



## ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS POBLACIONES COSTERAS DE LA PROVINCIA DE HUELVA (SUROESTE DE ESPAÑA) ANTE TSUNAMIS

*Vulnerability assessment to tsunami of coastal urbanized and heritages areas of Huelva Province (Southwestern Spain)*

Tatiana Izquierdo<sup>1</sup>, Manuel Abad<sup>1</sup>, Joaquín Rodríguez-Vidal<sup>2</sup>, Francisco Ruiz<sup>2</sup> y María Luz González-Regalado<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Atacama, Avenida Copayapu, 485, Copiapó (Chile)  
tatiana.izquierdo@uda.cl

<sup>2</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Avenida 3 de Marzo s/n, 21071-Huelva (España)  
jrvidal@dgeo.uhu.e

**Abstract:** Even though the coast of Huelva is considered as a low seismic and tsunamigenic hazardous area, it has suffered numerous marine high-energy events during the last thousands of years. In this work, we have classified the urban areas and the heritage elements of the coast of Huelva that will result damaged in a scenario similar to that of the tsunami that occurred after the Lisbon earthquake in 1755, with a maximum run-up of 10 m a.s.l. We have also established a vulnerability index using the PTVA-3 model for the buildings of Ayamonte, Isla Cristina, Lepe, Cartaya, Punta Umbría and Huelva, and described the damages that would occur. The existence of natural barriers, such as woods or saltmarshes, may in some cases reduce the destructive effects of the tsunami, even if all the communities, except Huelva, present > 50% of buildings with very high and high vulnerabilities in case of an event with these characteristics.

**Keywords:** coast, tsunami, vulnerability, Huelva, Gulf of Cádiz.

**Resumen:** A pesar de ser considerada una zona de baja peligrosidad sísmica y tsunamigénica, la costa de Huelva ha experimentado multitud de eventos marinos de alta energía en los últimos miles de años. En este trabajo se ha procedido a catalogar las zonas urbanas y elementos patrimoniales del litoral onubense que resultarían dañados, en mayor o menor medida, en caso de repetirse un escenario asimilable al tsunami asociado al terremoto de Lisboa de 1755, con una altura de inundación en la línea de máxima penetración marina de 10 m s.n.m. Se realiza una cartografía de vulnerabilidad de edificaciones siguiendo el modelo PTVA-3 para las localidades de Ayamonte, Isla Cristina, Lepe, Cartaya, Punta Umbría y Huelva, y se describen los daños que previsiblemente tendrían lugar en las infraestructuras expuestas a la inundación marina. La aparición de barreras naturales, como bosques o marismas, pueden en algunos casos atenuar los efectos destructivos del tsunami, si bien todas las poblaciones, excepto Huelva, poseen un porcentaje superior al 50% de edificaciones con índices de Vulnerabilidad muy alto o alto en caso de producirse un evento de estas características.

**Palabras clave:** costa, tsunami, vulnerabilidad, Huelva, Golfo de Cádiz.

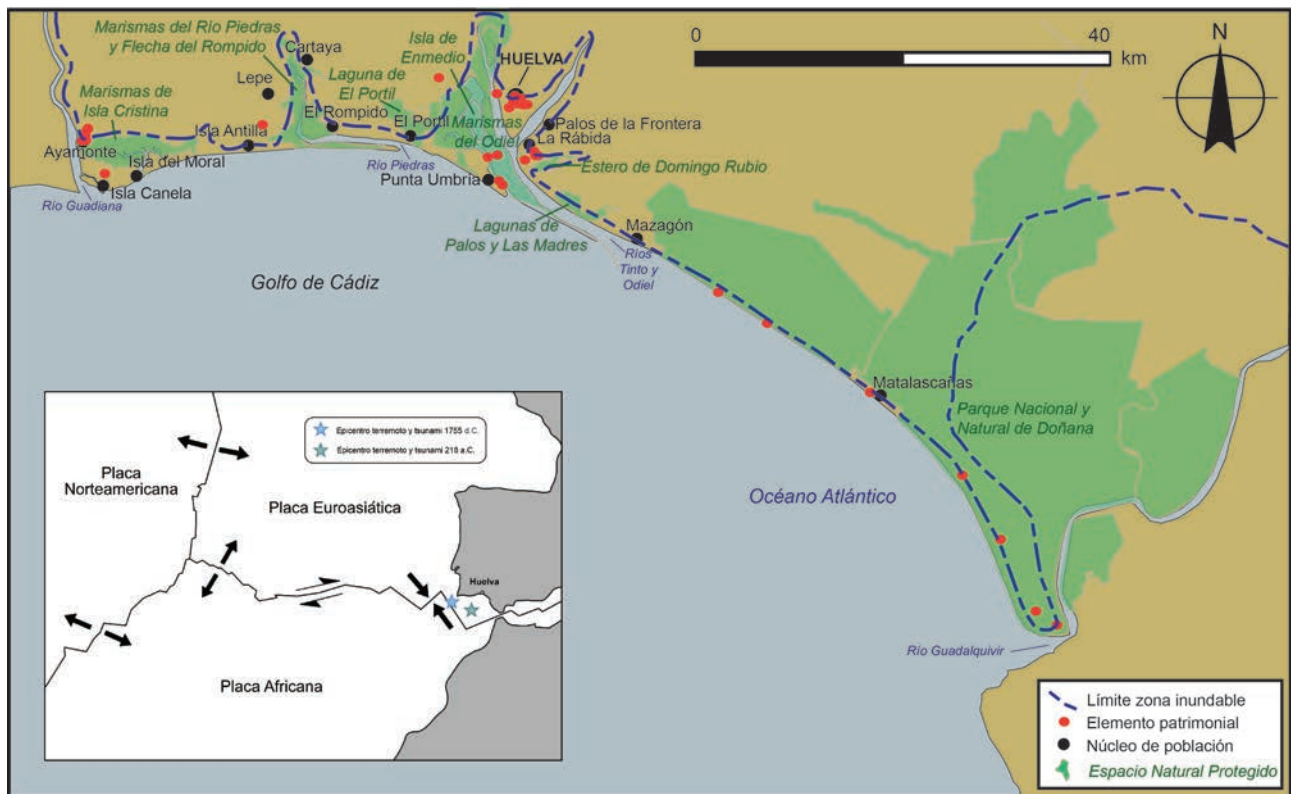
Izquierdo, T., Abad, M., Rodríguez-Vidal, J., Ruiz, F., González-Regalado, M.L., 2019. Análisis de la vulnerabilidad de las poblaciones costeras de la provincia de Huelva (suroeste de España) ante tsunamis. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (1): 25-42.

## Introducción

El Golfo de Cádiz es considerado una zona de baja peligrosidad sísmica (Gutscher *et al.*, 2005) y tsunamigénica (Campos, 1992); sin embargo, el registro geológico e histórico en el suroeste de la Península Ibérica pone de manifiesto la existencia de numerosos tsunamis que han provocado la destrucción total o parcial de sus costas en los últimos 9000 años (Baptista y Miranda, 2009; Lario *et al.*, 2010, 2011; Ruiz *et al.*, 2013, López-Sáez *et al.*, 2018; Manzano *et al.*, 2018). El origen, las consecuencias y los periodos de recurrencia de este tipo de procesos han sido analizados por varios autores en la última década, poniendo de manifiesto la generación de un gran tsunami cada 700-2000 años (Lario *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2013). Los efectos de estos eventos sobre las costas de las provincias de Huelva y Cádiz implicaron pérdidas económicas y de vidas humanas, y la transformación de los ecosistemas y del paisaje litoral. Todo ello, ha quedado registrado en la sucesión geológica cuaternaria, en yacimientos arqueológicos y en diversos relatos históricos (Galbis, 1932; Campos, 1992, Lario *et al.*, 2011; Rodríguez-Vidal *et al.*, 2015; López-Sáez *et al.*, 2018; entre otros). Es evidente que los daños sobre los asentamientos costeros mejor conocidos y más importantes son los ocurridos tras el último gran tsunami registrado en la región, que tuvo lugar asociado al terremoto del 1 de noviembre de 1755 (o terremoto de Lisboa), cuando en el litoral del suroeste peninsular ya existían diversas ciudades y pueblos pesqueros. Por lo anterior, el te-

remoto y tsunami de 1755 han recibido una mayor atención, en relación a eventos de menor magnitud ocurridos en la misma zona (Galbis, 1932; Campos, 1992; Maramai *et al.*, 2014; Silva y Rodríguez-Pascua, 2014), y su origen, efectos sobre la poblaciones costeras y registro geológico han focalizado la mayor parte de los estudios científicos hasta la fecha.

Desde una perspectiva geológica, los efectos de este evento tsunamigénico han sido analizados en Huelva y Cádiz tanto en sistemas estuarinos y marismas (Dabrio *et al.*, 1998; Luque *et al.*, 2004; Morales *et al.*, 2008), como en playas rocosas expuestas a la acción de los trenes de olas donde se acumularon extensos campos de bloques (Scheffers y Kelletat, 2003; Whelan y Kelletat, 2003, 2005; Gracia *et al.*, 2006). Diversas fuentes históricas relatan un gran número de víctimas asociadas al tsunami de 1755 en la provincia de Huelva (Galbis, 1932; Campos, 1992, Martínez-Solares, 2001; entre otros), así como una importante erosión y retroceso de sus playas (Ruiz *et al.*, 2013). En el entorno de Ayamonte y de Isla Canela (Fig. 1) los daños en los poblados pesqueros fueron enormes, quedando completamente arrasado el lugar donde se ubicaban “como sin nunca hubiesen existido”. El número de víctimas y desaparecidos es variable, pero se estima entre las 400 y 1000 personas. La cantidad de damnificados fue superior a 5000. En los pueblos de Lepe y La Redondela las crónicas revelan consecuencias similares, si bien los daños ocasionados se concentraron en algunos pequeños poblados que actualmente se ubicarían



**Fig. 1.-** Principales localidades, elementos de interés patrimonial y espacios naturales protegidos del litoral onubense, con delimitación de la altura máxima de inundación de 10 m. Abajo, marco geodinámico del Golfo de Cádiz, con trazado aproximado de la Falla de Azores-Gibraltar y localización propuesta de los epicentros de los terremotos generadores de los tsunamis del 218 a.C. y 1755 d.C., según Maramai *et al.* (2014).

en la localidad de Isla Antilla (Fig. 1). La pérdida de vidas entre ambos pueblos fue evaluada en más de 450 ahogados. La ciudad de Huelva fue inundada solo en sus zonas más bajas, produciéndose 66 víctimas en las playas habitadas por pescadores en la desembocadura del estuario (hoy Punta Umbría) (Fig. 1).

A pesar de lo anterior, la aplicación del conocimiento derivado de estos estudios asociados a tsunamis en el Golfo de Cádiz ha tenido poca repercusión en temáticas útiles para la sociedad, como el estudio y mitigación del riesgo geológico (Abad *et al.*, 2010; Birkmann *et al.*, 2010; Jelinek *et al.*, 2012; Feria *et al.*, 2013), la modelización de altura de ola y extensión de zonas inundadas, velocidad de corrientes y *run-up* (Lima *et al.*, 2010; Rodríguez-Vidal *et al.*, 2011; Macías-Sánchez, 2016), o el establecimiento de sus periodos de recurrencia (Lario *et al.*, 2010, 2011; Ruiz *et al.*, 2013). Sin embargo, en los últimos años se remarca la necesidad de trasladar este conocimiento a las comunidades que habitan las costas consideradas más expuestas a este proceso en España, como lo demuestra la realización de las Jornadas Técnicas organizadas por Protección Civil “Riesgo y peligrosidad de Tsunamis en España. Proyectos sobre su predicción y sistemas de alerta” en septiembre de 2010, la proposición no de ley realizada en el Congreso de los Diputados de febrero de 2013 para la integración operativa de España en el Grupo Intergubernamental de Coordinación del Sistema de Alerta Temprana y Mitigación de Tsunamis en el Atlántico Nororiental y el Mediterráneo y Mares Adyacentes, o la petición en diciembre de 2013 del Ayuntamiento de Huelva a la Junta de Andalucía para crear un sistema de alerta temprana ante tsunamis.

