

## **BORRADOR PLAN DE EMERGENCIA ANTE EL RIESGO DE MAREMOTOS EN ANDALUCÍA.**



## **ÍNDICE**

1. OBJETO Y ÁMBITO.....	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. OBJETO.....	4
1.3. ÁMBITO.....	5
2. MARCO LEGAL Y COMPETENCIAL.....	5
3. ANÁLISIS DEL RIESGO.....	7
3.1. ELABORACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO DE MAREMOTOS EN ANDALUCÍA.....	7
3.2. CLASIFICACIÓN DE ÁREAS SEGÚN PELIGROSIDAD.....	8
3.3. RESILIENCIA DEL SISTEMA.....	9
4. ESTRUCTURA, ORGANIZACIÓN Y FUNCIONES.....	9
4.1. ESTRUCTURA.....	9
4.1.1. COMISIÓN TÉCNICA SOBRE RIESGO DE MAREMOTO.....	9
4.1.2. GRUPO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS.....	10
5. OPERATIVIDAD DEL PLAN.....	11
6. MEDIDAS DE ACTUACIÓN.....	12
7. PLANES DE ACTUACIÓN EN EL ÁMBITO LOCAL.....	12
8. CATÁLOGOS DE MEDIOS Y RECURSOS.....	14
9. IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	14
10. ANEXOS.....	14



## **1. OBJETO Y ÁMBITO**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El maremoto se define como una serie de olas de gravedad de muy larga longitud de onda, generada por una violenta e impulsiva perturbación en el mar, que puede ser provocado por terremotos de epicentro marino con movimientos verticales de falla, deslizamientos o caída de material en el mar, explosiones volcánicas o incluso alteraciones generadas por el hombre; entre dos crestas sucesivas puede transcurrir entre varios minutos y una hora, debido a la extraordinaria velocidad con que se propagan las olas de un maremoto y la enorme distancia a la que pueden penetrar en tierra firme cuando llegan a las costas. Este fenómeno se convierte en un riesgo a considerar minuciosamente en aquellas zonas con mayor probabilidad de verse afectadas, de forma que se pueda realizar una planificación dirigida a minimizar los posibles daños a las personas, bienes y medio ambiente, que permita restablecer los servicios básicos para la población en el menor tiempo posible.

El Tsunami se define como la ola o grupo de olas que llegan a la costa como consecuencia de un maremoto y que pueden producir daños a personas o bienes.

Andalucía se encuentra localizada entre dos zonas tsunamigénicas muy diferenciadas, el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, ambas con tsunamis producidos a consecuencia de maremotos, tal y como sucedió con el llamado terremoto de Lisboa de 1755, responsable de un gran tsunami que arrasó las costas atlánticas peninsulares y que produjo olas de hasta 15 metros y más de 2.000 muertes en nuestro país en la zona Atlántica, o el último maremoto de 2003, con olas de un metro en el archipiélago Balear, que ocasionó importantes daños en los puertos en la zona mediterránea.

Debido a dicha experiencia histórica y dado que el riesgo presente en nuestras costas es muy superior al existente cuando ocurrió el terremoto de Lisboa, debido al actual desarrollo industrial y turístico, si se repitiese este fenómeno podría tener un elevado coste en pérdidas humanas y económicas. Es por ello que se ha considerado necesario incluir el riesgo de maremotos como un riesgo más de los que han de ser objeto de planificación de acuerdo con los procedimientos utilizados en el ámbito de la protección civil. La Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos aprobada por Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre, establece los requisitos mínimos que deben cumplir los correspondientes planes en cuanto a fundamentos, estructura, organización y criterios operativos y de respuesta, con la finalidad de prever un diseño o modelo nacional mínimo que haga posible, en su caso, una coordinación y actuación conjunta de los distintos servicios y administraciones implicadas, ante una emergencia por maremoto que afectara a las costas españolas. Así se prevé una estructura general de la planificación de protección civil integrada por el Plan Estatal, los Planes de las Comunidades Autónomas y, dentro de estos últimos, los Planes de Actuación de Ámbito Local.



Por su parte, la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil, prevé en su artículo 15.3 el desarrollo de planes especiales frente al riesgo de maremotos y, el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos, aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros, de 18 de mayo de 2021 establece un sistema de alerta ante maremotos, con la finalidad de avisar acerca de la inminencia de dicha amenaza a las autoridades de protección civil y a los servicios públicos de emergencia, así como a los ciudadanos que puedan verse afectados, con atención especial a las personas más vulnerables, de tal manera que por dichas autoridades pueda disponerse lo necesario para asegurar una rápida respuesta y por parte de la población puedan adoptarse las medidas de autoprotección que en cada caso resulten adecuadas.

Es primordial el establecimiento de un sistema de alerta temprana que permita la inmediata puesta en marcha del Plan de Emergencia y la adopción de las medidas de actuación oportunas para la protección de la población. Este tiempo de reacción es muy importante, tanto en la costa Atlántica, como en la costa Mediterránea.

## **1.2. OBJETO**

El objeto fundamental del Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía es el establecimiento de la estructura organizativa y de los procedimientos de actuación, para una adecuada respuesta ante situaciones de emergencia provocadas con ocasión de un tsunami, que afecte a las costas de la Comunidad Autónoma, asegurando una mayor eficacia y coordinación en la intervención de los medios y recursos disponibles, así como establecer los mecanismos para informar a la población en caso de alerta por tsunami.

En todas aquellas situaciones en las que se pueda ocasionar un tsunami resulta necesario disponer de la aplicación de un Plan de Emergencia que posibilite una respuesta integral y coordinada. Tanto por la complejidad de las operaciones a desarrollar como por la importancia del factor tiempo en las medidas a adoptar, es preciso asegurar una respuesta organizada que integre los medios de la Comunidad Autónoma de Andalucía y aquellos otros asignados por otras Administraciones Públicas o por otras entidades públicas o privadas.

En este sentido, el Plan aborda los siguientes objetivos generales:

- a) Clasificar las áreas de costa de Andalucía en función de la peligrosidad de maremotos.
- b) Concretar la estructura organizativa y funcional para la intervención en emergencias por tsunamis que tengan lugar dentro de la costa andaluza.
- c) Prever los mecanismos y procedimientos de coordinación con el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos, para garantizar su adecuada integración.



