

## Mapas de peligrosidad por maremoto en la costa española como apoyo para el establecimiento de los planes de actuación de C.C.A.A.

González Mauricio; Aniel-Quiroga, Íñigo<sup>a</sup>; García, Pablo; Quetzalcoatl, Omar<sup>a</sup>; Fernández, Patricia

<sup>a</sup> Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, España

[gonzalere@unican.es](mailto:gonzalere@unican.es), [anieli@unican.es](mailto:anieli@unican.es), [pablo.garciaal@alumnos.unican.es](mailto:pablo.garciaal@alumnos.unican.es), [gutierrezozq@unican.es](mailto:gutierrezozq@unican.es), [fernandezqp@unican.es](mailto:fernandezqp@unican.es)

---

### Resumen

*La costa española ha sufrido los efectos de tsunamis o maremotos a lo largo de su historia, tanto en la costa Atlántica donde son poco frecuentes pero muy destructivos, como en la costa Mediterránea donde son más frecuentes pero de menor magnitud. En respuesta a esta peligrosidad real de tsunami en nuestra costa, la Dirección general de protección Civil y Emergencias (DGPCE) consideró que el riesgo de maremotos debía de ser objeto de planificación y, por ello, estableció mediante el Real Decreto 1053/2015 de 20 de noviembre, la Directriz Básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos. En esta directriz se establecen tres niveles en los que se deben elaborar planes de actuación: Nacional, regional y local.*

*La cartografía ya elaborada a escala nacional ha permitido identificar que todas las CCAA excepto Cantabria y País vasco deben proceder a la realización del estudio en el segundo nivel. Como los resultados del nivel nacional no son aplicables al nivel autonómico se infiere la necesidad de elaborar una nueva cartografía, esta vez a nivel autonómico que permita identificar qué municipios deben proceder con la planificación a nivel local, incluyendo estudios completos de riesgo a alta resolución, planes de evacuación, propuesta de medidas de mitigación del riesgo, etc.*

*Pero los tsunamis son fenómenos globales, y como tales afectan de manera simultánea a varias comunidades y varias localidades. Por ello es importante establecer una metodología común que permita obtener resultados con cierta continuidad geográfica, facilitándose así su elaboración. La metodología que aquí se presenta pretende proporcionar un marco de trabajo común que evite la creación de mapas de peligrosidad diferentes en cada zona de estudio de manera que la difusión y la proyección de los mismos se vean optimizadas. Esta metodología se basa en la simulación numérica de eventos de tsunami, utilizando para ello una topobatimetría de calidad y la caracterización de los mecanismos focales de las zonas sísmicas con capacidad para generar tsunamis afectando a la costa española. Como resultado se obtienen mapas de peligrosidad a escala autonómica que proporcionan variables tales como la altura de ola, el run-up provocado por el tsunami y la longitud de inundación alcanzada, y que son utilizados a su vez para la zonificación de los municipios costeros en función del nivel de acción que requieren.*

*Estos mapas permiten cumplir con el segundo nivel de planificación dispuesto en la Directriz Básica*

**Palabras clave:** *Ensayos, diques en talud, tsunami, maremoto, estabilidad, onda solitaria, mitigación, interacción tsunami-estructura..*

### 1. Introducción

Los maremotos o tsunamis son fenómenos poco frecuentes pero muy destructivos a los que España no ha sido ajena a lo largo de su historia. Quizás el ejemplo más conocido lo tengamos en el terremoto de Lisboa de 1755, el cual generó un gran tsunami que afectó principalmente a la zona del golfo de Cádiz, provincias de Huelva y Cádiz. No todos los tsunamis tienen efectos devastadores. Algunos de ellos, generados por terremotos de menor magnitud, pueden provocar daños en puertos y zonas litorales muy cercanas a la línea de costa. Así, en mayo de 2003, un terremoto de magnitud 6.7

