

Fracturación cortical inferida a partir de técnicas de sismicidad activa y pasiva: extensión neógena en el "forebulge" de la Cuenca del Guadalquivir

Cortical fracturing inferred from active and passive seismicity techniques: Neogene extension in the "forebulge" of the Guadalquivir Basin

Francisco Manuel Alonso-Chaves¹, Albert Macau², Sara Figueras², Beatriz Benjumea², Anna Gabàs², Antoni Roca², Encarnación García-Navarro¹, Ricard Puig² y José Sedano²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, 21007 Huelva. alonso@uhu.es y navarro@uhu.es

² Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuïc, 08036 Barcelona. albert.macau@icgc.cat; sara.figueras@icgc.cat; beatriz.benjumea@icgc.cat; anna.gabas@icgc.cat; antoni.roca@icgc.cat

ABSTRACT

The application of passive and active seismicity techniques has allowed us to observe variations in the fundamental frequency of the soil in a transversal in the estuaries Odiel and Tinto (Huelva). The lowest values (0.27-0.29 Hz) are at the eastern end of the transversal, near Mazagón. The highest values (0.83-1.06 Hz) are located at the western end of the transversal, west of Odiel. The "rocky basement" (mechanical) is identified as the roof of the transgressive basal complex (limestones of Neogene age). The Paleozoic basement will be located 10-20 meters below these limestones. It is interpreted that NNE-SSO extensional faults accommodate the extension of the earth's crust during the Neogen in relation to the "forebulge" of the Guadalquivir Basin.

Key-words: passive and active seismicity, fracturing, "forebulge", Neogene, Guadalquivir basin.

Geogaceta, 67 (2020), 15-18
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

RESUMEN

La aplicación de técnicas de sismicidad pasiva y activa ha permitido observar variaciones en la frecuencia fundamental del suelo en una transversal a los estuarios Odiel y Tinto (Huelva). Los valores más bajos (0,27-0,29 Hz) están en el extremo oriental de la transversal, en las proximidades de Mazagón. Los valores más altos (0,83-1,06 Hz) se localizan en el extremo occidental de la transversal, al oeste del Odiel. El "basamento rocoso" (mecánico) es identificado como el techo del Complejo Basal Transgresivo (calizas neógenas). El zócalo paleozoico estará situado 10-20 metros por debajo de dichas calizas. Se interpreta que fallas extensionales NNE-SSO acomodan la extensión de la corteza terrestre durante el Neógeno en relación con el "forebulge" de la Cuenca del Guadalquivir.

Palabras clave: sismicidad pasiva y activa, fracturación, "forebulge", Neógeno, Cuenca del Guadalquivir.

Fecha de recepción: 30/06/2019
Fecha de revisión: 17/10/2019
Fecha de aceptación: 22/11/2019

Introducción

El análisis del ruido sísmico registrado por sismómetros de tres componentes permite estudiar las propiedades mecánicas del subsuelo según los diferentes modos de vibración del mismo. De tal manera que una vez establecida la frecuencia fundamental del suelo (f_0) y la velocidad de las ondas de cizalla (V_s) en una cobertera sedimentaria, se puede investigar el espesor de dicha cobertera y consiguientemente la profundidad del basamento (Atakan *et al.*, 2004).

El objetivo de este trabajo es dar a conocer los resultados de la aplicación de diferentes técnicas geofísicas, basadas en sismicidad pasiva y activa, que han permitido identificar la geometría del basamento de la Cuenca del Guadalquivir (CG) en una transversal a los estuarios de los ríos Odiel y Tinto, en la provincia de Huelva (Fig. 1). A partir de los resultados obteni-