- d) Establecer directrices para la elaboración de planes de actuación de ámbito, así como las relativas a las características de los centros municipales de recepción de alertas ante maremotos y a los sistemas de alerta a la población.
- e) Catalogar los medios y recursos específicos a disposición de las actuaciones previstas.
- f) Organizar los medios y procedimientos que permitan oportunamente la recepción de los avisos de maremoto y su difusión entre las autoridades de la administración de la Comunidad Autónoma y de los entes locales afectados.
- g) Colaborar con las autoridades locales en la previsión de la organización y los medios necesarios para alertar a la población potencialmente afectada. En esta función prestarán su colaboración los medios de comunicación social, en caso de ser requeridos por el órgano competente de la Comunidad Autónoma que en cada caso corresponda.
- h) Organizar los programas de información a la población, que permita, mediante el conocimiento del fenómeno, adoptar las medidas de autoprotección en tanto reciben la ayuda de los medios operativos.

En el desarrollo de todas sus funciones básicas, el Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía deberá tener en cuenta las distintas necesidades de las personas con discapacidad y otros colectivos en situación de vulnerabilidad, estableciendo los protocolos de actuación específicos para garantizar su asistencia y seguridad.

### **1.3. ÁMBITO**

El ámbito territorial de aplicación del presente Plan se extiende a todo el litoral de la Comunidad Autónoma de Andalucía, destacando especialmente aquellas zonas de mayor riesgo previsible.

## **2. MARCO LEGAL Y COMPETENCIAL**

Constituye el marco normativo básico:

- Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil.
- Acuerdo del Consejo de Ministros, de 07 de abril de 1995 por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo sísmico.
- Acuerdo del Consejo de Gobierno, de 22 de noviembre de 2011, por el que se ordena la publicación, se otorga el carácter de Plan Director y se determina la entrada en vigor del Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd).



- Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la nueva Norma de construcción sismorresistente, NCSE-02.
- Ley 2/2002, de 11 de noviembre, de Gestión de Emergencias en Andalucía.
- Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos.
- Plan Estatal General de Emergencias de Protección Civil (PLEGEM), aprobado por acuerdo del consejo de Ministros de 15 de diciembre de 2020.
- Acuerdo del Consejo de Ministros, de 18 de mayo de 2021, por el que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos.

El presente Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía se elabora como plan especial de emergencia, al amparo de lo establecido en el artículo 13.2 de la ley 2/2002 de gestión de emergencias de Andalucía.

En consecuencia:

- La elaboración del Plan es tarea asignada a la Consejería competente en materia de protección civil.
- La aprobación del Plan corresponde al Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía, previo informe de la Comisión de Protección Civil de Andalucía y el Consejo Nacional de Protección Civil.
- Los Planes de Actuación Local (PAL) deben integrarse en el Plan, correspondiendo su elaboración y aprobación a los órganos competentes de la Entidad Local correspondiente y siendo preceptiva su homologación por la Comisión de Protección Civil de Andalucía.

#### **Correlación entre la directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos y el plan:**

- OBJETO: queda recogido en el apartado 1 “OBJETO Y ÁMBITO”
- ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN FUNCIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE MAREMOTOS: queda recogido en ANEXO 3. “ANÁLISIS DE RIESGO”.
- ESTRUCTURA Y ORGANIZACIÓN: queda recogida en el apartado 4. “ESTRUCTURA, ORGANIZACIÓN Y FUNCIONES”.
- OPERATIVIDAD: queda recogida en el apartado 5 “OPERATIVIDAD DEL PLAN”.
- MANTENIMIENTO DEL PLAN: queda recogido en el apartado 9 “IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO”.



### **3. ANÁLISIS DEL RIESGO**

#### **3.1. ELABORACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO DE MAREMOTOS EN ANDALUCÍA**

Andalucía presenta uno de los índices de peligrosidad por maremotos más elevados de España, si bien cabe destacar que estos valores difieren sustancialmente en la costa atlántica y en la mediterránea. Las características y posición de las fuentes tsunamigénicas hacen que la peligrosidad por maremotos no sea uniforme en toda la costa. Actualmente, es el Golfo de Cádiz la zona con una peligrosidad por maremotos más alta.

El análisis de riesgos elaborado para el presente plan aborda la peligrosidad por maremotos en las costas andaluzas desde una perspectiva determinista, considerando como escenario el peor caso para cada una de las diferentes fuentes consideradas. En este sentido, no se realiza ningún cálculo de la peligrosidad en términos de probabilidad (PTHA-Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), debido en gran medida al estado experimental de este tipo de análisis. Las fuentes tsunamigénicas consideradas en el estudio son todas de origen sísmico.

Este análisis se basa en la caracterización de las fuentes sísmicas y en la posterior simulación hidrodinámica del comportamiento del tsunami mediante modelos numéricos que representan actualmente “el estado del arte” en esta materia.

La metodología empleada para la evaluación de la peligrosidad por maremotos conllevó, en una primera fase, la caracterización de las fuentes sísmicas (parámetros de las fallas) valoradas como potencialmente generadoras de un tsunami. En el caso de la zona atlántica se tomó como escenario de partida la fuente generadora del terremoto y tsunami de Lisboa de 1755. Este evento es, hasta la fecha, el maremoto más catastrófico acontecido en las costas andaluzas, y se corresponde, por lo tanto, con el escenario más desfavorable.

En el caso de la zona mediterránea se realizaron 48 simulaciones numéricas considerando la fase de propagación de las olas del maremoto. La altura máxima de ola simulada para todos estos escenarios ha servido para seleccionar aquellos con mayor impacto en un sector particular de la franja costera en estudio.

Como resultado del análisis de estas simulaciones precalculadas se seleccionaron 4 fuentes, aquellas que pueden llegar a tener un impacto mayor en la zona de estudio, y se realizó la envolvente de las condiciones más desfavorables en cada caso. De esta forma se dispone del escenario más desfavorable, teniendo en cuenta el mecanismo tsunamigénico de cada una de ellas.