en la costa de Argelia generó un tsunami de pequeñas dimensiones que en apenas 40 minutos alcanzó las costas de las islas Baleares provocando daños en puertos y generando efectos resonantes en algunas bahías. Ambos tipos de tsunami, grandes y pequeños, son susceptibles de provocar daños humanos, económicos, medioambientales, a infraestructuras etc. y por ello deben ser estudiados. De esta manera, la ocurrencia de tsunami afectando a las costas Atlánticas y Mediterráneas ha justificado en los últimos años varias iniciativas internacionales y proyectos europeos (TRANSFER, ASTARTE, NEARTOWARN, y otros). Estos proyectos han buscado profundizar en la caracterización de Europa ante tsunamis, poner de manifiesto la situación de riesgo existente, y avanzar en el planteamiento y aplicación de medidas que lleven a reducir el riesgo. Como resultado de estos proyectos y de los estudios que contienen ha quedado de manifiesto que el riesgo de maremotos en la costa española es alto.

A la vista de esto, la Dirección general de protección Civil y Emergencias (DGPCE) consideró que el riesgo de maremotos debía de ser objeto de planificación y, por ello, estableció mediante el Real Decreto 1053/2015 de 20 de noviembre, la Directriz Básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos. En esta directriz se establecen tres niveles en los que se deben elaborar planes de actuación.

Un primer nivel, Plan Estatal, determina las comunidades autónomas que deben abordar un plan propio de acuerdo a una zonificación de la peligrosidad de maremoto. El estudio nivel nacional fue sacado a concurso y adjudicado y ha sido ejecutado, proporcionando una cartografía de peligrosidad que ha permitido determinar las comunidades autónomas que deben proceder con el segundo nivel de planeamiento. La cartografía ha arrojado como resultado que todas las CCAA excepto las cantábricas más orientales (Cantabria y País Vasco) deben abordar el siguiente nivel de estudio. La cartografía proporcionada no puede ser utilizada para este segundo nivel ya que no posee la resolución suficiente para aproximar la escala autonómica y además en su ejecución no se han calculado datos de inundación en tierra, limitándose por tanto a proporcionar datos de altura de ola en costa.

El segundo nivel, Plan de Comunidad Autónoma,, establece que se debe proporcionar como mínimo una zonificación de la misma en función de la peligrosidad de maremoto, desarrollando en caso necesario estudios de peligrosidad más específicos y precisos. Esta nueva cartografía a escala autonómica es el objeto de este trabajo. Dicha zonificación especificará qué municipios deben abordar un plan a escala local. Además, se deben establecer directrices para la elaboración de planes de actuación de ámbito local. Indicándose expresamente que debe existir una colaboración con las autoridades locales para la previsión de la organización y los medios necesarios para alertar a la población potencialmente afectada en caso de tsunami.

Finalmente, en un tercer nivel, a escala local, se realizarán Planes de Actuación de Ámbito Local, incluyendo estudios de riesgo y elaboración de cartografía, en aquellas municipalidades en las que el plan de comunidad autónoma haya establecido esta necesidad. Estos planes deberán incluir detalladamente el sistema de alerta a la población y el plan o los planes de evacuación.

Teniendo en cuenta esta directriz y los 3 niveles de planificación comentados, en este estudio se ha abordado la evaluación de la peligrosidad por maremoto a escala autonómica, de manera que, aquellas C.C.A.A. que, en base al plan Estatal, deben realizar un Plan de Comunidad Autónoma puedan basarse en la metodología y los mapas que aquí se detallan para identificar qué zonas de su comunidad se encuentran bajo mayor peligrosidad, y, por tanto exigen un Plan de Actuación de Ámbito Local, y cumplir de esta manera con la directriz aprobada. Los mapas elaborados como resultado de este estudio incluirían no sólo datos de alturas de tsunami sino también un primer cálculo del run-up y de la longitud de inundación, basados en los resultados de simulaciones numéricas de los peores eventos de tsunami que podrían afectar la costa española, desde un punto de vista determinista. Estos mapas superan las limitaciones del mapa a escala nacional para alcanzar el siguiente paso de la directriz.