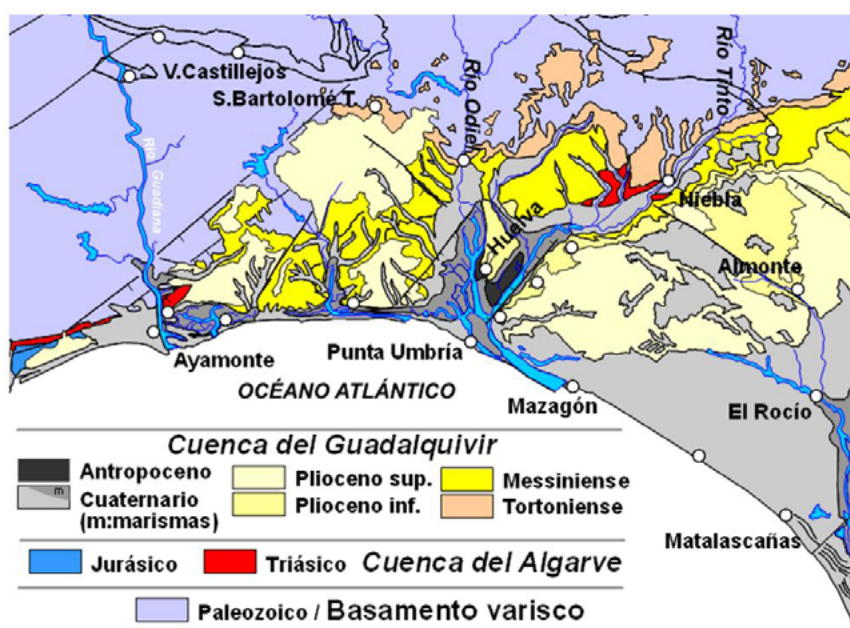


Fig. 1.- Mapa geológico de la Cuenca del Guadalquivir en la provincia de Huelva. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Geological map of the Guadalquivir basin in the province of Huelva. See color figure in the web.

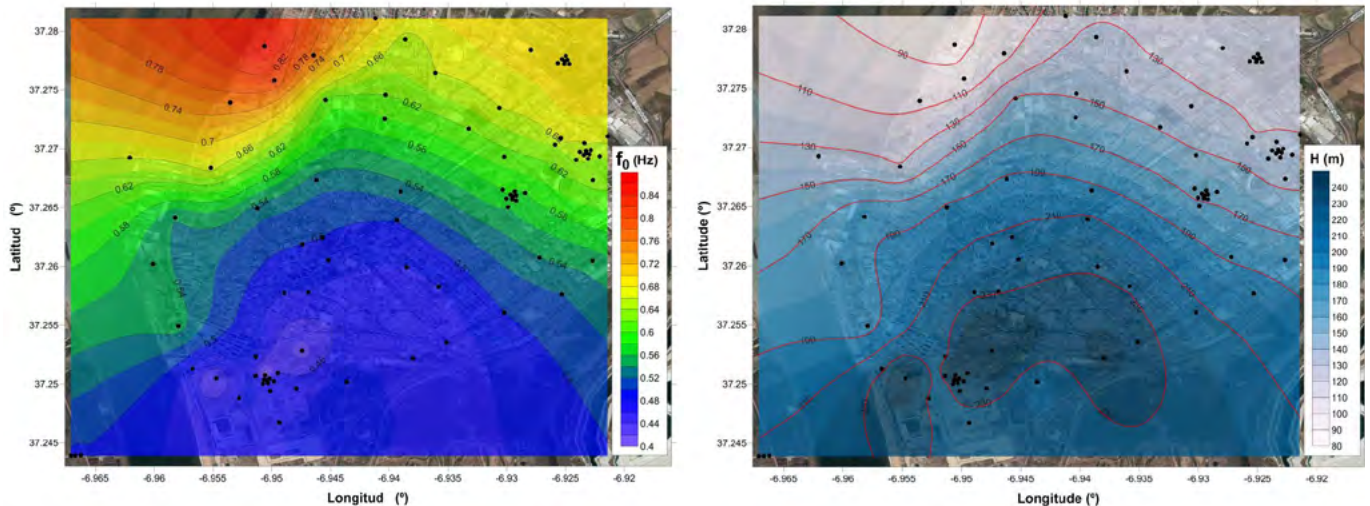


Fig. 2.- Frecuencia fundamental del suelo (izquierda) y estimación de la profundidad de basamento rocoso (derecha) en la ciudad de Huelva a partir de métodos de actividad sísmica pasiva y activa. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Fundamental soil frequency (left) and estimation of the depth of rocky basement (right) in the city of Huelva from passive and active seismic activity methods. See color figure in the web.

dos y de datos previos, el trabajo plantea la interpretación de la estructura del "forebulge" asociado a una cuenca de antepaís y su evolución durante el Neógeno.