En la siguiente fase, teniendo en cuenta los parámetros de falla definidos anteriormente, se han realizado las simulaciones numéricas en base a una condición inicial de partida, donde se produce la deformación del fondo marino y la consiguiente perturbación de la masa de agua. Esto, conocido como fase de



generación, da lugar a la fase de propagación de la ola en superficie, donde la masa de agua interactúa con la batimetría y la topografía costera. En esta fase se obtienen las variables de altura de ola, tiempos de llegada y amplitudes de ola máximas.

En la última fase de inundación se obtienen las variables propias de la intrusión de la masa de agua tierra adentro, como son el run-up (altura topográfica), calado máximo, velocidad máxima, flujo máximo y flujo momento máximo.

Las magnitudes de estas variables obtenidas de las simulaciones numéricas, tales como calado o tiempos de llegada, conforman la base sobre la que se desarrollan el resto de análisis llevado a cabo en este estudio y que incluye la cartografía de vulnerabilidad / riesgo edificatorio.

Esta cartografía se complementará con mapas adicionales de peligrosidad por calado, peligrosidad por arrastre de personas, peligrosidad por la combinación de tiempos de llegada/calado y peligrosidad por flujo momento.

Para el cálculo de la vulnerabilidad/riesgo edificatorio se ha empleado el modelo PTVA-3 (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment), una metodología desarrollada tras el tsunami de Sumatra-Andamán de 2004 en el Océano Índico. Esta metodología tiene presente los atributos constructivos de cada edificio y el calado de la zona inundada por el tsunami. El modelo está ampliamente contrastado e implementado como método de evaluación del impacto de un tsunami en las estructuras edificatorias situadas en zonas costeras. Como resultado, se ha obtenido un Índice Relativo de Vulnerabilidad (RVI-Relative Vulnerability Index) por cada edificio inundado de la costa, y que lo clasifica según su vulnerabilidad.

Cabe destacar que el PTVA-3, es un modelo de cálculo de vulnerabilidad, introduce elementos de peligrosidad que acercan de manera considerable el resultado a un índice de riesgo.

Dado que el análisis de riesgo está conformado por una serie de elementos que pueden resultar variables en función del momento y otras circunstancias científico técnicas en que se produzca, este se ira actualizando en función de la disponibilidad de nuevos datos, estudios y avances tecnológicos aplicables a esta materia.

La metodología empleada en este análisis del riesgo se describe en detalle en el Anexo 3.

### **3.2. CLASIFICACIÓN DE ÁREAS SEGÚN PELIGROSIDAD**

Este apartado se desarrollará en el Anexo 3, Análisis del riesgo, de manera más pormenorizada y teniendo en cuenta los valores de las simulaciones y escenarios contemplados en el citado análisis de riesgos.



### **3.3. RESILIENCIA DEL SISTEMA**

Para la minimización de los efectos de un tsunami (víctimas), es muy importante que la población conozca dicho riesgo, que sepa tomar las medidas de autoprotección necesarias para ello y que el sistema de alerta por maremotos sea efectivo.

Dentro del periodo de implantación del Plan se programará formación e información a la población sobre las medidas que deben tomar una vez se produzca el aviso ante maremotos, y para ello se establecerán las rutas de evacuación hacia puntos de encuentro y la señalización de las mismas en los Planes de Actuación Local ante dicho riesgo.

Del mismo modo, se fomentarán programas de formación específica en los centros educativos que puedan verse afectados por dicho riesgo. Así como se informará en todos los espacios públicos y privados sobre dicho riesgo.

Por otro lado, se establecerá y comprobará periódicamente el sistema de alerta por maremotos.

## **4. ESTRUCTURA, ORGANIZACIÓN Y FUNCIONES**

### **4.1. ESTRUCTURA**

El Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía aplica la estructura dispuesta en el Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd) en vigor, incluyendo en la misma los siguientes grupos:

#### **4.1.1. COMISIÓN TÉCNICA SOBRE RIESGO DE MAREMOTO**

La Comisión Técnica sobre Riesgo de Maremoto tiene como misión principal prestar asesoramiento a la Dirección del Plan sobre las posibles consecuencias de los tsunamis en bienes y personas.

Integrantes:

La Dirección del Plan regional designará a personas expertas en riesgo de maremoto, sísmico, geotécnica y cálculo estructural, entre otros, de los siguientes organismos:

- Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos (IAGPDS).
- Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Universidades de Andalucía.
- Organismo Público Puertos del Estado.
- Organismos de la Administración y empresas que estudian el riesgo y sus efectos.



A esta Comisión Técnica se podrán incorporar cuanto personal experto que la Dirección del Plan estime oportuno, según las características de la emergencia.

Funciones:

- Determinar las características del fenómeno de maremoto.
- Interpretar los datos y valorar la posible evolución de la situación.
- Hacer el seguimiento técnico del suceso, de su evolución y de las medidas aplicadas.

La Comisión Técnica sobre Riesgo de Maremoto podrá actuar desde el primer nivel de activación del Plan de Emergencia ante el Riesgo de maremoto en Andalucía, recopilando y analizando toda la información disponible. A tales efectos, dependerá de la Dirección del Plan.

#### **4.1.2. GRUPO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS**

Este grupo operativo tiene como misión principal asegurar que se establezcan las medidas necesarias para eliminar o reducir los daños previsibles derivados del grado de afectación de los edificios tras el tsunami, así como identificar y evaluar, dentro de lo posible, los daños que pueden producirse en los servicios básicos de la población.

En la medida que la situación lo requiera, este Grupo Técnico podrá subdividirse en diferentes grupos coordinados para identificar y evaluar daños en instalaciones críticas, inmuebles y vías de comunicación.

Integrantes:

Personal técnico especialista en la materia adscrito a los siguientes órganos, entidades o empresas:

- Consejería con competencias en Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda.
- Entidades locales.
- Colegio de Arquitectos.
- Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.
- Colegios de Ingenieros.
- Servicios de Prevención y Extinción de Incendios.
- Diputación Provincial afectada.
- Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos.

Funciones:

- Reconocimiento y evaluación de daños en las zonas afectadas.



