Roquero, E., Reicherter, K., García-Jiménez, I., Prados, F., Pérez-López, R., Bardají, T., Rodríguez-Pascua, M.A. (2022). Archeoseismological analysis of the late 4th century tsunami event of Baelo Claudia (Gibraltar Arc, South Spain). *Resúmenes IV Reunión Iberfault* (Teruel, Spain), 73-76.
- Smedile A, Molisso F, Chagué C *et al* (2020) New coring study in Augusta Bay expands understanding of offshore tsunami deposits (Eastern Sicily, Italy). *Sedimentology* 67(3):1553-1576. <https://doi.org/10.1111/sed.12581>
- Stiros, S. (2001). The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the fourth to sixth centuries in the Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data. *Journal of Structural Geology*, 23. 545-562. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00118-8)
- Stiros, S. (2010). The 8.5+ magnitude, AD365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature. *Quaternary International* 216. 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.05.005>
- Wilkin, R.T., Barnes, H.L., Brantley, S.L. (1996). The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (20): 3897-3912. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00209-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00209-8)
- Zazo, C., Silva, P.G., Goy, J.L., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Lario, J., Bardají, T., González, A. (1999). Coastal uplift in continental collision

plate boundaries: data from the Last Interglacial marine terraces of the Gibraltar Strait area (south Spain). *Tectonophysics* 301 (1-2), 95-109. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00217-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00217-0)

Zazo, C., Dabrio, C.J., Goy, J.L., Lario, J., Cabero, A., Silva, P.G., Bardají, T., Mercier, N., Borja, F., Roquero, E. (2008). The coastal archives of the

last 15 ka in the Atlantic-Mediterranean Spanish linkage area: Sea level and climate changes. *Quaternary International* 181, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.05.021>

Recibido el 6 de noviembre de 2023

Aceptado el 23 de noviembre de 2023