## 2. Metodología

La metodología que aquí se presenta para la elaboración de mapas a escala autonómica sigue una aproximación determinista. Es decir se basa en la caracterización de los peores casos posibles que podrían afectar a las costas de España, y en la propagación de los mismos a través de una topo-batimetría de calidad, utilizando para ello un modelo numérico validado internacionalmente para obtener la inundación provocada por dicho evento así como las variables asociadas a

este proceso: tiempo de llegada, altura de ola, run-up, longitud de inundación. Esta metodología ha sido utilizada con éxito en diversos proyectos y estudios (Álvarez-Gómez et al, 2013, Aniel-Quiroga et al, 2015)

A continuación se detalla esta metodología mapas elaborados como resultado de este estudio incluirían no sólo datos de alturas de tsunami sino también un primer cálculo del run-up y de la longitud de inundación, basados en los resultados de simulaciones numéricas de los peores eventos de tsunami que podrían afectar la costa española, desde un punto de vista determinista.

## 2.1 Caracterización de fuentes tsunamigénicas

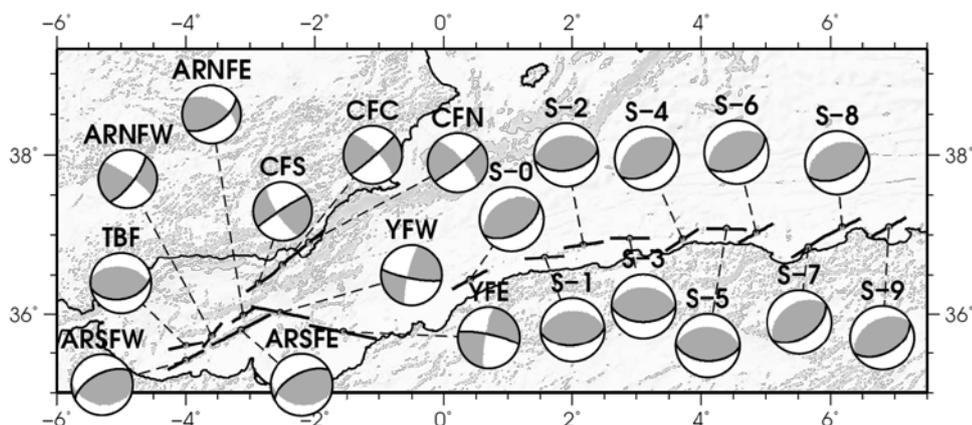
Se ha abordado la caracterización los mecanismos focales presentes en las estructuras sísmicas cuyos terremotos pueden ser capaces de generar tsunamis afectando nuestra costa.

Así para las fuentes tsunamigénicas situadas en el océano Atlántico se han analizado los catálogos existentes, así como los últimos proyectos a los que el IHCantabria, como socio de los mismo ha tenido acceso, como el proyecto europeo ASTARTE (, en el que se redefinieron las posibles fuentes, actualizando los estudios precedentes con los últimos datos encontrados. A modo de ejemplo en la tabla 1 se muestran los parámetros de los mecanismos focales utilizados en la zona de generación donde se generó el tsunami de Lisboa de 1755.

Nombre FUENTE	Componentes	Longitud (m)	Anchura (m)	Profundidad Focal	Latitud (°)	Longitud (°)	STRIKE (°)	DIP (°)	RAKE (°)	Slip (m)	Magnitud
HSF + CP I + CP II	HSF	165000	70000	5000	35.796	-9.913	42,1	35	90	15	8,5+7+7=8,6
	CP I	60000	61660	15480	35.398	-11.318	315	30	90	1,68	
	CP I	60000	61660	15480	35.415	-10.743	315	30	90	1,68	
HS + MP	HSF	165000	70000	5000	35.796	-9.913	42,1	35	90	15	8,5 + 8,25 = 8,75
	MP	110000	70000	5000	36.656	-10.203	20,1	35	90	8	
GF	GF	200000	50000	1000	37.415	-19.085	82	88	160	11	8,3
CWF	CWF	170000	200000	5000	34,53	-9.121	349	5	90	20	8,75
GBF	GBF	200000	80000	5000	36.283	-11.351	53	35	90	10	8,5

Tabla 1. Parámetros de los mecanismos focales utilizado en el océanos Atlántico, validados por expertos internacionales a través del proyecto europeo FP/ ASTARTE.