- Evaluación y seguimiento, en el lugar de la emergencia, de la seguridad de las infraestructuras críticas y esenciales e inmuebles de los servicios imprescindibles para la población, conjuntamente con el grupo logístico. En particular:

Delimitación geográfica preliminar de las áreas afectadas en función de la gravedad de los daños.

Inspección y clasificación de los inmuebles, en función de su estado y peligrosidad, identificando aquellos que pudieran constituir una amenaza para la población.

Inspección y valoración del estado y operatividad de los servicios esenciales y de las vías públicas e infraestructura de transportes.

Primera estimación de los posibles daños en edificios e infraestructuras.

- Planificación de la organización, coordinación y ejecución de la evaluación de daños a edificios, servicios esenciales y red viaria y de transportes, contemplando las fases de evaluación rápida y detallada y la sistematización y envío de las valoraciones.

- Propuesta de medidas de carácter preventivo o corrector para controlar o paliar los efectos de los sismos, así como para la rehabilitación de los servicios esenciales y de las infraestructuras viarias y de transportes.

- Definición de los equipos especiales de trabajo y equipamientos necesarios para la aplicación de tales medidas.

- Valoración general de los daños en viviendas, y otros equipamientos esenciales, estado de las infraestructuras, vías de comunicación, redes eléctricas y telefónicas.

## **5. OPERATIVIDAD DEL PLAN**

El Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía aplica lo dispuesto en el Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd).

La fase de preemergencia incluye, además de las definidas en el PTEAnd, unas primeras actuaciones de alerta, desde la notificación por parte del IGN (Instituto Geográfico Nacional) de la detección de un fenómeno susceptible de generar un maremoto y del área de costa potencialmente afectada. En ella han de realizarse todas las actividades conducentes a poner en conocimiento acerca del riesgo existente a las autoridades y a la población residente en dichas áreas, todo ello en el menor tiempo posible al objeto de que la población y los servicios públicos de emergencia puedan adoptar las medidas de protección necesarias. En esta fase se dará respuesta mediante:

- Aviso a las autoridades responsables de la protección civil.

- Alerta a la población potencialmente afectada para su evacuación a lugares seguros.



## **6. MEDIDAS DE ACTUACIÓN**

El Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía aplica lo dispuesto en el Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd).

A las medidas de actuación ya dispuestas en el PTEAnd hay que añadir el sistema de alerta por maremotos.

El Sistema Nacional de Alerta por Maremotos estará constituido por los medios, la organización y los procedimientos necesarios para establecer un sistema único y coordinado para todos los ámbitos del Sistema Nacional de Protección Civil, que permita detectar precozmente la generación de maremotos que puedan afectar a las costas españolas (su localización, el momento de ocurrencia, sus probables consecuencias, etc.) y transmitir, en el tiempo más corto posible, la información a las autoridades competentes en materia de protección civil de los ámbitos territoriales potencialmente afectados. Todo ello de manera que permita adoptar las medidas de prevención y de protección de personas y bienes que en cada caso resulten necesarias, y alertar a los ciudadanos residentes en las áreas de riesgo, al objeto de que, en caso necesario, puedan ejecutar las medidas de autoprotección previamente establecidas, así como a todos los organismos tanto públicos como privados que, situados en nuestras costas, puedan estar afectados por este riesgo.

En el Anexo 2 se especifica cómo se va realizar dicha comunicación a los responsables municipales y se establecerán los mecanismos para que dicha información sea recibida por los ciudadanos.

## **7. PLANES DE ACTUACIÓN EN EL ÁMBITO LOCAL**

El objeto básico del plan de actuación de ámbito local ante el Riesgo de Maremotos (en adelante, PAL) persigue que las entidades locales ubicadas en zonas de riesgo establezcan un dispositivo permanente y actualizado de información, previsión, alerta y actuación ante tsunamis con capacidad para proteger a la población amenazada y, en lo posible, evitar o al menos reducir los daños que puedan producir a los bienes y servicios esenciales. Este dispositivo estará plenamente integrado en la organización general del Plan de Emergencia ante el Riesgo de Maremotos en Andalucía.

La aprobación del PAL ante el Riesgo de Maremotos corresponde al órgano competente de la entidad local, debiendo ser sometido a homologación por la Comisión de Protección Civil de Andalucía, determinándose su adaptación a los contenidos mínimos previstos en el presente documento y demás disposiciones de aplicación, así como la integración en el sistema de respuesta articulado por el mismo. En su caso, también deberá integrarse en el Plan de Emergencia Municipal.

**Directrices para elaboración de planes de actuación de ámbito local.**



Las características que reviste una emergencia por maremoto (escaso tiempo para la alerta, necesidad de evacuación inmediata, etc.) hacen que sea decisivo articular desde el primer momento la respuesta de protección civil en el ámbito local, el más próximo al ciudadano.

Habrán de tenerse en cuenta las consideraciones siguientes:

- Los planes de actuación de ámbito local ante el riesgo de maremotos deben ser un instrumento de la autoridad local que facilite dar una respuesta de proximidad a la situación de emergencia que pueda producirse por la ocurrencia de dicho fenómeno en el ámbito territorial de la entidad local de que se trate.
- Estos planes tienen como finalidad fundamental facilitar la autoprotección ciudadana mediante la alerta temprana y prestar apoyo y auxilio inmediato a la población afectada.
- En estos planes habrá de detallarse con claridad y precisión el sistema de alerta a la población y el plan o los planes de evacuación, según áreas geográficas (con apoyo de la cartografía necesaria), grupos de personas a evacuar según su estado y capacidades, tipos de evacuación a realizar (horizontal y vertical).
- Los planes deben ser a la vez un buen instrumento de información a la población acerca de las medidas de autoprotección a poner en práctica, en particular en cuanto se refiere a los procedimientos de alerta y de evacuación.
- Todas sus fases deben tener en cuenta las distintas necesidades de las personas con discapacidad, estableciendo protocolos de actuación específicos para garantizar su asistencia y seguridad.