El objetivo de este trabajo es establecer un escenario post-evento, lo más aproximado a la realidad, donde se detallan las consecuencias de un proceso tsunamigénico asimilable al de 1755 en las costas de la provincia de Huelva. Para ello, se ha elaborado una cartografía de vulnerabilidad y riesgo de edificios ante un hipotético tsunami, con un *run-up* de 10 m, en varios núcleos urbanos localizados a lo largo del borde costero onubense, emulando el peor escenario posible. En paralelo, se evalúan los posibles edificios y áreas de interés patrimonial que se encuentran amenazados, en menor o mayor grado, por la acción de este posible tsunami.

### Localización

Las características geológicas y geográficas de la costa de Huelva favorecen el desarrollo de un litoral de relieve muy suavizado y de escasa altitud, con formación de acantilados en las zonas de promontorios donde afloran materiales pleistocenos y neógenos (Villalobos y Pérez-Muñoz, 2008). La altura media de este litoral, y de sus zonas adyacentes hacia el continente, varía entre los 3 y 6 m s.n.m y refleja la formación de un relieve muy plano, suavemente inclinado hacia mar. El litoral de la costa de Huelva presenta una orientación principal oeste-este y se extiende desde la desembocadura del Río Guadiana hasta la del Río Guadalquivir. Sus principales

núcleos urbanos son Ayamonte, Isla Cristina, Lepe, Cartaya, Punta Umbría, Mazagón y Matalacañas (Fig. 1). La ciudad de Huelva, capital de la provincia, se localiza en el interior del estuario de los ríos Tinto y Odiel y, aunque alejada varios kilómetros de la costa, también se ha considerado en este trabajo al existir evidencias geológicas y crónicas históricas que demuestran que se ha visto y que, potencialmente, puede verse afectada por tsunamis (Campos, 1992; Lima *et al.*, 2010; Morales *et al.*, 2008). Algo más de la mitad de la población de la provincia (518.930 habitantes) se concentra en la línea de costa y la capital (aprox. 250.000 habitantes) (INE, 2017), si bien este factor posee un importante carácter estacional y aumenta de forma muy considerable durante el verano, debido a la gran ocupación turística que experimenta esencialmente siguiendo un modelo de “sol y playa” (Jurado, 2014). Como consecuencia de lo anterior, y en paralelo al desarrollo económico de toda la provincia, desde mediados de la década de los años 60, la conocida como Costa de la Luz ha experimentado un fuerte crecimiento urbanístico que ha conducido a la ampliación de sus núcleos urbanos costeros y a la creación de otros nuevos. Por otro lado, este crecimiento urbanístico ha sido menor, comparativamente, al existente en otras zonas del litoral del sur peninsular y diversos espacios naturales de elevado valor ecológico aún persisten y ocupan una gran extensión a lo largo de toda la costa onubense. De entre estos espacios destacan el Parque Nacional y Natural de Doñana y los Parajes Naturales Marismas de Isla Cristina, Marismas del Odiel, Marismas del Río Piedras y Flecha de El Rompido, Estero Domingo Rubio, Lagunas de Palos y Las Madres, Laguna de El Portil y la Reserva Natural Isla de Enmedio (Fig. 1). Se caracterizan por el desarrollo de cuerpos de marismas, playas y cordones dunares móviles, donde pueden llegar a formarse bosques y densas coberturas vegetales, constituidas principalmente por pinares, gramíneas y matorral (Ojeda, 1987, 1993; Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2014). Las cotas topográficas alcanzadas por los cordones dunares varían a lo largo de la costa. Mientras que en Doñana y en la Flecha de Punta Umbría alcanzan alturas cercanas a los 30 y 10 m s.n.m., respectivamente, en el resto de las zonas su altura no suele superar los 5 m s.n.m. Siempre constituyen formas de amplia extensión lateral que recorren la costa a lo largo de decenas de kilómetros.

En lo referente a la dinámica costera, el régimen marreal del litoral onubense se clasifica como mesomareal semidiurno, con un rango mareal medio de 2,10 m, variando entre 0,70 m en las mareas muertas extremas y 3,85 m en las mareas vivas equinocciales (Borrego, 2000). El oleaje dominante procede del suroeste y posee una altura de ola significativa inferior a 50 cm (Borrego, 1992). Este oleaje actúa redistribuyendo los sedimentos aportados por los ríos y la erosión de acantilados a lo largo de toda línea de costa hacia el este, alimentando los sistemas litorales del Golfo de Cádiz. Considerando lo anterior, la costa de Huelva puede clasificarse como una costa dominada por mareas y de energía mixta, aunque

presenta formas características del dominio de la acción del oleaje en las desembocaduras fluviales. En los entranes costeros, correspondientes a las desembocaduras de los ríos Guadiana, Piedras, Tinto-Odiel y Guadalquivir se forman extensos cuerpos de marisma, llanuras mareales y lagunas costeras (Fig. 1). Su aparición se encuentra directamente relacionada con la transgresión marina holocena (Flandriense) y la elevación correspondiente del nivel del mar, causante de que los valles fluviales quedaran inundados y fueran colmatándose de sedimentos progresivamente, hasta llegar a la situación actual (Zazo *et al.*, 1994; Goy *et al.*, 1996). Este relleno fue favorecido por el cierre sedimentario de los estuarios, propiciado por el desarrollo de cuerpos arenosos, como islas barrera y flechas litorales (Rodríguez-Vidal *et al.*, 1993). Estas grandes playas, cordones dunares y barras submareales que se extienden a lo largo de todo su litoral, constituyen la primera barrera natural que protege la costa de la acción de los temporales y de posibles tsunamis. De igual manera, los bosques de pinares, en conjunto con las formaciones dunares sobre las que se desarrollan y que estabilizan estas masas arbóreas (Mae-kawa *et al.*, 2013), representan un mecanismo de atenuación muy efectivo de la velocidad de la corriente y de la altura de inundación de posibles tsunamis (Harada y Inamura, 2005; Forbes y Broadhead, 2007).

### Marco geodinámico

Desde un punto de vista geodinámico, el Golfo de Cádiz se localiza en un contexto tectónico complejo, definido por el límite de placas Euroasiática y Africana. El segmento occidental de este límite se extiende hacia el oeste desde el Estrecho de Gibraltar y hasta el Archipiélago de Azores, adquiriendo el nombre de Falla de Azores-Gibraltar (Fig. 1). La velocidad de convergencia a lo largo de este sistema de fallas es lenta en las proximidades del Golfo de Cádiz, donde posee un régimen transpresivo dominante (Tortella *et al.*, 1997) y es considerada responsable de los terremotos de mayor magnitud que han afectado esta región desde tiempos históricos y, por tanto, de los tsunamis de los que existe conocimiento en el Golfo de Cádiz (*e.g.*, Omira *et al.*, 2011). La sismicidad en su segmento más oriental se produce en una zona difusa e indica una compresión principal en dirección noroeste-sureste (McClusky *et al.*, 2003). Esta compresión se traduce en terremotos con mecanismos focales heterogéneos y generados tanto en fallas de cinemática lateral como en fallas inversas de componente vertical significativo y, por tanto, potencialmente productoras de procesos tsunamigénicos (Sartori *et al.*, 1994; Gutscher *et al.*, 2002; Buforn *et al.*, 2004).

La sismicidad en esta zona, próxima al margen ibérico suroccidental, está caracterizada por terremotos de profundidades someras a profundas y magnitudes de bajas a moderadas, generalmente de  $M_w < 5,5$  (Stich *et al.*, 2005). Sin embargo, a lo largo del siglo XX, varios terremotos submarinos desencadenados en diferentes puntos de este sistema de fallas han alcanzado  $M_w > 7$

y han provocado pequeños tsunamis, detectados en mareógrafos, con insignificantes consecuencias en las costas de España y Portugal (Campos, 1992; Baptista y Miranda, 2009). De esta forma, la ocurrencia en tiempos recientes de terremotos de magnitud elevada, y con epicentros cercanos al litoral ibérico atlántico, han puesto de manifiesto la amenaza real que suponen este tipo de fenómenos para el suroeste de Europa y norte de África, así como la necesidad de evaluar sus daños y consecuencias potenciales sobre el litoral. Esta situación se ha corroborado a partir de algunas modelizaciones en las que se elaboran propuestas de mapas de altura máxima de ola, altura de inundación, penetración horizontal y/o velocidad de corriente ante diversos escenarios sísmicos que tratan de emular el evento tsunamigénico de Lisboa de 1755 (Lima *et al.*, 2010; Omira *et al.*, 2010, 2011; Macías-Sánchez, 2016).

### Materiales y métodos

#### *Creación de la geodatabase*

La primera etapa de este trabajo consistió en la creación de una base de datos geográficamente referenciada (geodatabase) que permitió el análisis de la información utilizada mediante en el software ArcGIS 10.1 con una proyección UTM y elipsoide ETRS 1989 en la zona 30N. La información recopilada y utilizada para este estudio se incluye en la Tabla 1. Como información de base se recopilaron las ortofotografías aéreas en color, los mapas topográficos a escala 1:10.000, la cartografía urbana a escala 1:2000 y el modelo digital de elevación (MDE) a partir del que se generaron los sombreados. Además, se incorporó a la geodatabase diferente información temática correspondiente a la delimitación de espacios naturales protegidos, el catálogo general del patrimonio histórico andaluz y el catálogo de registros geológicos e históricos de tsunamis. La mayor parte de los productos fueron descargados de la web del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, dependiente de la Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. Finalmente, los resultados de este trabajo también fueron incluidos en la geodatabase.

#### *Estimación de la profundidad de inundación*

En la última década se han publicado mapas de inundación de las distintas poblaciones costeras de la provincia de Huelva en base a la modelización de propagación de tsunamis asociados a diversos escenarios sísmicos. Aunque las ciudades de Huelva y Ayamonte no parecen resultar especialmente afectadas por la inundación marina según los modelos numéricos (Lima *et al.*, 2010; Macías-Sánchez, 2016), estos trabajos sí estiman alturas máximas de ola de 6 a 8 m en el sector central y oriental del litoral onubense, algo más pequeños (inferiores a 4 m) entre las desembocaduras de los Río Guadiana y Río Piedras. La altura de inundación máxima en la costa varía según la zona considerada entre 3,5 m (hacia el oeste, entre la desembocadura del Río Guadiana y La Antilla) y los 6 m en los estuarios del Río Tinto y Odiel y del Guadalquivir, donde también se registran la mayor penetración horizontal hacia tierra. En cualquier caso, la

<b>“Mapa base”</b>	
Información vectorial	Topográfico Vectorial de Andalucía 1:10.000 (2007). Un total de 9 hojas para cubrir la zona de estudio. La información se separó en 5 <i>dataset</i> temáticos (división administrativa, topografía, transporte, hidrografía y urbano) cada uno de ellos conteniendo diferentes capas.
Información vectorial urbana	Cartografía urbana vectorial 1:2000. Para las ciudades de Ayamonte, Punta Umbria, Isla del Moral e isla Canela.
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Modelo Digital de Andalucía 10 metros/pixel (2008-2009). La zona de estudio queda cubierta con un total de 44 ficheros con los que realizó un mosaico en un solo fichero raster.
Sombreados del MDE Ortofotos	A partir del mosaico del MDE se generaron ocho sombreados cambiando el azimut cada 45° y con una altura de iluminación por defecto de 45° para cada uno de ellos. Ortofotografía en color 0,5 m/pixel (2010-2011). La zona de estudio queda cubierta en un total de 44 ficheros.
<b>Información temática</b>	
Espacios Naturales Protegidos	La información de los Espacios Naturales Protegidos de la zona de estudio se obtuvo del servidor de EUROPARC España (2014).
Inventario de elementos patrimoniales	El listado de elementos patrimoniales incluidos en la zona de estudio se obtuvo del Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz (2016) y se incluyó en la <i>geodatabase</i> , asignándole coordenadas.
Catálogo de registros geológicos e históricos de tsunamis	El catálogo de registros de tsunamis llevado a cabo en este trabajo se incluyó en la <i>geodatabase</i> como una capa de puntos en la que se incluyen los atributos para cada registro (coordenadas, descripción, intensidad, etc).
Zonas de inundación	La capa de inundación que delimita las bandas de peligrosidad se generó a partir del MDE.
Vulnerabilidad y riesgo de zonas urbanas	La capa vectorial de polígonos con los edificios/manzanas para cada núcleo urbano se completó con los atributos necesarios para el cálculo del <i>Relative Vulnerability Index</i>