Del mismo modo se ha analizada la bibliografía, estudios y proyectos existentes para definir los mecanismos focales de los terremotos en el mar Mediterráneo que pueden generar tsunami afectando a nuestras costas. Las fuentes seleccionadas desde un punto de vista determinista proviene en su mayoría de los estudios del JRC, y de Alvarez-Gómez et al (2011) los cuales analizaron y detallaron el Mediterraneo occidental y establecieron las fallas con capacidad para generar terremotos de magnitud suficiente como para propiciar un tsunami que se propague has las costas españolas (ver figura 1).



*Figura 1. Alvarez-Gómez et al, 2011. Esquema de las fuentes existentes en el mar de Alborán y costa de Argelia. El evento de 2003 se generó en esta zona sísmica.*

## 2.2 Reconstrucción topo-batimétrica

Se ha realizado una reconstrucción topo-batimétrica de la zona de estudio, basada en todas las fuentes de datos existentes. Se ha dispuesto de datos ofrecidos por el Instituto Geográfico Nacional (Modelo Digital del terreno con resolución 5 m), Instituto Hidrográfico de la Marina, bases de datos topobatimétricas globales, EmodNet, GEBCO. Además de estas bases de datos se ha procedido a la digitalización de cartas náuticas en zonas donde se ha considerado necesario, y se han incluido los resultados campañas batimétricas existentes a lo largo de la costa española.

Como resultado de esta reconstrucción batimétrica se ha elaborado una serie de mallas que fueron utilizadas como entrada para las simulaciones numéricas que posteriormente se explicaran. Estas mallas forman un entramado anidado que cubre toda la extensión costera de las CCAA. Así se ha utilizado una malla nacional con una resolución de 926 m y una serie de mallas regionales con resolución de 150 m. Aquellas comunidades con más kilómetros de costa se han cubierto con varias mallas regionales. Además, en su elaboración se ha tenido en cuenta la marea existente en cada zona. La inclusión de la marea es fundamental para obtener datos apropiados en cada zona costera, tanto en las comunidades del Mediterráneo donde su incidencia es menor como en las comunidades atlánticas donde su no inclusión daría lugar a imprecisiones desde la perspectiva determinista que se ha seguido.

## 2.3 Simulaciones numéricas

A partir de la batimetría reconstruida y las fuentes tsunamigénicas, se han realizado simulaciones numéricas de tsunami con del modelo C3 (Cantabria-COMCOT-Tsunami Claw), (Olabarrieta et al, 2011) el cual es capaz de calcular la propagación de la onda de tsunami, desde la zona de generación hasta la inundación de la zona costera. Este modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras, tanto lineales como no lineales a través de un esquema de resolución de diferencias finitas. La deformación inicial de la superficie libre es obtenida a través del modelo de Okada el cual transforma los parámetros que definen el mecanismo focal en dicha deformación. Este modelo está ampliamente e internacionalmente validado.

El run-up ha sido calculado a su vez mediante perfiles. El valor del run-up en cada perfil considerado se ha calculado utilizando para ello la metodología presentada por Gutiérrez et al, en 2014. Esta metodología calcula el run-up por interpolación sobre una base de datos de cientos de casos de cálculos de run-up. Esta base de datos está formada por la combinación de perfiles topobatimétricos y olas de tsunami. El run-up de cada una de estas combinaciones fue calculado con un modelo numérico híbrido acoplado, el modelo C3-IH2VOF, que combina las SWE (Shallow Water Equations) con el modelo IH2VOF (Volume of fluid, Lara et al), optimizándose así el cálculo de la inundación de manera que cada esquema numérico es utilizado allí donde mejores resultados proporciona, optimizándose el resultado.