La parte baja de la Cuenca del Guadalquivir (CG): estratigrafía y tectónica

La existencia de fallas oblicuas al borde longitudinal en la parte baja de la cuenca neógena del Guadalquivir, tal y como proponía Viguiet (1977), podría explicar las significativas diferencias en los medios sedimentarios que se observan en el borde septentrional de dicha cuenca (Fig. 1). Sedimentos neógenos marinos y continentales cubrieron indistintamente un basamento paleozoico y mesozoico expuesto ampliamente desde el final del Cretácico (Vázquez *et al.*, 2015). En concreto, en la zona de Ayamonte y en Niebla (Huelva) rocas del Triásico Superior forman parte del basamento de la CG (Fig. 1). Los sedimentos del Complejo Basal Transgresivo (CBT), también denominado Formación Niebla, representan el registro sedimentario más antiguo expuesto en superficie e identificado también en sondeos profundos (Alonso-Chaves *et al.*, 2019). El muro del complejo basal es neto y muy irregular. Se trata de una paleosuperficie topográfica tortoniense (¿o algo más antigua?). En relación con dicha superficie se han identificado desniveles topográficos del orden de 55 m (Baceta y Pendón, 1999). El espesor del complejo basal es muy irregular, llegando a alcanzar en los antiguos valles potencias

próximas a los 35-50 m. Desde el punto de vista litológico, el CBT está formado de muro a techo por: conglomerados y areniscas fluviales, barras conglomeráticas relacionadas con *fan delta*, arenas y limos litorales, calcarenitas arenosas con conglomerados de playa, y sobre ellas, diversos tipos de calizas y calcarenitas bioclásticas. El techo del citado complejo basal es una discontinuidad con evidencias de exposición subaérea (cf. Baceta y Pendón, 1999). Tal superficie está fosilizada por un nivel de limos y arcillas con abundante glauconita. Dicho nivel marca el inicio de una potente unidad sedimentaria conocida como margas azules (equivalente a la Formación Arcillas de Gibraleón) y tiene espesores kilométricos en el centro de la cuenca (superior a 2000 metros de potencia). El límite superior de la citada formación está cubierto por un nuevo nivel de arenas y limos con glauconita. La edad del CBT y las margas azules es Tortoniense superior - Plioceno inferior (véanse Civis *et al.*, 1987; 2004; González-Regalado *et al.*, 2005, entre otros). Por encima de las margas azules la sedimentación en la cuenca del Guadalquivir es esencialmente detrítica, con una clara tendencia progradante y está formada por 30-40 metros de sedimentos marinos someros. La parte inferior de este tramo se corresponde con la Formación Arenas de Huelva y sobre ella se sitúa la Formación Arenas de Bonares, de carácter litoral. Esta última formación se corresponde con la parte alta del Plioceno inferior (¿Plioceno superior?), según Mayoral y Pendón (1986). La sedimentación al final del Plioceno y durante el Cuaternario es de carácter

continental: depósitos aluviales (dominan la formación de terrazas), desarrollo de cordones de dunas y sistemas estuarinos concentrados en los tramos más bajos de los ríos actuales (cf. Salvany *et al.*, 2011, Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2015).

Por otra parte, Salazar *et al.* (2016), después de una revisión cartográfica al oeste de Huelva, concluyen que desde el Tortoniense al Plioceno la sedimentación en la parte más occidental de la cuenca tiene lugar en condiciones mucho más someras que en la parte oriental (al este del río Odiel). Rodríguez-Tóvar *et al.* (2017) en la zona de Lepe han identificado el límite Tortoniense - Messiniense inferior, y sobre él hay una serie siliciclástica con una tasa de sedimentación lenta, en unas condiciones aerobias y alta disponibilidad de nutrientes.