**Tabla 1.-** Información geográfica integrada en la geodatabase.

elaboración de mapas de inundación y de velocidad de corrientes por tsunamis a través de la aplicación de modelos numéricos de propagación utilizados para el establecimiento de zonas de peligrosidad es problemática por diferentes aspectos. El principal es que este tipo de cartografías se realizan en base a un evento sísmico específico y generador de un tsunami concreto. La dificultad radica, en el caso de tsunamis sin registro instrumental, en establecer el foco sísmico que mayor probabilidad tiene de producir un gran tsunami, o que existan múltiples focos sísmicos potenciales que puedan desencadenarlos. Tal circunstancia sucede con el terremoto de Lisboa de 1755 y el tsunami que alcanzó el Golfo de Cádiz tras este evento (Lima *et al.*, 2010; Omira *et al.*, 2010, 2011; Renou *et al.*, 2011). Por este motivo, no es posible asegurar que un futuro sismo y tsunami que afecten a una determinada región sea el mismo que los considerados en uno o diversos modelos numéricos. Por otro lado, publicaciones recientes demuestran que los mapas de inundaciones y de *run-up* elaborados mediante modelos de propagación de onda en el Pacífico e Índico poseen un importante rango de error cuando se han contrastado con los datos reales obtenidos tras el impacto de un tsunami. Esto es debido a la falta de resolución de los datos de partida y al desconocimiento de variables que no suelen ser consideradas a escala local, como el coeficiente de rugosidad (Dao y Tkalich, 2007; Gayer *et al.*, 2010; Kaiser *et al.*, 2011), la topografía y orientación de la costa (Lekkas *et al.*, 2011), el efecto de mareas (Dao y Tkalich, 2007) o de los edificios en la propagación de las olas en las zonas inundadas (Muhari *et al.*, 2011), u otras características geológicas y geomorfológicas del litoral.

Por todo lo anterior, en este trabajo se ha optado por elaborar un mapa de peligrosidad a través de la delimitación de zonas

de alta, media y baja peligrosidad definidas por las isólinas de altitud de 2,5, 5 y 10 m s.n.m., respectivamente, a lo largo de la costa de Huelva, tal y como propone Carreño (2005) (Fig. 2). Para este estudio no se consideraron las variaciones espaciales en la altura de la inundación marina que tendrían lugar en el litoral. Aunque poco precisa, la ventaja de esta delimitación por franjas de terreno y cota topográfica de la peligrosidad para toda una región es que permite realizar comparativas entre núcleos urbanos y establecer una evaluación de la vulnerabilidad y riesgo, partiendo del principio de que el litoral sería afectado por igual por la inundación. Aunque los límites determinados para estas zonas de peligrosidad son arbitrarios, el criterio para establecer estas bandas se basa en los datos obtenidos a partir de las descripciones del evento mejor documentado por las crónicas; es decir, el tsunami de 1755.

En estas crónicas históricas se describen múltiples lugares donde la altura de inundación y *run-up* alcanzaron cotas entre 5 y 10 m s.n.m. (Galbis, 1932; Campos, 1992; Martínez-Solares, 2001). En el Algarve portugués, sin considerar los acantilados del Cabo San Vicente, se describe el impacto de varias olas de tsunami, que inundaron algunas ciudades costeras bajo 10–15 m de agua y que penetraron tierra adentro entre 2,5 y 5 km (Galbis, 1932; Campos, 1992; Baptista y Miranda, 2009; Martínez-Solares, 2001). Los relatos son igualmente numerosos en las localidades vecinas de la provincia de Cádiz. Se describen inundaciones de entre 2,5 m en Puerto Real y 8 m en Puerto de Santa María (Campos, 1992; Martínez-Solares, 2001). La descripción de los efectos del tsunami en 1755 sobre el litoral de Huelva indica un número de damnificados mayor que en el caso de Cádiz, así como cambios muchos más acentuados en la configuración de su litoral

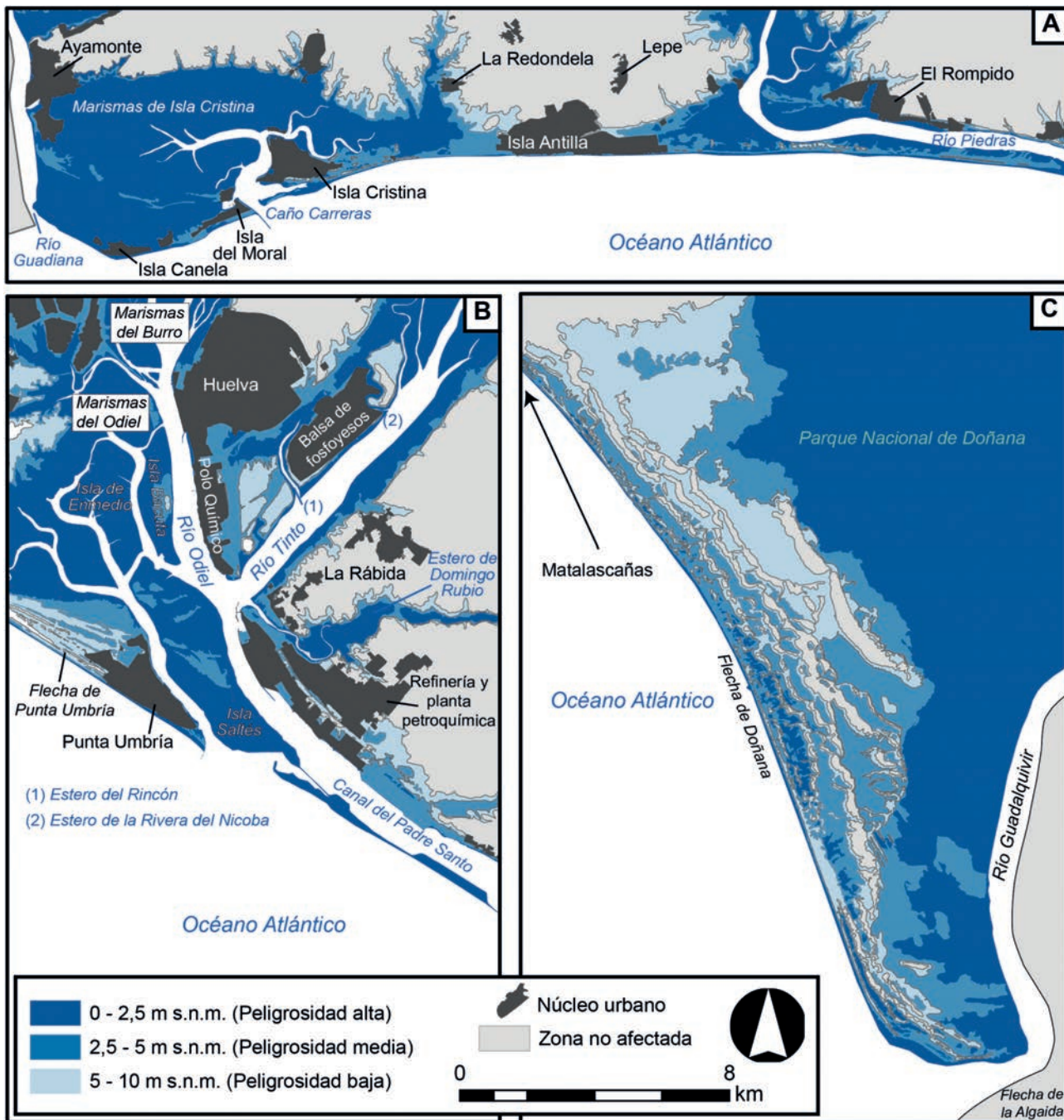


Fig. 2.- Mapa de peligrosidad de los estuarios de los ríos Guadiana, Tinto-Odiel y Guadalquivir donde se muestra la zonificación de peligrosidad de inundación en función de la altura de la lámina de agua que alcanzaría un tsunami con una altura de inundación máxima de 10 m s.n.m.

(Campos, 1992; Baptista *et al.*, 1998; Baptista y Miranda, 2009; Ruiz *et al.*, 2013). Son extensas y detalladas estas crónicas en la ciudad de Ayamonte y el entorno de Isla Canela, donde se describe la inundación repetida, entre 3 y 5 veces, de las playas, marismas y canales mareales, así como el violento desbordamiento del Río Guadiana, que alcanzó las calles de la ciudad. La Torre Almenara de La Canela, actualmente a 1,5 m s.n.m., fue cubierta más de la mitad de su altura por el mar. Este último dato parece indicar que la altura de la inundación en las marismas de Isla Cristina estuvo muy próxima a los 10 m s.n.m., ya que la altura de la torre es de 18 m (Martínez-Solares, 2001). Específicamente, los daños causados por este

mismo evento en la ciudad de Huelva y, en general, en su estuario, son bien descritos en los distintos relatos consultados y recopilados. La altura de la inundación se estima entre 2 y 3 m y su alcance aproximado fue de unos 100 m a ambos lados de la ría. En cualquier caso, Huelva fue inundada sólo en sus zonas más bajas, atravesando las olas las marismas y avanzando por los cauces fluviales. Existen pocos datos del alcance de las olas dentro de la ciudad, aunque las crónicas relatan que el agua alcanzó la zona denominada “La Placeta”, ubicada muy cerca del actual centro de la ciudad, a unos 3 m s.n.m. (Campos, 1992). Esta información indica la llegada atenuada de la ola al núcleo urbano que solo resultó afectado

en la zona próxima a la rivera del Río Odiel, tal y como indican también los modelos computacionales de propagación de onda e inundación (Lima *et al.*, 2010).

### *Cálculo y cartografía de vulnerabilidad*

El análisis de la vulnerabilidad de edificios ante un tsunami se ha llevado a cabo solo en los núcleos urbanos en los que hay evidencias históricas y/o geológicas del impacto de uno o varios eventos; es decir, las localidades de Ayamonte - Isla Canela - Isla del Moral, Huelva y Punta Umbría. Estos municipios se localizan en contextos geográficos muy diferentes y constituyen ejemplos representativos de los diversos escenarios posibles ante este tipo de eventos en el litoral onubense.

Inicialmente, se verificó en el terreno que la información espacial descargada e integrada en la geodatabase en la que se incluían los polígonos, que delimitan los edificios/manzanas, se correspondiera con la realidad. En aquellos casos en los que no lo hacía, se modificó manualmente esta información considerando los datos actualizados adquiridos en el terreno. La información arquitectónica de cada polígono, es decir para cada edificio/manzana, se recopiló mediante trabajo de campo, al igual que las características del entorno, importantes a la hora de evaluar los efectos de las olas del tsunami sobre las construcciones.

De entre las diversas metodologías para evaluar la vulnerabilidad de los edificios ante un tsunami (*e.g.*, Omira *et al.*, 2010; Mück *et al.*, 2013) se ha utilizado el modelo Ppathoma de *Tsunami Vulnerability Assessment* (PTVA), originalmente propuesto por Ppathoma (2003) y revisado por Dominey-Howes y Ppathoma (2006) y Dall'Osso *et al.* (2009a). Esta tercera versión del modelo, probada en la costa de Nueva Gales del Sur, Australia (Dall'Osso *et al.*, 2009b), ha sido utilizada para evaluar la vulnerabilidad de diversas localidades costeras como las Islas Eolias (Italia; Dall'Osso *et al.*, 2010), Figueira da Foz y Setúbal (Portugal; Barros *et al.*, 2013; Emidío *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2014), sur de la Península de

Boso (Japón; Voulgaris y Murayama, 2014), Nápoles (Italia; Alberico *et al.*, 2015), la Bahía Chabahar (Irán; Madani *et al.*, 2017) y la conurbación La Serena-Coquimbo (Chile; Izquierdo *et al.*, 2018). La aplicación del modelo PTVA obtiene como resultado un Índice de Vulnerabilidad Relativa (RVI) para cada edificio/manzana analizado. Este índice tiene en cuenta también la altura de la inundación a la que se ve sometido el edificio, su posición en la línea de costa y la existencia de barreras naturales en los alrededores, por lo que, en realidad, combina parámetros relativos a peligrosidad y a vulnerabilidad y puede considerarse una medida aproximada del riesgo al que está expuesto el edificio.