## 3. Resultados

Sólo los valores de altura de ola no son suficientes para caracterizar la afección del tsunami. Se debe tener en cuenta con qué se encuentra la ola al llegar a la costa: acantilado, playa, etc. Esto se consigue combinando la altura de ola con los valores en tierra de Run-up y longitud de inundación

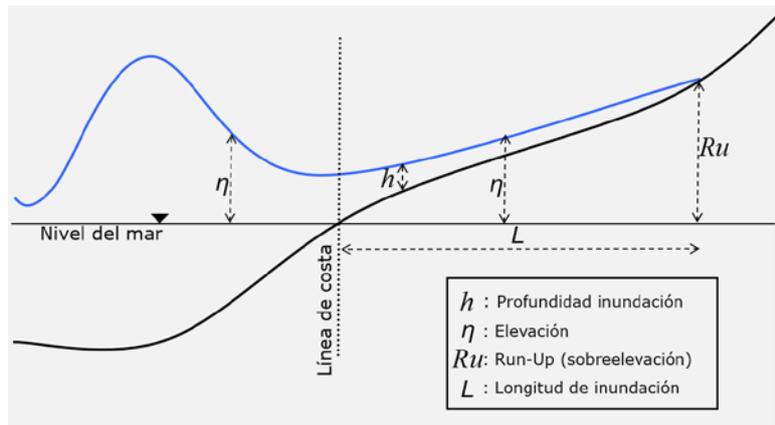


Figura 2. Esquema de un perfil topobatómico con las variables fundamentales que definen la inundación en el mismo: Run-up y longitud de inundación

Como resultado, se han elaborado mapas de peligrosidad que contienen diversas variables. Así, se proporciona la altura de ola de tsunami en cada punto y, al inundar en tierra, se proporciona también la profundidad de la lámina de agua en cada punto, el run-up máximo y la longitud de inundación, variables fundamentales en la evaluación de la peligrosidad dentro de cada comunidad autónoma.

Estas variables son representadas en mapas, realizados por comunidades autónomas, que permiten identificar qué zonas se encuentran ante una mayor peligrosidad, y que, por tanto, requerirían de un estudio de mayor detalle, a mayor resolución, a escala local. En la figura 3 se ve puede observar un mapa de peligrosidad para la costa de la Región de Murcia.