#### **Contenidos mínimos de los PAL.**

- El análisis de los riesgos por maremoto en el ámbito territorial del municipio, con la cartografía correspondiente.
- Los medios para la difusión de alertas.
- Las disposiciones adoptadas para recibir los avisos de alerta por parte de los órganos responsables del plan y para su difusión a la población.
- Las previsiones acerca de los mensajes a transmitir a la población para facilitar la autoprotección y, en su caso, la evacuación, en caso de emergencia.
- Transferencia entre niveles de planificación.
- El plan de evacuación, itinerarios y zonas de refugio y acogida de población evacuada.
- Los medios humanos y materiales a activar en caso de emergencia.



- Organización prevista para la gestión de la emergencia y las actuaciones en la fase de normalización.
- El programa de información previa a la población.
- El programa de ejercicios y simulacros.

Los planes de actuación de ámbito local se aprobarán por los órganos competentes de las respectivas corporaciones y serán homologados por la Comisión de Protección Civil de Andalucía.

En el ANEXO 1 queda recogido la estructura y el índice que debe contener todo plan de actuación local ante el Riesgo de Maremotos.

## **8. CATÁLOGOS DE MEDIOS Y RECURSOS**

El Plan de Emergencia ante el riesgo de Maremotos en Andalucía aplica lo dispuesto en el Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd).

## **9. IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO**

El Plan de Emergencia ante el riesgo de Maremotos en Andalucía aplica lo dispuesto en el Plan Territorial de Emergencias de Andalucía (PTEAnd).

## **10. ANEXOS**

ANEXO 1. DIRECTRICES PARA LA PLANIFICACIÓN DE ÁMBITO LOCAL.

ANEXO 2. COMUNICACIONES. SISTEMA DE ALERTA POR MAREMOTOS.

ANEXO 3. ANÁLISIS DE RIESGOS.

ANEXO 4. RECOMENDACIONES A LA POBLACIÓN.

ANEXO 5. SEÑALIZACIÓN ANTE EL RIESGO DE MAREMOTOS.

ANEXO 6. WEB VISOR CARTOGRÁFICO.

ANEXO 7. GLOSARIO DE TÉRMINOS.



# **ANEXOS DEL PLAN DE EMERGENCIA ANTE EL RIESGO DE MAREMOTOS EN ANDALUCÍA**

## **ANEXO 1**

### **DIRECTRICES PARA LA ELABORACIÓN DE LOS PLANES DE EMERGENCIAS DE ACTUACIÓN DE ÁMBITO LOCAL ANTE EL RIESGO DE MAREMOTOS EN ANDALUCÍA.**



## MUNICIPIOS AFECTADOS

Los municipios que están obligados a elaborar un Plan de Actuación Local ante el riesgo de Maremotos en Andalucía son aquellos que tienen costa, ya que pueden verse afectados en mayor o menor medida por un Maremoto.

A continuación, se hace un listado por provincia de dichos municipios:

Municipio	Provincia
Adra	Almería
Almería	Almería
Balanegra	Almería
Carboneras	Almería
Cuevas del Almanzora	Almería
El Ejido	Almería
Enix	Almería
Garrucha	Almería
Mojácar	Almería
Níjar	Almería
Pulpí	Almería
Roquetas de Mar	Almería
Vera	Almería

Municipio	Provincia
Algeciras	Cádiz
Barbate	Cádiz
Cádiz	Cádiz
Chiclana de la Frontera	Cádiz
Chipiona	Cádiz
Conil de la Frontera	Cádiz
El Puerto de Santa María	Cádiz
La Línea de la Concepción	Cádiz
Los Barrios	Cádiz
Puerto Real	Cádiz
Rota	Cádiz
San Fernando	Cádiz
Sanlúcar de Barrameda	Cádiz
San Roque	Cádiz
Tarifa	Cádiz
Vejer de la Frontera	Cádiz



<b>Municipio</b>	<b>Provincia</b>
Albuñol	Granada
Almuñécar	Granada
Gualchos	Granada
Lújar	Granada
Motril	Granada
Polopos	Granada
Rubite	Granada
Salobreña	Granada
Sorvilán	Granada
Torrenueva Costa	Granada

<b>Municipio</b>	<b>Provincia</b>
Almonte	Huelva
Ayamonte	Huelva
Cartaya	Huelva
Huelva	Huelva
Isla Cristina	Huelva
Lepe	Huelva
Moguer	Huelva
Palos de la Frontera	Huelva
Punta Umbría	Huelva

<b>Municipio</b>	<b>Provincia</b>
Algarrobo	Málaga
Benalmádena	Málaga
Casares	Málaga
Estepona	Málaga
Fuengirola	Málaga
Málaga	Málaga
Manilva	Málaga
Marbella	Málaga
Mijas	Málaga
Nerja	Málaga
Rincón de la Victoria	Málaga
Torremolinos	Málaga
Torrox	Málaga
Vélez-Málaga	Málaga



## **PLAN DE ACTUACIÓN LOCAL**

Todo Plan de Actuación Local ante el riesgo de Maremotos (PALMA) atenderá a la siguiente estructura e índice.