El cálculo del RVI depende de la Vulnerabilidad Estructural (SV) y de la vulnerabilidad del edificio asociada al impacto de la ola (WV), según la fórmula (1)

$$(1) \quad RVI = 2/3 (SV) + 1/3 (WV)$$

donde WV se calcula obteniendo la relación entre el número de pisos inundados y el número total de plantas del edificio, mientras que el cálculo de SV tiene en cuenta los atributos de la estructura del edificio (Bv), la profundidad de la inundación en el punto en el que está situado el edificio (Ex) y el grado de protección del mismo (Prot), según la fórmula (2). Para la obtención de Ex se ha considerado el peor escenario posible, con una cota topográfica de inundación máxima de 10 m s.n.m. hacia tierra (*run-up*), por lo que un edificio que esté situado, por ejemplo, a 2 m s.n.m. tendrá un valor Ex de 8.

$$(2) \quad SV(1, 125) = (Bv) * (Ex) * (Prot)$$

El cálculo de Bv se realiza a través de la fórmula (3) mediante el análisis de los atributos del edificio que aparecen descritos en la Tabla 2.

$$(3) \quad Bv(-1, 1) = 1/423 * (100s + 80m + 63g + 60f + 51mo + 46so + 23pc)$$

Bv	Descripción
s (número de plantas)	Edificios de varias plantas son más resistentes para soportar la carga del propio edificio que aquellos que solo cuentan con una planta.
m (material)	Se han considerado como materiales de construcción típicos el hormigón, el ladrillo simple y doble y la madera (o similar). Siendo más resistentes los edificios de hormigón.
g (hidrodinámica de la planta baja)	Los edificios con una planta baja abierta o con accesos rompibles (ventanas) disminuyen el impacto de la ola permitiendo su paso.
f (cimientos)	Cimientos profundos resisten mejor los efectos del impacto del tsunami.
so (forma y orientación)	Edificios con formas redondeadas sufren menores daños que aquellos que tienen forma de "L" o están orientados de forma perpendicular a la dirección de flujo.
mo (objetos móviles)	Los objetos arrastrados por la ola (restos, coches, barcos, etc) pueden impactar contra los edificios y causar daños estructurales.
pc (estado de preservación)	Los edificios con mal estado de conservación tienen más posibilidades de sufrir mayores daños.

**Tabla 2.-** Variables incluidas en el cálculo del parámetro Bv.

Prot	Descripción
Prot_br (número de línea)	Los edificios que se localizan tras la primera línea de costa se encuentran tras el abrigo de aquellos por delante de ellos.
Prot_nb (barreras naturales)	Las barreras naturales atrapan objetos arrastrados por la corriente además de reducir la velocidad del flujo.
Prot_sw (presencia de un rompeolas)	Los edificios protegidos por un rompeolas sufren menos daños que aquellos que no lo están.
Prot_w (presencia de un muro de ladrillos alrededor del edificio)	Muros construidos alrededor de los edificios, aunque no estén específicamente construidos para proteger de una inundación, protegen tanto del impacto de la ola como de la inundación.

**Tabla 3.-** Variables incluidas en el cálculo del parámetro Prot.

Y finalmente, el parámetro Prot se obtiene mediante la fórmula (4) con las características incluidas en la Tabla 3.

$$(4) \quad \text{Prot}(0, 1) = 1/301 * (100\text{Prot}_{br} + 73\text{Prot}_{nb} + 73\text{Prot}_{sw} + 55\text{Prot}_{w})$$

La obtención del RVI permitió clasificar la vulnerabilidad de los edificios en cinco categorías (muy baja, baja, media, alta y muy alta), asimilables a riesgo, e incluir esta información en la geodatabase.

### Análisis de la peligrosidad regional

A las franjas de terreno a cotas comprendidas entre 0–2,5 m s.n.m. (10–7,5 m de altura de inundación), 2,5–5 m s.n.m. (7,5–5 m de altura de inundación) y 5–10 m s.n.m. (0,1–5 m de altura de inundación) se les ha asignado una peligrosidad alta, media y baja, respectivamente (Fig. 2). En base a la propuesta de una zona de peligrosidad delimitada por la cota de inundación de 10 m s.n.m. (Figs. 1 y 2), se ha realizado en paralelo un inventario de poblaciones (Tabla 4), y de bienes patrimoniales y zonas de alto valor medioambiental del litoral de Huelva (Tabla 5), que se verían afectadas por la inundación provocada por un futuro tsunami y el nivel de peligrosidad asignado a la zona donde se localizan.

En conjunto, 442,9 km<sup>2</sup> de costa estarían expuestos en este escenario, de los cuales en torno al 20%, unos 80 km<sup>2</sup>, presentan peligrosidad alta (Tabla 4). Especialmente efectiva es la inundación en las zonas de desembocadura de los valles fluviales. En el sector occidental del litoral, el mar penetraría varios kilómetros tierra adentro y avanzaría hacia el norte, siguiendo el cauce del Río Guadiana, invadiendo las zonas deprimidas y los afluentes al canal principal (Fig. 2A). El estuario del Guadiana y sus marismas adyacentes experimentarían una sumersión completa en su parte española, incluyendo los distintos pueblos que se distribuyen por su costa (Isla Canela, Isla del Moral, Isla Cristina e Isla Antilla) y una parte considerable de la ciudad de Ayamonte. La altura de la inundación en esta zona, muy homogénea, se estima en unos 8 m s.n.m., y disminuiría ligeramente hacia el norte. La costa resultaría igualmente inundada por completo bajo una lámina de agua de 9 m de media y solo un sector de Isla del Moral quedaría elevado unos metros sobre el nivel del mar y se consideraría zona de peligrosidad media (Fig. 2A). En el caso del estuario de los ríos Tinto y Odiel, la inundación del valle sería casi completa,

si bien esta sería mucho más pronunciada en su sector occidental (Fig. 2B). Las marismas del Odiel se encontrarían por debajo de una lámina de agua de unos 8,5 m, quedando las diferentes islas fluviales que se extienden a lo largo del estuario sumergidas entre 5 y 9 m según el punto considerado. La fecha litoral de Punta Umbría sería igualmente sobrepasada por completo por las aguas, aunque en algunas zonas la inundación no superaría los 3 m. Hacia el este, todo el sector de influencia marina del estuario y la zona adyacente al canal principal, en la actualidad ocupada por refinerías, plantas petroquímicas y muelles, aparecen expuestas a una peligrosidad media a baja, con alturas de inundación media de 5,5 m. En esta zona, solo los alrededores de La Rábida, de alto valor patrimonial, experimentarían una inundación significativa (Fig. 2B).

La ciudad de Huelva y el Polo Químico e Industrial, localizado en las marismas al sur del núcleo urbano principal, se ubican en una zona de peligrosidad media en su mayor parte, con alturas de inundación variables entre 3 y 6 m (Fig. 2B). En las proximidades del casco urbano las únicas zonas con peligro de quedar sumergidas bajo más de 7,5 m de lámina de agua se encuentran cerca del cauce del Río Odiel, a su paso por algunas zonas bajas de la ciudad. El sector suroccidental del estuario y las proximidades del cauce del Río Tinto resultarían menos afectados, al estar el valle del río más encajado en el sustrato neógeno en esta zona y situarse los pueblos más importantes a cotas por encima del nivel de máxima altura de inundación. Los canales mareales de la orilla norte del Tinto (Esteros del Rincón y la Rivera del Nicoba), entre los que se ubican los terrenos ocupados por las balsas de residuos industriales de fosfoyesos, supondrían puntos de entrada del mar hacia la ciudad. Alrededor de ellos se alcanzarían alturas de inundación por encima de 5 m. La penetración del mar hacia tierra, siguiendo los valles fluviales, sería superior a 10 km.

La desembocadura del Río Guadalquivir y el Parque Nacional y Natural de Doñana presentan un patrón de inundación muy diferente a los anteriores, condicionado por la altura que alcanza su flecha litoral (30 m s.n.m.) y los cinturones de dunas (Fig. 2C). La entrada del mar se produciría por la desembocadura del río, desde donde se inundarían las marismas, y los caños mareales que la atraviesan, así como las lagunas y los lucios en su sector más cercano a la costa. La altura de la inundación media sería superior a 8 m. En cualquier caso, la flecha podría verse superada solo en su extremo meridional por las olas. La distancia de penetración del mar tierra adentro resulta difícil de estimar, con-

siderando la barrera natural tan efectiva que supone la flecha de Doñana y el avanzado estado de colmatación del estuario. Sin embargo, la enorme extensión de sus marismas y el bajo gradiente topográfico facilitarían la inundación de todo el valle bajo del Guadalquivir.

La localidad más cercana a esta zona, Matalascañas (Fig. 2C), localizada unos 15 km al noroeste, se encuentra en su mayor parte a cotas por encima de los 7 m s.n.m., por lo que se le asigna una peligrosidad baja a pesar de su posición en una costa abierta y desprotegida. En este sentido, es destacable que todos los pueblos y ciudades sometidos a una mayor peligrosidad en base a los criterios utilizados en este trabajo se localizan siempre en el sector occidental y central de la costa de Huelva; es decir, entre los ríos Guadiana y Tinto. Entre las principales poblaciones incluidas en esta franja de terreno se encuentran Isla Cristina y Ayamonte, los núcleos urbanos con un porcentaje más alto de su territorio con alta peligrosidad. Algunos pueblos más pequeños, como Isla Canela (Ayamonte), se ubican en su totalidad en la banda de terreno de mayor peligrosidad. Los

pueblos que poseen un mayor porcentaje de superficie expuesta, dentro de los distintos grados de peligrosidad, son Punta Umbría (100%), Isla del Moral (100%), El Rompido (57%), La Antilla (55%) y Huelva (37%) (Tabla 4).

Existen numerosos bienes patrimoniales y espacios naturales protegidos expuestos a los efectos del tsunami en la provincia (Tabla 5). Los bienes patrimoniales inventariados son muy heterogéneos y van desde edificios religiosos, museos y bibliotecas, a yacimientos arqueológicos y diversas instalaciones portuarias utilizadas para la carga de mineral en el siglo XIX. Destacan por su número, distribución a lo largo de la costa y estar localizadas en zonas de peligrosidad alta, las torres almenara. Esta serie de torreones fue edificada en el siglo XVI, durante el reinado de Felipe VI, con fines defensivos y se encuentran preservados de forma desigual. Otros bienes de interés patrimonial altamente expuestos a tsunamis son los muelles mineros de Tharsis y de la Compañía Riotinto, ambos ubicados en el estuario de los ríos Tinto-Odiel, y el edificio religioso Bahuarte de Las Angustias de Ayamonte.