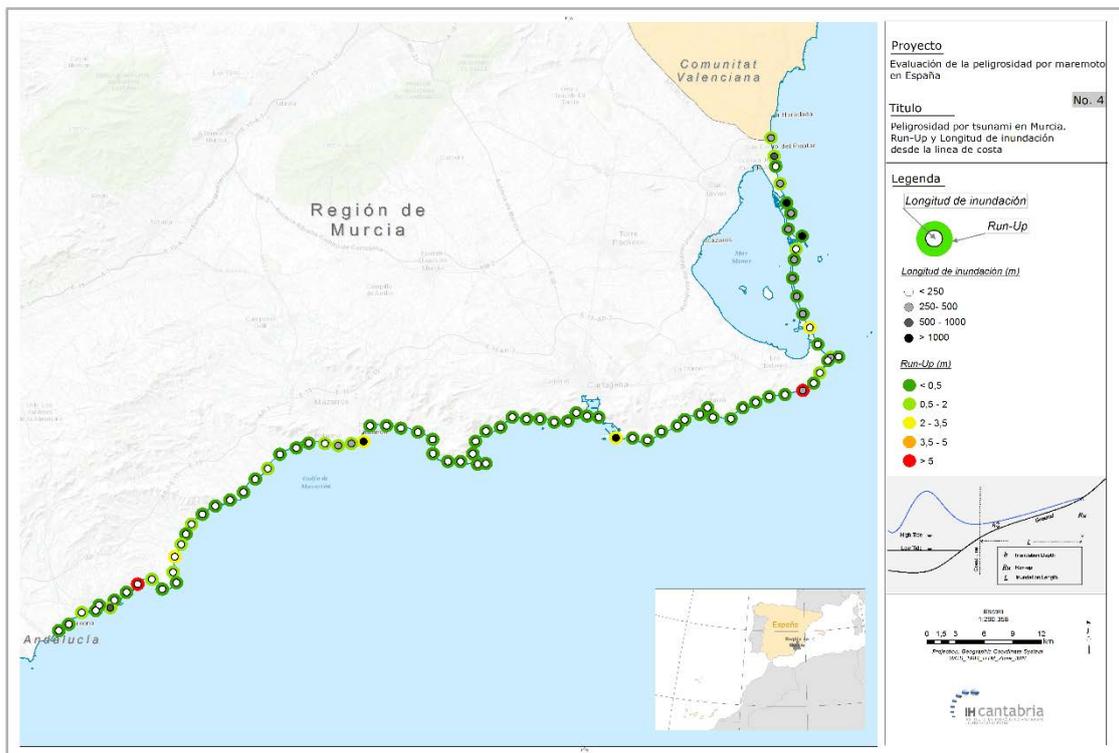
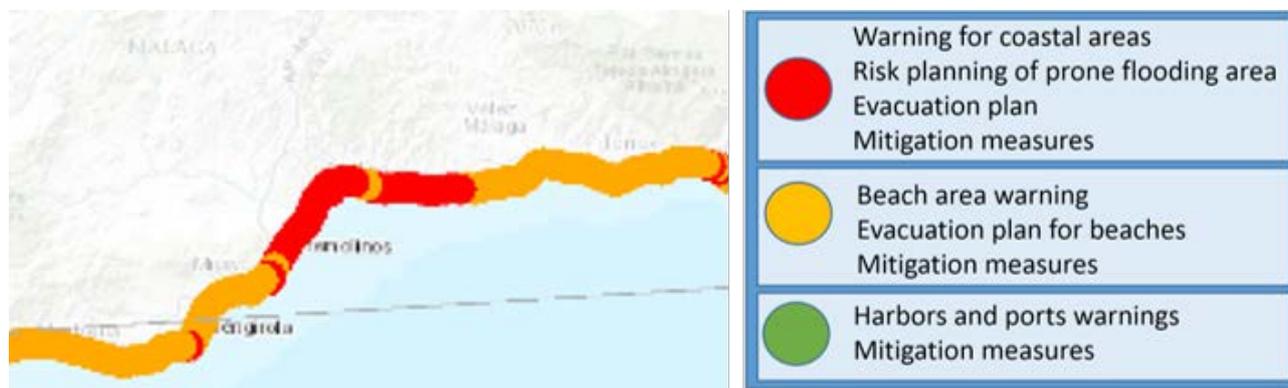


Figura 3 Mapa de peligrosidad por maremoto en la Región de Murcia

Los mapas por comunidades que recogen las variables de run-up e inundación, resultado de la aplicación de la metodología presentada, son utilizados para elaborar mapas tipo “semáforo” que contiene la zonificación que la propia directriz exige proporcionar en este segundo nivel de planeamiento. Cada color del “semáforo” indica un nivel de

actuación diferente. Así, un nivel rojo indicaría la necesidad para la zona en cuestión de abordar un estudio de riesgo de detalle, planes de evacuación completos, medidas de mitigación etc. Un nivel amarillo indicaría que la zona con peligrosidad se limita a los primeros metros de costa y playas y el nivel verde indicaría que la alerta únicamente sería pertinente para puertos y zonas de mar cercanas a la costa, para las que habría que elaborar las medidas de mitigación del riesgo pertinentes.