### **1. OBJETOS.**

**1.1 Objeto y ámbito de aplicación.**

**1.2 Elaboración, aprobación y homologación.**

**1.3 Marco Legal.**

### **2. INFORMACIÓN TERRITORIAL.**

**2.1 Rasgos geográficos generales.**

**2.2 Rasgos geológicos.**

**2.3 Rasgos climáticos.**

**2.4 Rasgos hidrológicos.**

**2.5 Caracterización y usos del suelo.**

**2.6 Aspectos relevantes de la vegetación y de la fauna.**

**2.7 División política y administrativa.**

**2.8 Demografía.**

**2.9 Aspectos relevantes del sector industrial.**

**2.10 Vías de comunicación.**

**2.11 Patrimonio.**

### **3. ESTUDIO DE RIESGOS.**

#### **3.1 Identificación y análisis de riesgos.**

3.1.1 Identificación del riesgo

3.1.2 Análisis de riesgo

#### **3.2 Elementos vulnerables.**



## **4. ESTRUCTURA.**

### **4.1 Dirección del Plan.**

### **4.2 Comité Asesor y comisión técnica sobre riesgo de maremotos.**

### **4.3 Gabinete de información.**

### **4.4 Centro de coordinación operativa local (CECOPAL)**

### **4.5 Servicios Operativos:**

4.5.1 Servicio técnico de Edificación e infraestructuras

4.5.2 Servicio extinción de incendios y salvamento

4.5.3 Servicio de seguridad

4.5.4 Servicio sanitario

4.5.5 Servicio de apoyo logístico y social

## **5. OPERATIVIDAD.**

### **5.1 Caracterización de las fases de la operatividad.**

5.1.1 Preemergencia. Fase de Intensificación del seguimiento y la información

5.1.2 Emergencia

5.1.3 Normalización

### **5.2 Procedimientos de alerta/aviso**

5.2.1 Sistema nacional de alerta por maremotos (SINAM).

5.2.2 Procedimiento de alerta/aviso. Estructuras de mensajes.

5.2.3 Procedimiento de notificación, recepción y difusión sobre fenómenos susceptibles de generar maremotos.

### **5.3 Activación y desactivación del PAL Maremotos**

### **5.4 Notificación de la Situación.**

### **5.5 Procedimientos de activación según las fases de activación.**

### **5.6 Procedimientos en otros planes activados.**

### **5.7 Transferencia entre niveles de planificación.**

5.7.1 Transferencia entre el PAL Maremotos y el Plan de Emergencia ante Riesgo de Maremotos en Andalucía.

5.7.2 Transferencia entre el PAL Maremotos y el Plan de Emergencia Municipal.

5.7.3 Transferencia entre Planes de autoprotección y el PAL Maremotos.



## **6. MEDIDAS DE ACTUACIÓN.**

### **6.1 Planificación y acciones**

- 6.1.1 Áreas afectadas.
- 6.1.2 Vías de evacuación.
- 6.1.3 Puntos de encuentro
- 6.1.4 Puntos de evacuación vertical
- 6.1.5 Organización de los medios operativos

### **6.2 Avisos a la población.**

### **6.3 Grupos de población con mayor vulnerabilidad.**

### **6.4 Plan de evacuación**

## **7. IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO.**

### **7.1 Implantación.**

### **7.2 Mantenimiento.**

- 7.2.1 Actualización.
- 7.2.2 Revisión.

## **8. CATALOGACIÓN DE MEDIOS Y RECURSOS.**

### **8.1 Criterios de catalogación.**

### **8.2 Estructura de catalogación.**

### **8.3 Elaboración y actualización.**

### **8.4 Gestión y movilización.**

## **ANEXOS.**

### **I. Cartografía.**

### **II. Estructura organizativa**

### **III. Catálogo de medios y recursos.**

### **IV. Programas de Implantación y Mantenimiento.**

### **V. Elementos vulnerables.**

### **VI. Sistema de aviso a la población.**

### **VII. Medidas de protección y recomendaciones a la población.**



## **ANEXO 2**

### **COMUNICACIONES. SISTEMA DE ALERTA POR MAREMOTOS.**



## **ÍNDICE**

1. SISTEMA DE ALERTA POR MAREMOTOS.....	23
1.1 INTEGRACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL DE ALERTA POR MAREMOTOS (SINAM).....	23
1.2 COMUNICACIONES A LA COMUNIDAD AUTÓNOMA.....	24
1.3 COMUNICACIONES A LAS ENTIDADES Y ORGANISMOS LOCALES.....	24
1.4 AVISOS A LA POBLACIÓN.....	25



## **1. SISTEMA DE ALERTA POR MAREMOTOS**

### **1.1 INTEGRACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL DE ALERTA POR MAREMOTOS (SINAM)**

Un sistema de alerta temprana de maremotos requiere de la coordinación e integración de los sistemas de información y comunicación de las diferentes administraciones competentes en materia de protección civil, en sus distintas escalas territoriales, desde la internacional a la local. La complejidad del proceso de detección, caracterización y estimación del impacto de un maremoto, así como del aviso a las autoridades y a la población general, necesita del concurso de todas las administraciones implicadas.

El sistema de alerta por maremotos de Andalucía formará parte integral del Sistema Nacional de Alerta por Maremotos (SINAM) según se establece en la Resolución de 19 de mayo de 2021, por el que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de maremotos, así como en el Real Decreto 1053/2015 de 20 de noviembre por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de Protección Civil ante el riesgo de maremotos, donde se determina que el Plan de la Comunidad Autónoma establecerá las previsiones que hagan posible la constitución y funcionamiento del sistema.

El punto focal de transmisión de todos los avisos relacionados con un maremoto desde el SINAM es el CECEM-112 Andalucía.

El SINAM está integrado en la Red de Alerta Nacional (RAN). La RAN es el sistema de comunicación de avisos de emergencia a las autoridades competentes de protección civil, con la finalidad de que los servicios públicos esenciales y los ciudadanos estén informados ante cualquier amenaza de emergencia, está gestionada a través del Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación en Emergencias (CENEM), dependiente de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCyE).

El SINAM se compone de los siguientes sistemas de detección y aviso:

- La Red Sísmica Nacional, gestionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), encargada de la detección, caracterización y aviso de los seísmos que pueden ser potenciales generadores de un maremoto.
- La red de mareógrafos (REDMAR) del organismo Puertos del Estado, los sistemas de detección del Instituto Español de Oceanografía (IEO) y todos aquellos demás sistemas de detección marina que puedan llegar a ofrecer información que apoye la toma de decisiones o aporten información de observación directa de un maremoto.
- Los organismos e instituciones internacionales, recogidos en el Plan de Apoyo de Gestión de Información de Alertas Internacionales, junto con aquellos Centros Regionales de Aviso por Maremoto del Grupo Intergubernamental de Trabajo de la Comisión Oceanográfica



Intergubernamental (IOC/UNESCO) y del Sistema de Alerta de Maremotos del Atlántico Noreste, Mediterráneo y Mares Adyacentes (NEAMTWS).

La información emitida por estos centros de detección y aviso integrantes del SINAM, será canalizada y transmitida a través del CENEM, dependiente de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCyE), al CECM-112 Andalucía, dependiente de la Dirección General de Emergencias y Protección Civil (DGEPC), según lo establecido en el Anexo II “Protocolo de avisos sobre fenómenos susceptibles de generar maremotos” contemplado en el punto 2.2.1 del Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos.