Población	Peligrosidad alta	Peligrosidad media	Peligrosidad baja	Total inundado	Total municipio
Total del área de estudio	79,7 km <sup>2</sup> (18%)	97 km <sup>2</sup> (21,9%)	266,2 km <sup>2</sup> (60,1%)	442,9 km <sup>2</sup> (100%)	-
Matalascañas (Almonte)	-	-	0,25 km <sup>2</sup> (7,8%)	0,25 km <sup>2</sup> (7,8%)	3,2 km <sup>2</sup>
Mazagón (Palos de la Frontera)	-	0,3 km <sup>2</sup> (10,7%)	0,42 km <sup>2</sup> (15%)	0,72 km <sup>2</sup> (25,7%)	2,8 km <sup>2</sup>
La Rábida (Palos de la Frontera)	-	0,07 km <sup>2</sup> (14%)	0,06 km <sup>2</sup> (12%)	0,13 km <sup>2</sup> (26%)	0,5 km <sup>2</sup>
Palos de la Frontera	-	-	0,07 km <sup>2</sup> (4,7%)	0,07 km <sup>2</sup> (4,7%)	1,48 km <sup>2</sup>
Huelva	0,44 km <sup>2</sup> (4,2%)	2,5 km <sup>2</sup> (23,6%)	0,98 km <sup>2</sup> (9,2%)	3,92 km <sup>2</sup> (37%)	10,6 km <sup>2</sup>
Punta Umbría	0,08 km <sup>2</sup> (2,9%)	1,38 km <sup>2</sup> (49,3%)	1,34 km <sup>2</sup> (47,9%)	2,80 km <sup>2</sup> (100%)	2,8 km <sup>2</sup>
El Portil (Cartaya)	-	0,09 km <sup>2</sup> (4,7%)	0,41 km <sup>2</sup> (21,6%)	0,5 km <sup>2</sup> (26,3%)	1,9 km <sup>2</sup>
El Rompido (Cartaya)	0,12 km <sup>2</sup> (6,7%)	0,6 km <sup>2</sup> (33,3%)	0,3 km <sup>2</sup> (16,7%)	1,02 km <sup>2</sup> (56,7%)	1,8 km <sup>2</sup>
La Antilla –Islantilla – Urbasur (Lepe)	-	1,57 km <sup>2</sup> (35,7%)	0,84 km <sup>2</sup> (19,1%)	2,41 km <sup>2</sup> (54,8%)	4,4 km <sup>2</sup>
Isla Cristina	1,08 km <sup>2</sup> (67,5%)	0,52 km <sup>2</sup> (32,5%)	-	1,60 km <sup>2</sup> (100%)	1,6 km <sup>2</sup>
Isla Canela (Ayamonte)	0,1 km <sup>2</sup> (100%)	-	-	0,1 km <sup>2</sup> (100%)	0,1 km <sup>2</sup>
Isla del Moral (Ayamonte)	0,1 km <sup>2</sup> (20%)	0,4 km <sup>2</sup> (80%)	-	0,5 km <sup>2</sup> (100%)	0,5 km <sup>2</sup>
Ayamonte	0,45 km <sup>2</sup> (19,6%)	0,6 km <sup>2</sup> (26,1%)	0,15 km <sup>2</sup> (6,5%)	1,2 km <sup>2</sup> (52,2%)	2,3 km <sup>2</sup>

**Tabla 4.-** Superficie total del área de estudio y de las localidades expuestas a un proceso tsunamigénico con *run-up* de 10 m s.n.m. en el litoral de Huelva y sus grados de peligrosidad: alto (10–7,5 m de altura de inundación), medio (7,5–5 m de altura de inundación) y bajo (0,1–5 m de altura de inundación). En gris se indican las localidades donde se ha estudiado la vulnerabilidad.

Elementos patrimoniales	Peligrosidad
Torre de la Higuera (Almonte)	Alta
Torre del Loro (Almonte)	Alta
Torre del Zalabar (Almonte)	Alta
Torre del Asperillo (Almonte)	Alta
Torre de la Carbonera (Almonte)	Media
Torre de Isla Canela (Ayamonte)	Alta
Baluarto de las Angustias (Ayamonte)	Alta
Antiguo convento de San Francisco: Iglesia de San Francisco (Ayamonte)	Media
Iglesia de Nuestra Señora de las Angustias (Ayamonte)	Media
Capilla de San Antonio (Ayamonte)	Baja
Iglesia y antiguo convento de La Merced (Ayamonte)	Baja
Torre del Malandar (Hinojos)	Alta
Muelle de carga de la Empresa Compañía Española de Minas Tharsis (Huelva)	Alta
Muelle de minera de la Compañía Riotinto (Huelva)	Alta
El Almendral de Saltés (Huelva)	Media
Iglesia de la Purísima Concepción	Baja
Museo de Huelva	Baja
Antiguo Convento de la Merced	Baja
Biblioteca Pública de Huelva	Baja
Muelle de las Carabelas (Palos de la Frontera)	Media
Torre de la Arenilla (Palos de la Frontera)	Media
El Eucaliptal (Punta Umbría)	Alta
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen (Punta Umbría)	Media
Torre de Punta Umbría (Punta Umbría)	Baja

Espacios Naturales Protegidos	Peligrosidad
Parque Nacional de Doñana	Alta - nula
Parque Natural Marismas del Odiel	Alta
Paraje Natural Lagunas de Palos y Las Madres	Baja
Paraje Natural Estero del Domingo Rubio	Alta
Reserva Natural Laguna del Portil	Baja - nula
Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido	Alta - media
Paraje Natural Marismas de Isla Cristina	Alta

**Tabla 5.-** Listado de elementos patrimoniales y espacios naturales protegidos, localizados dentro de la zona de peligrosidad establecida para el litoral de Huelva.

Hasta 7 espacios naturales protegidos estarían expuestos, total o parcialmente, a una peligrosidad alta por tsunamis en el litoral de Huelva. Todos ellos están localizados en sistemas estuarinos y se caracterizan por un amplio desarrollo de marismas salobres, su elevada biodiversidad y su gran variedad de paisajes. Como es obvio, su proximidad al litoral, su paisaje plano y la existencia de canales mareales y amplias desembocaduras que facilitarían la inundación marina, hacen que casi todos ellos puedan ser considerados zonas de peligrosidad alta ante tsunami (Tabla 5). Destacan, por su extensión y alto valor ecológico, el Parque Nacional y Natural de Doñana, considerado el humedal más importante de Europa, y el Paraje Natural Marismas del Odiel. Solo las Lagunas de Palos, Las Madres y el Por-

til, ubicadas en posiciones interiores dentro de los sistemas litorales, son catalogadas como de peligrosidad baja, o incluso nula.

Finalmente, varios estudios paleontológicos y sedimentológicos realizados en depósitos de paleotsunamis en los distintos estuarios de la provincia aportan información del impacto potencial sobre los ecosistemas costeros y la configuración de los humedales por los efectos de un tsunami en las zonas de desembocaduras fluviales y permiten preestablecer cuáles serían las consecuencias potenciales de las olas en el litoral. Morales *et al.* (2008) describen la entrada de un gran volumen de sedimentos y fauna marina en los sectores de dominio marino y mixto de las desembocaduras fluviales, que en algunos casos pudieron provocar la mortandad masiva de moluscos es-

tuarinos por la rápida acumulación de arenas y fangos en canales mareales y marismas. Otras investigaciones profundizan en los cambios en las asociaciones de ostrácodos y foraminíferos, que reflejan una relativamente rápida recuperación del sistema y registran un ligero incremento en la influencia marina de zonas de laguna y desembocadura tras el impacto de las olas (Ruiz *et al.*, 2005, 2007, 2008, 2010; Pozo *et al.*, 2010; Guerra *et al.*, 2013), probablemente como consecuencia de la destrucción, parcial o total, de las flechas litorales que las confinaban (Rodríguez-Vidal *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2013). Esta erosión de las flechas litorales y cordones dunares conduciría también a la destrucción o degradación de las masas forestales, formadas sobre todo por pinares y matorral (Manzano *et al.*, 2018).

### Análisis de peligrosidad y vulnerabilidad relativa en núcleos urbanos

El cálculo del RVI (Índice de Vulnerabilidad Relativa), en diferentes localidades de la costa de Huelva, nos ha permitido realizar una evaluación de la respuesta de algunos de los núcleos urbanos más expuestos a un posible proceso tsu-

namigénico. Se han seleccionado 5 localidades que, por sus características urbanísticas, situación con respecto a la línea de costa y la existencia/inexistencia de barreras naturales, constituyen buenos ejemplos a la hora de diseñar un escenario que incluya los efectos de un tsunami sobre este litoral. Estas son, de oeste a este, los núcleos urbanos de Ayamonte, Isla Canela, Isla del Moral, Punta Umbría y Huelva (Figs. 3 y 4). Todos ellos se localizan en el sector occidental y central del litoral de la provincia y poseen, al menos, una tercera parte de su superficie expuesta a la inundación de un tsunami con un *run-up* de 10 m s.n.m. (Tabla 6).

En la mayor parte de los casos, las construcciones con un RVI medio o bajo responden a diferentes tipos de edificios localizados a cotas topográficas próximas a 10 m s.n.m. y lejos de la costa; o bien, a grandes bloques de apartamentos fabricados con hormigón, de reciente construcción, de más de 4 plantas y cimentaciones profundas, independientemente de su posición con respecto a la línea de costa (Fig. 5).

Ayamonte puede considerarse un caso de población ubicada en la zona de influencia marina de un estuario, protegido y separado de la costa por un extenso cuerpo de marisma, aunque localizado en la riera de un río a pocos kilómetros de su desembocadura. Esta última no posee un

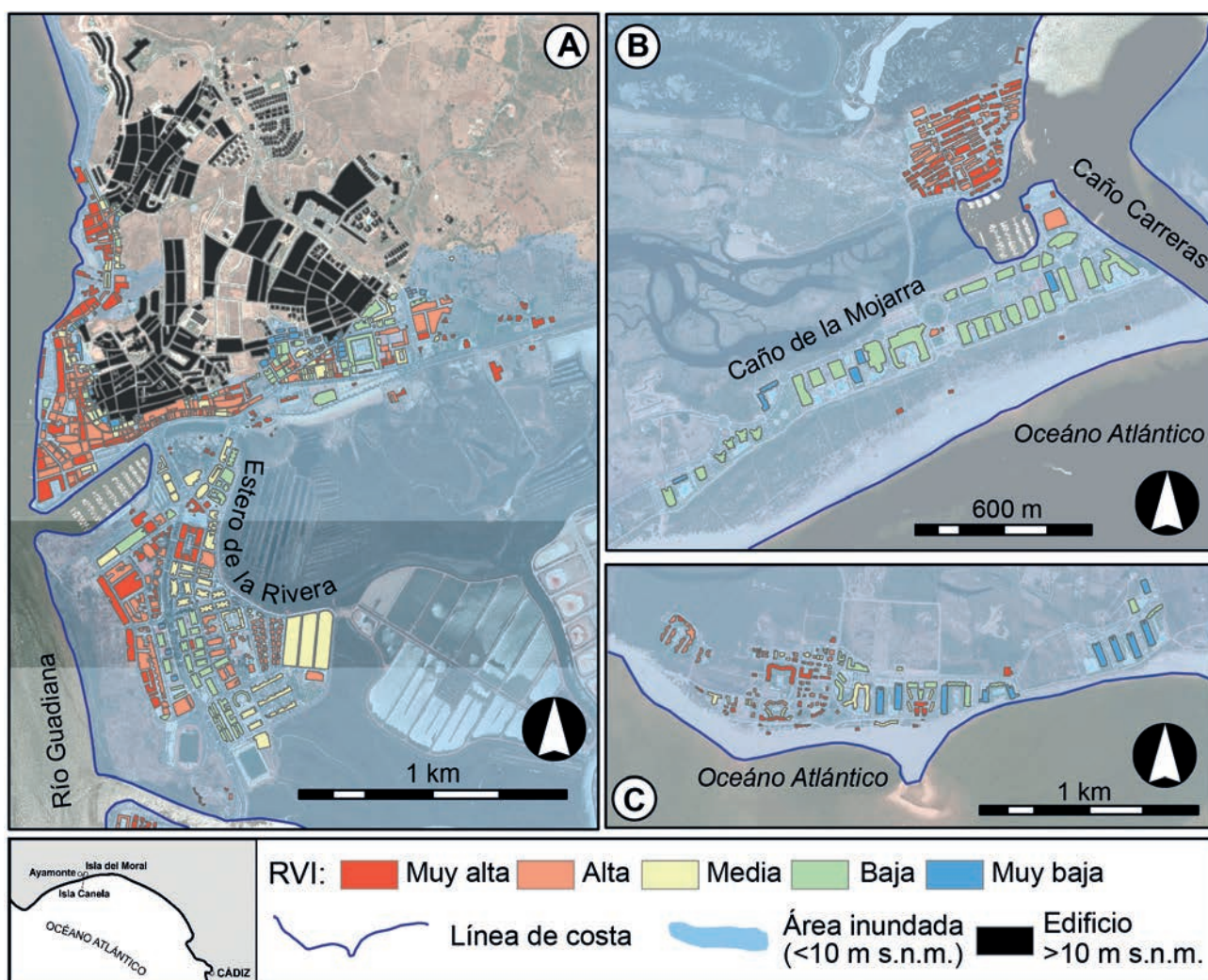


Fig. 3.- Mapas de vulnerabilidad ante un tsunami con altura de inundación de 10 m de edificios en los núcleos urbanos de: A. Ayamonte; B. Isla del Moral; y C. Isla Canela.