Los principales rasgos del estilo tectónico de la CG desde el meridiano de Carmona hasta Ayamonte fueron descritos por Viguiet (1974, 1977). En dichos trabajos se propone una evolución estructural secuenciada en cuatro etapas, desde el límite Tortoniense - Messiniense hasta la actualidad. La fase inicial coincide con una fuerte subsidencia tectónica. Una segunda fase en el límite Mio-Plioceno, especialmente reflejada en el borde septentrional de la cuenca, seguida de una tercera etapa coincidiendo con el límite Plio-Cuaternario, destacando en ella la formación de fallas "meridianas" (norteadas) como las situadas en el río Odiel. La cuarta y última etapa la relaciona con la reactivación de ciertas fallas durante el final del Villafranquense.

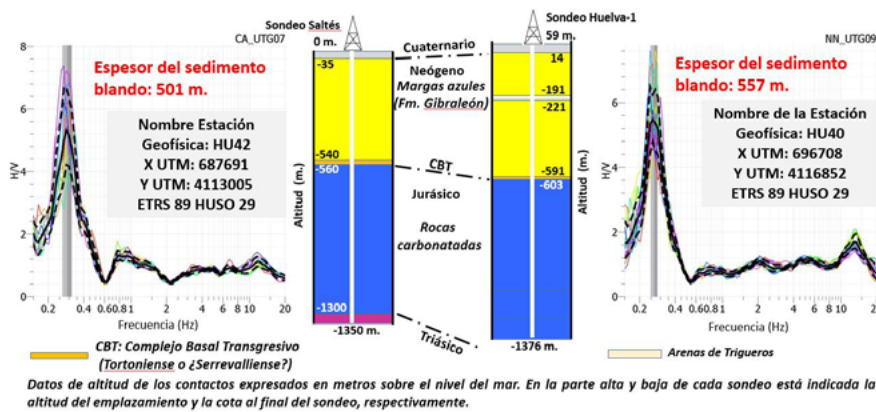


Fig. 3.- Gráficas H/V vs. Frecuencia (Hz) en las estaciones emplazadas en la vertical de los sondeos Saltés y Huelva-1. En cada sondeo se expresa la edad de las rocas y se identifican las formaciones sedimentarias en la Cuenca del Guadalquivir. Ver figura en color en la web.
 Fig. 3.- Graphs H/V vs. Frequency (Hz) in the stations located in the vertical of the Saltés and Huelva-1 boreholes. In each borehole the age of the rocks is expressed and the sedimentary formations in the Guadalquivir basin are identified. See color figure in the web.

Sismicidad pasiva y activa: metodología

El movimiento del suelo producido por fuentes no sismogénicas ha sido registrado en el marco del proyecto ALERTES-RIM, en relación con la evaluación de la peligrosidad sísmica del suroeste de la península ibérica (Macau *et al.*, 2017). La técnica de sismicidad pasiva empleada en la prospección del basamento de la CG estuvo basada en la determinación de las relaciones espectrales H/V (o HVSR: *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) en un solo punto, así como en cuatro *array* (los sensores fueron distribuidos con una geometría triangular). Para ello, se han desplegado 116 estaciones en el área urbana de la ciudad de Huelva (Fig. 2), así como a uno y otro lado de los estuarios de los ríos Odiel y Tinto, completando una transversal de 24 km. Cada estación constaba de un sensor (Lennartz LE-3D 5 s) y un digitalizador (SARA SL06), la capacidad de muestreo: 200 Hz y el tiempo de registro: 30-40 minutos. Dos de esas estaciones estuvieron situadas en la vertical de sendos sondeos profundos (Huelva-1 y Saltés) que atravesaron la cobertera neógena de la CG (Figs. 3 y 4). Dichos sondeos terminaron a cotas de -1376 y -1350 m, por debajo del nivel del mar, después de atravesar completamente la cobertera neógena de la CG y parte de su basamento mesozoico. Los datos de estas estaciones han servido para cotejar la calidad del registro geofísico dado que es posible relacionar la profundidad del "basamento rocoso" con las calizas del techo del Complejo Transgresivo Basal. Por otra parte, la técnica de tipo *array* fue desplegada en 4 zonas de

la ciudad de Huelva (Fig. 2). En el *array* más meridional se alcanzó el radio máximo (400 m): 25 - 55 - 100 - 250 - 400 m, lo que supuso el despliegue simultáneo de: 7 sismómetros (Lennartz 3D-5s), 7 digitalizadores (Sara SL06), muestreo: 200 Hz y longitud de registro: 20 - 90 minutos.