### **1.2 COMUNICACIONES A LA COMUNIDAD AUTÓNOMA**

Las comunicaciones del SINAM a la Comunidad Autónoma se realizarán según el “Protocolo de avisos sobre fenómenos susceptibles de generar maremotos” contemplado en el punto 2.2.1 del Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos. Este protocolo tiene la finalidad de informar a las autoridades nacionales y autonómicas de protección civil de la potencial llegada de un maremoto de origen sísmico a las costas españolas.

Las comunicaciones del SINAM desde el CENEM serán enviadas al CECM-112 Andalucía mediante el formato de correo electrónico.

La tipología y contenido de los mensajes emitidos desde el SINAM al CECM-112 Andalucía, así como su ámbito territorial de aplicación, será conforme estipula el Anexo II “Protocolo de avisos sobre fenómenos susceptibles de generar maremotos” del Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos.

### **1.3 COMUNICACIONES A LAS ENTIDADES Y ORGANISMOS LOCALES**

Las comunicaciones del tipo aviso o alerta de maremoto recibidas desde el SINAM en el CECM-112 Andalucía que pudieran afectar a las costas andaluzas serán transmitidas a:

- Organismos regionales: cuencas hidrográficas afectadas, entidad pública Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), ENDESA y otras entidades que se consideren.

El CECM-112 Andalucía en el caso de alerta de maremoto activará:

- Telemáticamente a todos los centros integrados en el sistema de Emergencias 112 Andalucía de los municipios costeros o de cobertura provincial o regional.
- Telefónicamente y mediante correo electrónico al resto de operativos no integrados de los municipios costeros o de cobertura provincial.



El CECEM-112 Andalucía mantendrá actualizada la información a los organismos activados hasta la llegada del mensaje de cancelación del evento.

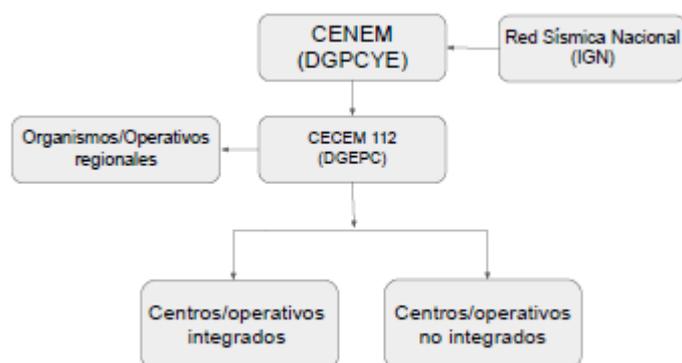


Fig. 1. Esquema de comunicaciones autonómico

#### **1.4 AVISOS A LA POBLACIÓN**

Las características propias del mecanismo generador de un maremoto, permiten, si la fuente tsunamigénica está lo suficientemente alejada de la costa, anticiparse a su llegada y emitir los correspondientes mensajes de alerta que permitan a la población tomar las adecuadas medidas de autoprotección.

Desde el CECEM-112 Andalucía, en caso de recepción de un mensaje del SINAM del tipo aviso o alerta por maremoto, se podrán cursar avisos a la población mediante:

- Sistemas basados en las redes de telefonía móvil que permitan su envío de forma directa a los ciudadanos que se encuentren en los ámbitos territoriales potencialmente afectados por un maremoto. En este sentido, podrá utilizarse para emitir estos avisos a la población el sistema Public Warning System (PWS) integrados y operados dentro de la Red de Alerta Nacional (RAN).
- La aplicación 112 Andalucía, que permitirá el envío a los usuarios que la tengan instalada en sus dispositivos móviles de mensajes de avisos de la posible llegada de un tsunami.
- Una locución predeterminada implantada para las provincias costeras potencialmente afectadas, informando de la situación.
- Aviso en las redes sociales del 112-Andalucía.

Asimismo, podrá solicitarse el concurso de los medios de comunicación social, en caso de ser requeridos por el órgano competente en materia de Protección Civil de la Junta de Andalucía, para colaborar en la difusión a la población de la información relativa a la alerta.



Todo ello se hará sin perjuicio de los avisos a la población que se puedan realizar desde los municipios y entidades locales en el ámbito de sus competencias, mediante canales alternativos como puedan ser sistemas de megafonía situados en las playas.

Todo ello se hará sin perjuicio de los avisos a la población que se puedan realizar desde los municipios y entidades locales en el ámbito de sus competencias, mediante canales alternativos como puedan ser sistemas de megafonía situados en las playas.



**ANEXO 3**  
**ANÁLISIS DE RIESGOS.**



## **ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN.....	29
2. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD.....	30
2.1. METODOLOGÍA.....	30
2.2. SELECCIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS.....	32
2.3. DATOS TOPO-BATIMÉTRICOS USADOS.....	42
2.4. MALLAS ANIDADAS.....	43
2.5. RESULTADOS.....	45
3. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD EDIFICATORIA.....	46
4. PELIGROSIDAD POR ARRASTRE DE PERSONAS.....	53
5. PELIGROSIDAD POR TIEMPOS DE LLEGADA-CALADO.....	55



## **1. INTRODUCCIÓN.**

El riesgo de maremotos supone un reto en cuanto a lo que a planificación de riesgos en el ámbito de la Protección Civil se refiere. Andalucía ostenta uno de los índices de peligrosidad por maremotos más altos de Europa, sobre todo en su costa atlántica, y más concretamente en la zona del Golfo de Cádiz.

En 2015 en España se aprueba mediante el Real Decreto 1053/2015 de 20 de noviembre la Directriz Básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos, que establece el marco legal donde deben encuadrarse todas los planes ante el riesgo de maremotos de ámbito estatal, regional y local, estableciendo los contenidos mínimos de los que deben disponer. Y recientemente, en mayo de 2021, el primer Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de maremotos de España (Resolución de 19 de mayo de 2021), que se establece como planificación de cabecera ante el riesgo de maremotos en nuestro país.