**Fig. 4.-** Diferente ejemplos de construcciones en las localidades estudiadas: A. Edificios con vulnerabilidad alta en Ayamonte; B. Construcción destinada al almacenaje en mal estado de conservación con vulnerabilidad muy alta en Ayamonte; C. En primer plano, viviendas típicas andaluzas de vulnerabilidad alta en Isla del Moral y al fondo edificios modernos de apartamentos de playa con vulnerabilidad baja; D. Edificios modernos de apartamentos de playa con vulnerabilidad baja en Isla Canela; E. Construcción de material ligero en primera línea de playa en Isla Canela con vulnerabilidad muy alta; F. Construcción de muy baja vulnerabilidad en las proximidades del cauce del Río Odiel en Huelva; G. Construcción de vulnerabilidad alta en la zona portuaria de la ría de Huelva; H. En primer plano, viviendas unifamiliares en Punta Umbría con vulnerabilidad media y al fondo edificios de más de 5 plantas con vulnerabilidad muy baja.

mecanismo de cierre sedimentario efectivo, a excepción de un conjunto de barras arenosas submareales que actúan a modo de plataformas de batida. Se ha estimado que el 50% de la ciudad sería afectada por la inundación y que el 20% se encuentra en zonas definidas como de peligrosidad alta ante tsunami (Tabla 4). Entre los edificios que se localizan

en la zona de peligrosidad en la ciudad de Ayamonte, más del 60% poseen un RVI muy alto o alto (Tabla 6). La mayor parte de ellos se localizan en posiciones cercanas a la margen del canal oriental del Guadiana y el Estero de la Rivera, zonas por donde se produciría el desbordamiento del mar y donde se concentrarían los daños (Fig. 3A). El des-

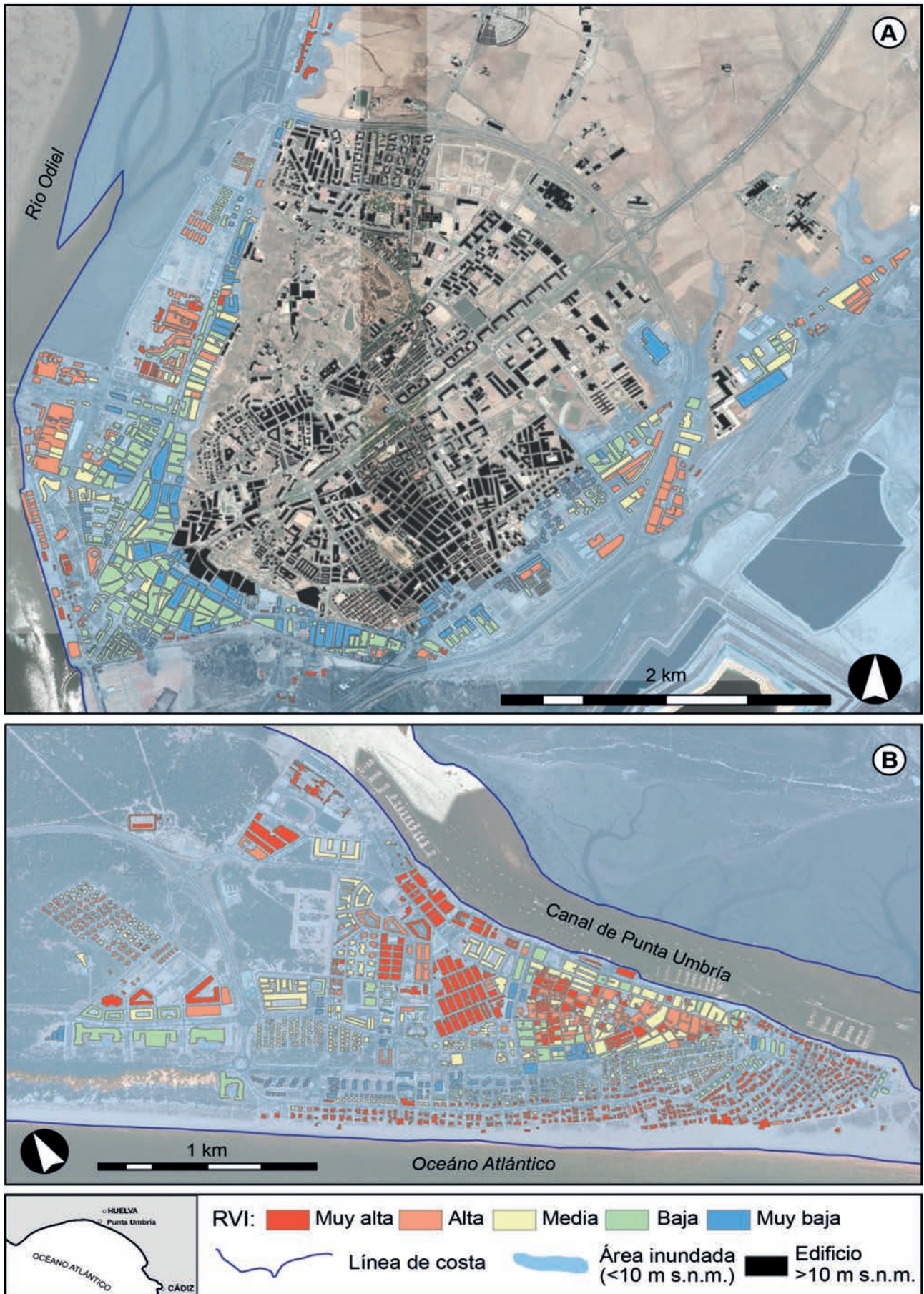


Fig. 5.- Mapas de vulnerabilidad ante un tsunami con altura de inundación de 10 m de edificios en los núcleos urbanos de: A. Huelva y B. Punta Umbría.

nivel que posee el casco de la antigua ciudad hacia el oeste, es decir hacia el río, impide que la inundación se propague hacia el interior. La construcción de un pequeño dique rompeolas, de diseño vertical y altura próxima a 1,5 m, a lo largo de la orilla del río y del estero, también ha contribuido a disminuir ligeramente la vulnerabilidad de esta zona. Los edificios de viviendas más vulnerables se distribuyen en manzanas de entre 1 y 3 plantas de altura, de doble pared de ladrillo, poseen un estado de conservación de medio a precario y cimentaciones de profundidad media (Fig. 4A). Los sectores orientales de la ciudad, más alejado de los cauces y protegidos por las Marismas de Isla Cristina del impacto directo de las olas, poseen una vulnerabilidad más baja. En cualquier caso, algunas viviendas aisladas de poca altura, en su extremo este, se evalúan como de vulnerabilidad alta o muy alta. Hacia el norte de la ciudad, y próximos al río, un conjunto de edificios de un solo piso y planta prácticamente cerrada, destinados al almacenaje o utilizados como astilleros, se categorizan igualmente como de vulnerabilidad muy alta (Fig. 4B).

En el núcleo urbano de Isla del Moral encontramos 2 zonas bien diferenciadas en lo que se refiere a su ordenación urbanística. La primera supone la continuación en el litoral de la playa de Isla Canela (ver abajo), donde predominan los edificios de construcción reciente, de varias plantas y cimentaciones profundas, con RVI bajos a medios. La segunda, el casco antiguo de la ciudad, aparece desconectada de esta zona por el Puerto Deportivo y el Caño de La Mojarra, ubicada en la margen oeste del Caño Carreras, entre cuerpos de marismas, y casi 1 km tierra adentro. Aunque toda la población resultaría afectada por la acción del tsunami, tan sólo el 20% de las edificaciones se distribuyen por zonas catalogadas como de alta peligrosidad (Fig. 3B). Las características de las viviendas tradicionales andaluzas, de 1 o 2 plantas, construidas con doble ladrillo y con pocas ventanas (Fig. 4C), permiten considerarlas construcciones con vulnerabilidad muy alta a alta, a pesar de la defensa que supone el dique rompeolas, inclinado y de escasa altura, que bordea la margen derecha del Caño Carreras (Fig. 3B).

El pueblo de Isla Canela representa un caso de núcleo urbano de construcción reciente que se localiza en una zona de playa. Se encuentra en la cara expuesta de un cordón litoral con desarrollo de barras arenosas submareales subparalelas al litoral que supondrían una barrera natural poco efectiva ante el impacto de tsunamis (Fig. 3C). Prácticamente toda la superficie que ocupa esta localidad se consi-

dera de alta peligrosidad ante tsunami (Tabla 4). A pesar de su posición en costa abierta, el grado de vulnerabilidad asignado a sus edificios es considerablemente inferior al caso de Ayamonte. Esto se debe al elevado porcentaje de viviendas nuevas, con más de 5 pisos y de cimentación profunda que definen el estilo arquitectónico de los sectores central y oriental de la localidad (Fig. 5D). Los edificios con RVI alto y muy alto se concentran en el sector occidental de la localidad, donde predominan las construcciones unifamiliares, individuales o adosadas, de 2 o 3 plantas, que necesariamente no se encuentran en primera línea de playa, además de algunas construcciones ligeras destinadas al ocio y a la restauración edificadas directamente sobre los cordones dunares (Fig. 4E).

Huelva se localiza en el interior del estuario de los ríos Tinto y Odiel. La ciudad se encuentra protegida de la inundación que originaría un tsunami por las marismas del Odiel y del Burro, así como por las flechas litorales de Punta Umbría y Punta Arenillas (Fig. 5A). Alrededor del 40% del territorio de la localidad estaría potencialmente afectado por la inundación marina, con solo un 4,2% de superficie expuesta a peligrosidad alta por tsunami (Tabla 4). La topografía del terreno sobre el que se asienta la ciudad, con relieves más pronunciados en su centro y zonas más bajas en su periferia (coincidiendo con las riveras de los ríos Tinto y Odiel), favorece la definición de dos bandas concéntricas alrededor de su núcleo urbano. Mientras que las construcciones con vulnerabilidad media a baja se encuentran hacia el interior de la ciudad, los edificios con RVI alto se localizan en la orla periférica, principalmente en su sector occidental, en las cercanías del Río Odiel. En esta zona, el tipo de edificación existente es muy heterogéneo y poseen diferentes funciones, coincidiendo áreas residenciales y recreativas, instalaciones portuarias y astilleros, sin que sea posible asociar una construcción tipo con un grado de vulnerabilidad (Fig. 4F, G). De igual manera, en el sector sureste de la ciudad se distribuyen una serie de polígonos industriales, clasificados como de RVI alto, que bordean el Río Tinto y sus esteros. En Huelva el porcentaje de edificios de RVI muy alto es extremadamente bajo, coincidiendo su localización con estructuras de pequeñas dimensiones y en mal estado de conservación que se localizan anexas a los cauces fluviales, o directamente sobre las marismas.