La adquisición de datos geofísicos se ha completado con la realización de perfiles de velocidad de ondas de cizalla (V_s) a partir de ruido sísmico y técnicas de análisis de multicanal de ondas superficiales (MASW).

Resultados

En la mayoría de las estaciones la gráfica H/V vs. Frecuencia presenta un pico muy definido, lo que ha facilitado la determinación de la frecuencia fundamental del suelo (f_0 , Fig. 3). Conocida la profundidad del basamento rocoso (a partir de los datos de los sondeos) y la frecuencia fundamental del suelo (Método de los cocientes espectrales H/V) se ha determinado una ecuación del tipo $H=a*f_0^b$, que en el caso de la ciudad de Huelva tiene la siguiente relación empírica:

$$H=66,9*f_0^{-1,67}$$

donde, H: profundidad del basamento rocoso y f_0 : frecuencia fundamental del suelo.

En el extremo occidental del perfil (al oeste del Odiel) se localizan los valores de frecuencia fundamental del suelo más altos (varían entre 0,83 y 1,06 Hz), tales datos se correlacionan con profundidades del basamento mecánico a 106 y 74 metros de profundidad. En el extremo oriental del perfil (Fig. 4), coincidiendo con el Sondeo Huelva-1 (al norte de Mazagón), la frecuencia

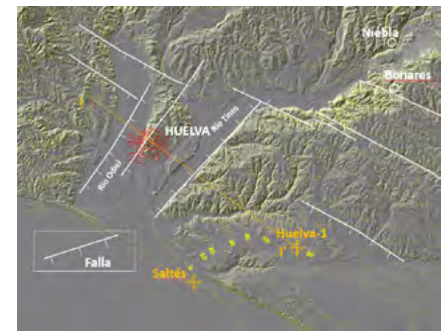


Fig. 4.- Fallas conjugadas en los estuarios de los ríos Tinto y Odiel.
 Fig. 4.- Conjugated faults in the estuaries of Tinto and Odiel rivers.

fundamental del suelo es 0,27 Hz y se ha deducido una profundidad del basamento "rocoso" (mecánico) de 557 m. Este puede entenderse como equivalente a la potencia de sedimentos "blandos", es decir, la potencia del relleno neógeno excepto el Complejo Basal Transgresivo. En la vertical del Sondeo Saltés la frecuencia fundamental del suelo es 0,29 Hz y la profundidad deducida del basamento mecánico es de 501 m (espesor de sedimentos "blandos"), tal y como muestra la figura 3. En ambos sondeos, la profundidad del relleno neógeno hasta el muro de la Formación Arcillas de Gibraleón (posible basamento "rocoso" desde el punto de vista mecánico, no geológico) es de 650 y 540 m, respectivamente (Fig. 3). En la ciudad de Huelva las líneas de isovalores de la frecuencia fundamental del suelo se orientan según las direcciones NO-SE mostrando tendencias decrecientes de norte a sur, desde 0,86 Hz a 0,38 Hz (Fig. 2), habiéndose deducido variaciones de profundidad del sustrato "rocoso" (mecánico) algo inferiores a 100 en el NO de la ciudad y superiores a 250 m en la zona suroriental (en los alrededores del estadio "Nuevo Colombrinos"). Las isóneas con una tendencia NNO-ESE muestran un cambio brusco en la orientación de las mismas coincidiendo con la vertical del margen oriental del río Odiel, resultando una lineación NNE-SSO (Fig. 2). De manera tentativa tales observaciones pueden interpretarse en relación con la existencia de fallas con dirección NNE-SSO (Fig. 4).