#### 4. Conclusiones

Los tsunamis son fenómenos globales, que afectan de manera simultánea a varios países, varias comunidades y varias localidades. Por ello es importante establecer una metodología común que pueda ser seguida por todos los niveles para poder obtener unos resultados con cierta continuidad. La metodología que aquí se ha presentado pretende proporcionar un marco de trabajo común que evite la creación de mapas de peligrosidad diferentes en cada zona de estudio de manera que la difusión y la proyección de los mismos se vean facilitadas.

Como ha quedado probado a través del análisis de los eventos históricos que nos han afectado, la peligrosidad por tsunami en la costa de España existe y varía en función de la zona de estudio. La costa Atlántica Andaluza es la zona de mayor peligrosidad mientras que en el mar Mediterráneo, los tsunamis son más frecuentes pero de menor importancia, y su origen principal es la zona de subducción en la costa de Argelia. Finalmente, en la costa Norte, la peligrosidad es más baja debido a que las ondas de tsunami que la alcanzan desde el sur llegan debilitadas por sus transformaciones en la propagación a lo largo de la costa de la península ibérica.

Esta peligrosidad justificó la elaboración de la directriz Básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos, la cual establece 3 niveles de planificación: Nacional, Autonómico y local. La evaluación de la peligrosidad a nivel Nacional ha establecido que todas las CCAA excepto Cantabria y País vasco deben proceder al segundo nivel. Los resultados de este estudio no son aplicables a la escala autonómica ya que no contienen datos de inundación en tierra y la resolución utilizada no es suficiente para un estudio de más detalle.

En este trabajo se ha abordado la metodología a aplicar para la obtención de los mapas de peligrosidad a escala autonómica. Esta metodología, utilizada y validada internacionalmente permite, abordar con garantías el siguiente escalón de la aplicación de la directriz Básica.

Estos mapas, tomando como ejemplo el aquí presentado, permiten a las CCAA identificar qué localidades o municipios deben alcanzar un grado mayor de planificación en caso de tsunamis, incluyendo el tercer nivel dispuesto en la directriz. En ese nivel, el local, se incluirían el estudio de alta resolución de la zona, el cálculo de la vulnerabilidad y el riesgo, el establecimiento de medidas de mitigación del mismo, la elaboración de planes de evacuación, estudios de afección a puertos, etc.

## 5. Referencias

- J.A. Álvarez-Gómez, Í. Aniel-Quiroga, M. González, L. Otero, Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2011) 227–240.
- J.A. Álvarez-Gómez, Í. Aniel-Quiroga, O.Q. Gutiérrez-Gutiérrez, J. Larreynaga, M. González, M. Castro, F. Gavidia, I. Aguirre-Ayerbe, P. González-Riancho, E. Carreño, Tsunami hazard assessment in El Salvador, Central America, from seismic sources through flooding numerical models., *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13 (2013) 2927–2939. doi:10.5194/nhess-13-2927-2013.
- Í. Aniel-Quiroga, J.A. Alvarez-Gómez, M. González, I. Aguirre-Ayerbe, F. Fernández, M.S. Jara, P. González-Riancho, R. Medina, S. Al-Yahyai, Tsunami Hazard assessment and scenarios database development for the tsunami warning system for the coast of Oman, in: *Int. Conf. Reducing Tsunami Risk West. Indian Ocean*, Muscat, Omán, 2015.
- J.L. Lara, N. Garcia, I.J. Losada, RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, *Coast. Eng.* 53 (2006) 395–417. doi:10.1016/j.coastaleng.2005.11.003.
- M. Olabarrieta, R. Medina, M. Gonzalez, L. Otero, C3: A finite volume-finite difference hybrid model for tsunami propagation and runup, *Comput. Geosci.* 37 (2011) 1003–1014. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.09.016.
- P. Weatherall, K.M. Marks, M. Jakobsson, T. Schmitt, S. Tani, J.E. Arndt, M. Rovere, D. Chayes, V. Ferrini, R. Wigley, A new digital bathymetric model of the world's oceans, *Earth Sp. Sci.* 2 (2015) 331–345. doi:10.1002/2015EA000107.