El ejemplo de Punta Umbría representa el caso más paradigmático de núcleo urbano expuesto a la acción destructiva de un tsunami en el Golfo de Cádiz. Se localiza

	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Total*
Punta Umbría	41,3%	16%	23,8%	12,7%	6,2%	1459
Huelva	7,4%	23,9%	16,9%	30,7%	21,1%	622
Isla del Moral	45,2%	27,7%	2,2%	19,7%	5,2%	137
Isla Canela	30,4%	32,8%	17,6%	11,2%	8%	125
Ayamonte	31,2%	31,6%	16,8%	12,8%	7,5%	772

**Tabla 6.-** Porcentaje de polígonos analizados en cada núcleo urbano según su clasificación RVI. Total\* está referido al número de polígonos analizados en cada localidad.

directamente sobre una flecha litoral y se extiende tanto por la zona de playa abierta como bordeando el canal mareal de Punta Umbría hacia el interior del estuario (Fig. 5B). Su máxima cota topográfica no supera los 10 m s.n.m. y solo la presencia de bosques de pinares y los sistemas de cordones dunares en el interior de la ciudad, muy degradados, constituyen una tenue defensa natural frente al impacto de las olas. El 100% de su extensión sería afectada por el tsunami aunque solo el 3% de las construcciones se localizan en zonas de peligrosidad muy alta (Tabla 4). Por otro lado, más de la mitad de sus edificios presentarían un RVI muy alto o alto (Tabla 6). El estilo arquitectónico de estos edificios es diferente según el sector de la ciudad que se considere. En la zona de playa, a lo largo de la primera línea de costa, y en el extremo sur de la flecha, el tipo de vivienda consiste en chalets individuales, de un máximo de 3 plantas, contruidos con doble ladrillo (Fig. 4H). Las construcciones con RVI muy alto hacia el interior de la ciudad, y cerca del Canal de Punta Umbría, son edificios antiguos, de 2 o 3 plantas, que conforman manzanas bastante homogéneas en sus características. Los edificios con RVI muy bajo, situados en su mayoría en cuarta o quinta línea de playa corresponden, como en el resto de los casos estudiados, a viviendas modernas, de más de 5 plantas (Fig. 4H), aunque representan un porcentaje muy bajo dentro de esta población (Tabla 6). Los edificios del casco antiguo de la ciudad, propiamente dicho, situado cerca del puerto del Canal de Punta Umbría, presentan valores de RVI heterogéneos debido a la gran diversidad de estilos arquitectónicos existentes.

## Conclusiones

En este trabajo se han evaluado los daños sobre las construcciones de las poblaciones costeras planteando un escenario de un *run-up* homogéneo para toda la provincia de 10 m s.n.m y la definición de bandas de peligrosidad delimitadas en base a las cotas topográficas de 5–10 m s.n.m. (peligrosidad baja), 2,5–5 m s.n.m. (peligrosidad media) y 0–2,5 m s.n.m. (peligrosidad alta). Este escenario es asimilable al expuesto en las crónicas históricas para el tsunami asociado al terremoto de Lisboa de 1755 y se corresponde con el peor escenario posible. De acuerdo a este escenario, las olas avanzarían tierra adentro varios kilómetros a través de los valles fluviales, inundando las playas y los estuarios por completo. Casi un 20% del total de la costa expuesta quedaría inundada bajo una lámina de agua de 7,5–10 m s.n.m. (zona de peligrosidad alta), incluyendo diversas poblaciones, espacios naturales protegidos y bienes patrimoniales de la provincia. Elementos patrimoniales como las torres almenaras, los puentes mineros de las Compañías Riotinto y Tharsis, o parajes de alto valor ecológico como el Parque Nacional y Natural de Doñana y las Marismas del Odiel, se localizan en áreas de peligrosidad alta y resultarían dañadas. Las masas forestales asociadas a las dunas costeras recibirían el impacto directo de las olas, experimentando graves daños, pero atenuando la energía del evento en las zonas localizadas hacia el interior.

La cartografía de vulnerabilidad elaborada ante un hipotético tsunami de estas características en varios núcleos ur-

banos localizados a lo largo de la costa de Huelva muestra daños potenciales más importantes en las poblaciones del sector occidental de la provincia. Mientras que los núcleos urbanos localizados directamente en la línea de costa, como Isla Canela, Isla de El Moral, o Punta Umbría, se edifican en zonas de peligrosidad alta y media, la amplia heterogeneidad del tipo de construcciones existentes en ellas derivan en Índices de Vulnerabilidad muy variables, que van de muy bajo a muy alto. Esta disparidad de estilos es consecuencia de la convivencia de edificaciones de varias plantas, cimentaciones profundas y materiales sólidos, dedicados al turismo en temporadas altas (vulnerabilidad baja y muy baja), con viviendas unifamiliares, de 1 o 2 plantas y ladrillo, que han supuesto el tipo de construcción clásica del litoral onubense en las últimas décadas (vulnerabilidad alta y muy alta). A lo anterior hay que sumarle la frecuente existencia de construcciones de materiales ligeros, destinadas a la restauración y ocio, que se distribuyen de forma heterogénea a lo largo de las playas ocupando los sistemas dunares costeros (vulnerabilidad muy alta). En estas tres localidades más del 50% de las construcciones presentan vulnerabilidades altas y muy altas. Las ciudades de Ayamonte y Huelva suponen casos distintos a los anteriores, por su situación dentro de un estuario y, principalmente por el tipo de urbanismo que las caracteriza en comparación a las anteriores. Mientras que Ayamonte posee un porcentaje de superficie relativamente alto de peligrosidad (20%), en Huelva solo un 3% de la superficie está edificada en zonas de peligrosidad alta. De igual manera, el número total y porcentaje de construcciones con vulnerabilidad alta y muy alta es mucho mayor en la primera (62%) respecto a la segunda (31%). Esta situación se deriva no sólo de la altura de inundación de la lámina de agua a la que estarían expuestas ambas ciudades y la superficie afectada, sino también por el tipo de construcción más frecuente y conservación de las mismas.

Los resultados obtenidos permiten aproximar y visualizar los efectos potenciales de un tsunami sobre los núcleos urbanos en distintas localidades del litoral de Huelva, considerando los tipos de construcciones más frecuentes en cada una de ellas, la superficie del núcleo urbano afectada y la altura de la inundación marina. Este tipo de estudios constituyen herramientas muy adecuadas para gestionar la ordenación del territorio, concienciar a la población y elaborar planes de evacuación, todo ello, destinado en conjunto a mitigar los daños ocasionados por un futuro tsunami en el Golfo de Cádiz.

## Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento a Juan Satrustegui y a Luis Carlos Huaccha por su orientación y guía en el desarrollo de este proyecto y a Karina Olivo, Josefa Quiroga, Diego Rojas y Karyme Soleman por su colaboración en el tratamiento de la información. Los comentarios y sugerencias de la editora Beatriz Bádenas, el revisor Francesc Xavier Roig i Munar y un revisor anónimo mejoraron considerablemente la versión final de este trabajo. Esta investigación ha sido financiada por Fundación MAPFRE (Ayudas a la investigación Ignacio H. de Larramendi 2013).

## Referencias

- Abad, M., López González, N., Delgado, J., Rodríguez-Vidal, J., Chamorro, S., Cáceres, L.M., Ruiz, F., 2010. Análisis y cartografía de peligrosidad geológica en el litoral de Ceuta. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23: 37-55.
- Alberico, I., Di Fiore, V., Iavarone, R., Petrosino, P., Piemontese, L., Tarallo, D., Punzo, M., Marsella, E., 2015. The tsunami vulnerability assessment of urban environments through freely available datasets: The case study of Napoli City (southern Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 3 (3): 981-1005.
- Baptista, M.A., Miranda, J.M., 2009. Revision of the Portuguese catalog of tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 25-42.
- Baptista, M.A., Heitor, S., Miranda, J.M., Miranda, P.M., Victor, L.M., 1998. The 1755 Lisbon tsunami: Evaluation of the tsunami parameters. *Journal of Geodynamics*, 25: 143-157.
- Barros, J.L., Emídio, A., Tavares, A., Santos, Â., Oral, A., 2013. Metodologias de avaliação da vulnerabilidade ao risco de tsunami: aplicação ao sector costeiro Cova Gala-Leirosa; Figueira da Foz. *IX Congresso da Geografia Portuguesa*: 839-845.
- Birkmann, J., von Teichman K., Welle, T., Gonzalez, M., Olabarrieta, M., 2010. The unperceived risk to Europe's coasts: tsunamis and the vulnerability of Cadiz, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 2659-2675.
- Borrego, J., 1992. Sedimentología del Estuario del Río Odiel. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 350 p.
- Borrego, J., Morales, J.A., Gil, N., 2000. Evolución sedimentaria reciente de la desembocadura de la ría de Huelva (suroeste de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4): 405-416.
- Buform, E., Bezzeghoud, M., Udías, A., Pro, C., 2004. Seismic sources on the Iberia-African Plate boundary and their tectonic implications. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 623-646.
- Campos, M.L., 1992. *El riesgo de tsunamis en España*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 204 p.
- Carreño, E., 2005. La peligrosidad de los Tsunamis en las costas españolas. Simulaciones. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13 (1): 60-64.
- Catálogo General De Patrimonio Histórico Andaluz. Junta de Andalucía. Base de datos online: <http://www.juntadeandalucia.es/culturaydeporte/web/areas/bbcc/catalogo> (consulta junio 2016).
- Consejería Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. Base de datos online: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/busquedaEspacios.do> (consulta abril de 2014).
- Dabrio, C.J., Goy, J.L., Zazo, C., 1998. The record of the tsunami produced by the 1755 Lisbon earthquake in Valdelagrana spit (Gulf of Cádiz, southern Spain). *Geogaceta*, 23: 31-34.
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., Dominey-Howes D., 2009a. A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage. *Natural Hazard and Earth System Science*, 9: 1557-1565.
- Dall'Osso, F., Gonella, G., Gabbianelli, G., Withycombe, G., Dominey-Howes, D., 2009b. Assessing the vulnerability of buildings to tsunami in Sydney. *Natural Hazard and Earth System Science*, 9: 2015-2026.
- Dall'Osso, F., Maramai, A., Graziani, L., Brizuela, B., Cavalletti, A., Gonella, M., Tinti, S., 2010. Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy: assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10: 1547-1562.
- Dao, M.H., Tkalich, P., 2007. Tsunami propagation modelling – a sensitivity study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7: 741-754.
- Dominey-Howes, D., Papathoma, M., 2006. Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Natural Hazards*, 40: 113-136.
- Emídio, A., Barros, L., Santos, Â., Oliveira-Tavares, A., 2013. Aplicação da metodologia PTVA-3 na avaliação da vulnerabilidade do centro urbano da cidade de Setúbal em caso de tsunami. *IX Congresso da Geografia Portuguesa*: 833-838, Évora, Portugal.
- Feria, M.C., Aguilar, M.E., de la Prada, C., Izquierdo, T., Abad, M., Rodríguez-Vidal, J., 2013. Análisis espacial mediante herramientas SIG de la vulnerabilidad ante tsunamis del casco urbano de Punta Umbria (Huelva, SO de España). 7.
- Forbes, K., Broadhead, J., 2007. *The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts*. Informe interno para la FAO (ONU) para Asia y Pacífico. Bangkok, 30 p.
- Galbis, J., 1932. *Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5°E y 20°W de Greenwich y los paralelos 45° y 25°N*. Tomo I. Instituto Geográfico, Catastral y de Estadística, Madrid, 897 p.
- Gayer, G., Leschka, S., Nohren, I., Larsen, O., Gunther, H., 2010. Tsunami inundation modelling based on detailed roughness maps of densely populated areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1679-1687.
- Goy, J.L., Zazo, C., Dabrio, C.J., Lario, J., Borja, F., Sierro, F.J., Flores, J.A., 1996. Global and regional factors controlling changes of coastlines in Southern Iberia (Spain) during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 15: 773-780.
- Gracia, F.J., Alonso, C., Benavente, J., Anfuso, G., del Río, L., 2006. The different coastal records of the 1755 Tsunami waves along the Atlantic Spanish Coast. En: *Zeitschrift für geomorphologie supplementband* (A. Scheffers, D. Kelletat, Eds), 146: 195-220.
- Guerra, L., Ruiz, F., Abad, M., Veiga-Pires, C., 2013. Foraminifera as tsunami tracers in Holocene sequences of Southwestern Spain. 273-275.
- Gutscher, M.A., Malod, J., Rehault, J.P., Contrucci, I., Kingelhofe, F., Mendes-Victor, L., Spakman, W., 2002. Evidence for active subduction beneath Gibraltar. *Geology*, 30 (12): 1071-1074.
- Gutscher, M.A., Baptista, M.A., Miranda, J.M., 2005. The Gibraltar Arc seismogenetic zone (part 2). Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modelling and seismic intensity. *Tectonophysics*, 426: 152-166.
- Harada, K., Inamura, F., 2005. Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation – a preliminary investigation, tsunamis: case studies and recent developments. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 23: 279-292.
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Junta de Andalucía. Localizador de información espacial: <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/> (consulta abril 2014).
- Instituto Nacional de Estadística (INE). Base de datos: <http://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=131> (consulta marzo de 2017).
- Izquierdo, T., Fritis, E., Abad, M., 2018. Analysis and validation of the PTVA tsunami building vulnerability model using the 0