Discusión y conclusiones

Los datos referidos a la profundidad del basamento "rocoso" (o mecánico) en la vertical de los sondeos Huelva-1 y Saltés representan errores en la precisión de la determinación del orden del 14,3 y 7,2%. Los resultados de las campañas geofísicas ba-

sadas en sismicidad pasiva y activa invitan a pensar que el muro de la Formación Arcillas de Gibraleón en la zona de Huelva está a profundidades comprendidas entre 90 y 230 metros (con un error aproximado del 10%). Fallas de dimensiones kilométricas con una orientación N035°E y buzamientos hacia el SE (coincidiendo con el margen oriental del río Odiel) podrían explicar las diferentes profundidades del techo del Complejo Transgresivo Basal. Dichas fallas posiblemente atraviesan la cobertera y parte del basamento de la CG, tal y como ha sido descrito por Alonso-Chaves *et al.* (2016) en el mismo entorno de la ciudad de Huelva. Tales fracturas serían equivalentes a las denominadas por Viguiet (1977) como fallas "meridianas". Se trataría de fallas con saltos verticales que pudieron ser superiores al centenar de metros.

De manera tentativa se sugiere que la paleotopografía (subaérea y sumergida) al final del Tortonense, hace 7,5 - 8 Ma, debió de estar dominada en algunos sectores de la CG por orientaciones ONO - ESE. Tales superficies se alternarían con otras de dirección NNE-SSO, estas últimas con una mayor pendiente.

La fuerte subsidencia asociada al sistema extensional de fallas NNE-SSO evolucionó durante el Messiniense, y condicionó la compartimentación de la cuenca. El resultado fue la existencia de un umbral desde el río Odiel hasta la zona de Ayamonte; así como un surco fuertemente subsidente al este de la ciudad de Huelva, que dio lugar a la acumulación de varios miles de metros de sedimentos durante el Messiniense - Plioceno inferior, de acuerdo con Salazar *et al.* (2016). Hace 5 Ma, aproximadamente, durante el Plioceno, se produce una significativa homogenización y somerización de la CG, si bien, persisten algunas diferencias en los medios sedimentarios que invitan a pensar que los depocentros del Plioceno y Cuaternario son rasgos heredados de la paleogeografía miocena.

El resultado final es la flexión de la corteza terrestre hacia el SE, simultánea con la fracturación extensional aquí descrita (Fig. 5). Esta deformación estaría relacionada con el avance del frente alpino bético. La deformación extensional que se describe en este trabajo estaría asociada a la reactivación de zonas de falla a escala cortical. Dichas fallas serían simultáneas con la flexión de la litosfera, tal y como han propuesto García-Castellanos *et al.* (2002).

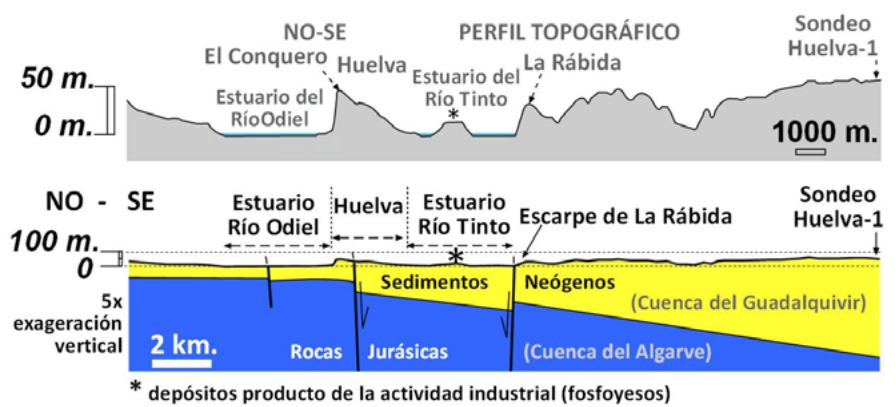


Fig. 5.- Perfil topográfico y corte geológico transversal a los estuarios del Tinto y del Odiel. Ver localización del corte en la figura 4.

Fig. 5.- Topographic profile and geological cross section transversal to the Tinto and Odiel estuaries. See location of the cross section in figure 4.

La evolución geodinámica regional desde el Plioceno inferior podría relacionarse con un levantamiento de tipo "forebulge" donde participan procesos de flexión y fracturación de manera simultánea. La fracturación se concentra preferentemente en zonas de falla heredadas de la arquitectura cortical previa.

Agradecimientos

Es una contribución a los proyectos de investigación: CGL2013-46368-P y PGC2018-100914-B-I00. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizadas por los Dres. J. M. Azañón y J. C. Balanzá como revisores del manuscrito original.

Referencias

Alonso-Chaves, F.M., García Navarro, E. Fernández Rodríguez, C. y Camacho Cerro, M.A. (2016). *Geo-Guías* 10, 104.
 Alonso-Chaves, F.M., Macau, A., Figueras, S., Benjumea, B., Gabàs, A., Roca, A., Puig, R. y Sedano, J. (2019). En: *Workshop "Earthquakes and Tsunamis in Iberia (50th Years of the 1969 Saint Vincent Earthquake, M=8.0)"*, Madrid.
 Atakan, K., Duval, A.M., Theodulidis, N., Guillier, B., Chatelain, J.L., Bard, P.Y. y SESAME-Team (2004). En: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada.
 Baceta, J.I. y Pendón, J.G. (1999). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 12 (3-4), 419-438.
 Civis, J., Sierro, F.J. González-Delgado, J.A., Flores, J.A., Andrés, I., Porta, J. y Valle, M.F. (1987). En: *Paleontología del Neógeno de Huelva* (J. Civis, Ed.), Ediciones Universidad de Salamanca, 9-21.
 Civis, J., Dabrio, C.J., González-Delgado,

J.A., Goy, J.L., Ledesma, S. Pais, J., Sierro, F.J. y Zazo, C. (2004). En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, 543-550.
 García-Castellanos, D., Fernández, M. y Torné, M. (2002). *Tectonics* 21/3, doi:10.1029/2001TC001339.
 González-Regalado, M.L., Ruiz, F., Abad, M., Pendón, J.G. y Tosquella, J. (2005). *Geogaceta* 38, 127-130.
 Macau, A., Benjumea, B., Figueras, S., Gabàs, A., Roca, A. y Alonso-Chaves, F.M. (2017). En: *Conference & Exhibition Near Surface Geoscience, Malmö, Sweden*.
 Mayoral, E. y Pendón, J.G. (1986). *Acta Geológica Hispánica* 21-22, 507-513.
 Rodríguez-Ramírez, A., Pérez-Asensio, J.N., Santos, A., Jiménez Moreno, G., Villarías-Tobles, J.J.R., Mayoral, E., Celestino-Pérez, S., Cerrillo-Cuenca, E., López-Sáez, J.A., León, A. y Contreras, C. (2015). *Quaternary Research* 83, 24-40.
 Rodríguez-Tovar, F.J., Dorador, J., Mayoral, E. y Santos, A. (2017). *Sedimentary Geology* 349, 62-78.
 Salazar, A., Larrasoña, J.C., Abad, M., Mayoral, E., Pérez-Asensio, J.M., González-Regalado, M.L., Martín-Banda, R., Civis, J. y Mata, M.P. (2016). *Geo-Temas* 16(1).
 Salvany, J.M., Larrasoña, J.C., Mediavilla, C. y Rebollo, A. (2011). *Sedimentary Geology* 241, 22-39.
 Vázquez, M., Jabaloy-Sánchez, A., Azor, A., Stuart, F., Persano, C. Alonso-Chaves, F.M., Martín-Parra, M., Matas, J. y García-Navarro, E. (2015). *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2015.06.034.
 Viguiet, C. (1974). *Le néogène de l'Andalousie Nord-occidentale (Espagne). Histoire géologique du «Bassin» du Bas-Guadalquivir*. Tesis Doctoral, Univ. de Bordeaux, 450 p.
 Viguiet, C. (1977). *Boletín Geológico y Minero* 58-1, 39-44.