- rena cities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1703-1716.
- Jelinek, R., Krausmann, E., González, M., Álvarez-Gómez, J., Birkmann, J., Welle, T., 2011. Approaches for tsunami risk assessment and application to the city of Cádiz, Spain. *Natural Hazards*, 60 (2): 273-293.
- Jurado, J.M., 2014. El turismo accesible en Andalucía y Portugal. *Cuadernos de Turismo*, 33: 121-150.
- Kaiser, G., Scheele, L., Kortenhaus, A., Løvholt, F., Römer, H., Leschka, S., 2011. The influence of land cover roughness on the results of high resolution tsunami inundation modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2521-2540.
- Lario, J., Luque, L., Zazo, C., Goy, J.L., Spencer, C., Cabero, A., Bardají, T., Borja, F., Dabrio, C.J., Civis, J., González-Delgado, J.A., Borja, C., Alonso-Azcárate, 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.
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J.L., Silva, P.G., Bardají, T., Cabero, A., Dabrio, C.J., 2011. Holocene palaeotsunami catalogue of SW Iberia. *Quaternary International*, 242: 196-209.
- Lekkas, E., Andreadakis, E., Kostaki, I., Kapourani, E., 2011. Critical Factors for Run-up and Impact of the Tohoku Earthquake Tsunami. *International Journal of Geosciences*, 2 (3): 310-317.
- Lima, V.V., Miranda, J.M., Baptista, M.A., Catalao, J., González, M., Otero, L., Olabarrieta, M., Álvarez-Gómez, J.A., Carreño, E., 2010. Impact of a 1755-like tsunami in Huelva, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 139-148.
- López-Sáez, J.A., Pérez-Díaz, S., Rodríguez-Ramírez, A., Blanco-González, A., Villarias-Robles, J.J.R., Luélmo-Lautenschlaeger, R., Jiménez-Moreno, G., Celestino-Pérez, S., Cerrillo-Cuenca, E., Pérez-Asensio, J.N., León, A., 2018. Mid-late Holocene environmental and cultural dynamics at the southwest tip of Europe (Doñana National Park, SW Iberia, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 22: 58-78.
- Luque, L., Zazo, C., Lario, J., Goy, J.L., Civis, J., González-Hernández, F.M., Silva, P.G., Dabrio, C.J., 2004. El efecto del tsunami del año 1755 en el litoral de Conil de la Frontera (Cádiz). En: *Miscelánea en homenaje a Emiliano Aguirre 1*, (E. Baquedano, S. Rubio, Eds), *Geología*, 72-82.
- Macías-Sánchez, J., 2016. Simulación del tsunami de 1755 y su impacto en las costas españolas del Golfo de Cádiz. En: *El riesgo de maremotos en la Península Ibérica a la luz de la catástrofe del 1 de noviembre de 1755 (IERD)*: 99-109.
- Madani, S., Khaleghi, S., Jannat, M.R., 2017. Assessing building vulnerability to tsunami using the PTV-3 model: A case study of Chabahar Bay, Iran. *Natural Hazards*, 85 (1): 349-359.
- Maekawa, T., Nihei, Y., Nakada, H., 2013. Study on tsunami mitigation effect of coastal dune and fill. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 69 (4): 1453-1458.
- Manzano, S., Carrión, J.S., López-Merino, L., Ochando, J., Munuera, M., Fernández, S., González-Sampériz, P., 2018. Early to mid-Holocene spatiotemporal vegetation changes and tsunami impact in a paradigmatic coastal transitional system (Doñana National Park, southwestern Europe). *Global and Planetary Change*, 161: 66-81.
- Maramai, A., Brizuela, B., Graziani L., 2014. The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue. *Annals of Geophysics*, 57 (4): 1-26.
- Martínez-Solares, J.M., 2001. *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Monografías (9). Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 756 p.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International*, 155 (1): 126-138.
- Morales, J.A., Borrego, J., San Miguel, E.G., López-González, N., Carro, B., 2008. Sedimentary record of recent tsunamis in the Huelva Estuary (Southwestern Spain). *Quaternary Science Reviews*, 27: 734-746.
- Mück, M., Taubenböck, H., Post, J., Wegscheider, S., Strunz, G., Sumaryono, S., Ismail, F.A., 2013. Assessing building vulnerability to earthquake and tsunami hazard using remotely sensed data. *Natural Hazards*, 68 (1): 97-114.
- Muhari, A., Imamura, F., Koshimura, S., Post, J., 2011. Examination of three practical run-up models for assessing tsunami impact on highly populated areas. *Natural Hazard and Earth System Science*, 11: 3107-3123.
- Ojeda, J.F., 1987. *Organización del territorio en Doñana y su entorno próximo (Almonte)*. Siglos dieciocho-veinte. Monografías-Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Madrid, 459 p.
- Ojeda, J.F., Delgado, B., Jurado, V., Arenas, J.M., Villa, A., Silva, R., Caro, E., Fernández, A., Hernández, E., Velasco, A., 1993. Los pinares costeros del Golfo de Cádiz. En: *Intervenciones públicas en el litoral atlántico andaluz. Efectos territoriales*, (M. Granados, J.M. Ojeda, Eds) Agencia de Medio Ambiente, 82-95.
- Omira, R., Baptista, M.A., Miranda, J.M., Toto, E., Catita, C., Catalao, J., 2010. Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural Hazards*, 54 (1): 75-95.
- Omira R., Baptista M.A., Miranda J.M., 2011. Evaluating Tsunami Impact on the Gulf of Cadiz Coast (Northeast Atlantic). *Pure and Applied Geophysics*, 168 (6-7): 1033-1043.
- Papathoma M., 2003. Assessing tsunami vulnerability using GIS with special reference to Greece. Tesis Doctoral, Coventry Univ., 290 p.
- Pozo, M., Ruiz, F., Carretero, M.I., Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L.M., Abad, M., González-Regalado, M.L., 2010. Mineralogical assemblages, geochemistry and fossil associations of Pleistocene-Holocene complex siliciclastic deposits from the southwestern Doñana National Park (SW Spain): a palaeoenvironmental approach. *Sedimentary Geology*, 225: 1-18.
- Renou, C., Lesne, O., Mangin, A., Rouffi, F., Atilah, A., El Hadani, D., Moudni, H., 2011. Tsunami hazard assessment in the coastal area of Rabat and Sale, Morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2181-2191.
- Rodríguez-Vidal, J., Rodríguez-Ramírez, A., Cáceres, L.M., Clemente, L., 1993. Coastal dunes and post-Flandrian shoreline changes. Gulf of Cadiz (SW Spain). *INQUA MBSS Subcommittee Newsletter*, 15: 12-15.
- Rodríguez-Vidal, J., Ruiz, F., Cáceres, L.M., Abad, M., González-Regalado, M.L., Pozo, M., Carretero, M.I., Monge, A.M., Gómez, F., 2011. Geomarkers of the 218-209 BC Atlantic tsunami in the Roman Lacus Ligustinus (SW Spain): a palaeogeographical approach. *Quaternary International*, 242: 201-212.
- Rodríguez-Vidal, J., Campos Carrasco, J.M., Cáceres Puro, L.M., 2015. Eventos marinos y asentamientos costeros en el suroeste de Iberia. *Cuaternario y Geomorfología*, 29 (1-2): 5-18.
- Ruiz, F., Rodríguez Ramírez, A., Cáceres, L., Rodríguez-Vidal, J., Carretero, M.I., Abad, M., Olías, M., Pozo, M., 2005. Evidence of high-energy events in the geological records: mid-Holocene evolution of the southwestern Doñana national park (SW Spain). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, 229: 212-229.
- Ruiz, F., Borrego, J., López-González, N., Abad, M., González-Regalado, M.L., Carro, B., Pendón, J.G., Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L.M., Prudencio, M.I., Días, M.I., 2007. The geolo-

- gical record of a mid-Holocene marine storm in southwestern Spain. *Geobios*, 40: 689-669.
- Ruiz, F., Abad, M., Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L.M., González-Regalado, M.L., Carretero, M.I., Pozo, M., Gómez-Toscano F., 2008. The geological record of the oldest historical tsunamis in southwestern Spain. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 114: 147-156.
- Ruiz, F., Abad, M., Cáceres, L.M., Rodríguez-Vidal, J., Carretero, M.I., Pozo, M., González-Regalado, M.L., 2010. Ostracods as tsunami tracers in Holocene sequences. *Quaternary Research*, 73 (1): 130-135.
- Ruiz, F., Rodríguez-Vidal, J., Abad, M., Cáceres, L.M., Carretero, M.I., Pozo, M., Rodríguez-Llanes, J.M., Gómez-Toscano, F., Izquierdo, T., Font, E., Toscano, A., 2013. Sedimentological and geomorphological imprints of Holocene tsunamis in southwestern Spain: An approach to establish the recurrence period. *Geomorphology*, 203: 97-104.
- Santos, A., Tavares, A.O., Emidio, A., 2014. Comparative tsunami vulnerability assessment of an urban area: An analysis of Setúbal city, Portugal. *Applied Geography*, 55: 19-29.
- Sartori, R., Torelli, L., Zitellini, N., Peis, D., Lodolo, E., 1994. Eastern segment of the Azores-Gibraltar line (central-eastern Atlantic): an oceanic plate boundary with diffuse compressional deformation. *Geology*, 22: 555-558.
- Scheffers, A., Kelletat, D., 2005. Tsunami Relics in the Coastal Landscape West of Lisbon, Portugal. *Science of Tsunami Hazards*, 23 (1): 3-16.
- Silva, P.G., Rodríguez-Pascua M.A (Eds.), 2014. *Catálogo de los efectos geológicos de los terremotos en España*. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia., nº 4. Instituto Geológico y Minero de España y Asociación Española para el estudio del Cuaternario, Madrid, 362 p.
- Stich, D., Mancilla, F., Morales, J., 2005. Crust-mantle coupling in the Gulf of Cadiz (SW Iberia). *Geophysical Research Letters*, 32: L13306.
- Tortella, D., Torné, M., Pérez-Estaún, A., 1997. Geodynamic evolution of the eastern segment of the Azores-Gibraltar zone: The Gorringe Bank and the Gulf of Cadiz region. *Marine Geophysical Researches*, 19: 211-230.
- Villalobos, M., Pérez-Muñoz, A.B., 2008. *Geodiversidad y patrimonio geológico de Andalucía*. Itinerario geológico por Andalucía. Guía didáctica de campo (CD), Junta de Andalucía, Sevilla, 328 p.
- Whelan, F., Kelletat, D. 2003. Analysis of Tsunami deposits at Cabo de Trafalgar, Spain, using GIS and GPS Technology. *Essener Geographische Arbeiten*, 35: 11-25.
- Whelan, F., Kelletat, D. 2005. Boulder deposits on the Southern Spanish Atlantic Coast: possible evidence for the 1755 AD Lisbon Tsunami? *The Science of Tsunami Hazards*, 23: 25-38
- Zazo, C., Goy, J.L., Somoza, L., Dabrio, C.J., Belloumini, G., Improta, S., Lario, J., Bardají, T., Silva, P.G., 1994. Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. *Journal of Coastal Research*, 10: 933-945.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 10-5-2018

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 12-10-2018

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 26-11-2018