Para cumplir con las directrices marcadas por el Real Decreto 1053/2015 de 20 de noviembre es necesario y obligatorio el desarrollo de una planificación regional, de ámbito autonómico, que contemple el análisis de riesgo por maremotos de una manera más pormenorizada y precisa, reflejando en un análisis en profundidad las características reales del riesgo en dicha franja costera.

Dado que el análisis de riesgo está conformado por una serie de elementos que pueden resultar variables en función del momento y otras circunstancias científico técnicas en que se produzca, este se ira actualizando en función de la disponibilidad de nuevos datos, estudios y avances tecnológicos aplicables a esta materia.

Para llevar a cabo dicha planificación regional se adquirió el compromiso de realizar un análisis de riesgo lo más completo e integral posible, abordando los diferentes aspectos del riesgo, tales como la peligrosidad, vulnerabilidad o exposición. Para ello, y enfocada al análisis de la vulnerabilidad edificatoria, se llevó a cabo la activación del servicio EMS Copernicus, en la subcategoría Flex, dentro de la categoría Risk and Recovery Mappin, dando lugar a la activación EMSN078, durante julio de 2020, para la costa atlántica andaluza, más concretamente en el ámbito del Golfo de Cádiz. Es de resaltar que esta área es la zona con más riesgo de maremoto en España, a la vez que una de las más altas de Europa. Sin embargo, no debemos menospreciar el riesgo por maremotos existente en la costa mediterránea andaluza, que si bien es menor que en la vertiente atlántica, representa un peligro lo suficientemente importante para llevar a cabo su propio análisis de riesgo, todo ello dentro de la mencionada planificación regional. Esta otra activación del servicio EMS Copernicus, EMSN116, se realizó en el ámbito de la costa mediterránea andaluza y está enlazada con la activación EMSN078, como una continuidad del análisis en toda la costa de la Comunidad Autónoma de Andalucía.



El propósito de ambas activaciones dentro del marco de EMS Copernicus es el cálculo de la vulnerabilidad edificatoria en la franja costera andaluza, afectada en la fase de inundación del maremoto, y que se desarrolla más adelante.

## **2. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD**

El históricamente conocido, como el gran terremoto Lisboa del 1 de noviembre de 1755, con una magnitud momento estimada de 8.5 a 9.0, fue el mayor terremoto destructivo en la historia europea y el mayor desastre natural que ha sufrido el continente.

Por lo tanto, se puede adoptar para este caso el controvertido concepto del peor de los escenarios, que se aplicará al presente estudio (costa occidental andaluza) y estará representado por una fuente definiendo el mencionado evento catastrófico. En el presente estudio, se ha seleccionado la fuente entre tres candidatas para el tsunami de 1755. Se hacen dos suposiciones simplificadas para crear la deformación inicial superficial, que sirven como condiciones de contorno iniciales para las simulaciones numéricas. Primero, la superficie del mar responde instantáneamente a la deformación del terremoto del fondo marino. En segundo lugar, el desplazamiento de la superficie del mar es idéntico al del fondo marino.

Se han realizado varias simulaciones numéricas en el oeste de la Cuenca Mediterránea con el fin de evaluar el mayor impacto posible de tsunami a lo largo de la costa de Andalucía. Para ello, se han seleccionado cuatro fuentes sísmicas tsunamigénicas todas extraídas de base de datos QAFI v.4. Para tres de estas fuentes (ME012, ME014 y AR011), se ha considerado el enfoque estándar, utilizando los parámetros de falla proporcionados por la base de datos QAFI, y utilizando el Modelo de Okada (1985) para calcular la deformación del fondo marino. Para la cuarta fuente, la ME032 (Falla de Averroes) se ha considerado la deformación inicial propuesta en el trabajo reciente de Estrada et al. (2021).

El código numérico utilizado para el Tsunami-HySEA, es un código propio de la Universidad de Málaga (EDANYA Group), que representa el estado del arte y más allá en el modelado de tsunamis. El modelo Tsunami-HySEA resuelve numéricamente las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas. Ha sido evaluado siguiendo el NTHMP (National Tsunami Hazard and Mitigation Program) de EE. UU. (Macías et al, 2017, Macías et al, 2020a, b), y aprobado para estudios de evaluación de peligro de tsunami en los EE. UU.

### **2.1. METODOLOGÍA.**

El enfoque metodológico seguido para la estimación numérica de la evaluación del peligro de maremotos en el presente estudio se compone de cinco pasos:

1. Determinar la fuente o fuentes sísmicas que se utilizarán tanto en la vertiente atlántica como en la vertiente mediterránea. Las fuentes sísmicas consideradas corresponden al peligro o peligro potencial que



se van a simular y considerar en el estudio numérico. La selección de las fuentes sísmicas se hacen distinguiendo entre la costa atlántica y mediterránea como dos escenarios totalmente independientes.

Así, para el escenario de la zona atlántica, se han considerado originalmente tres escenarios y, después de una simulación numérica inicial realizada en dichos tres escenarios, el que se ha sopesado como el peor de los casos se mantiene para el resto del trabajo.

Sin embargo, en la zona mediterránea se han seleccionado las fuentes sísmicas con mayor impacto en un segmento particular de la costa en estudio. Se han tenido que realizar 48 simulaciones numéricas utilizando las fuentes QAFI en el Mediterráneo (todas ellas en el oeste Mediterráneo), simplemente considerando la fase de propagación de las olas del tsunami. La altura máxima de ola simulada para todos estos escenarios han servido para seleccionar aquellos con mayor impacto en un sector particular de la franja costera en estudio.

Como resultado del análisis de estas simulaciones precalculadas, se han seleccionado las 3 fuentes potencialmente más peligrosas. Además de esto, debido a los hallazgos muy recientes publicados el pasado agosto de 2021 por Estrada et al (2021) se ha decidido incluir también la fuente tsunamigénica propuesta por estos autores, la número 4 (ME032, falla Averroes).

2. Para los escenarios considerados se ha utilizado un modelo simplificado de deformación del fondo marino, el modelo estándar Okada (Okada, 1985). Dada la geometría del plano de ruptura y los parámetros de movimiento relativos para cada fuente sísmica, se debe evaluar una deformación cosísmica del fondo marino. La deformación del fondo marino es utilizada en la siguiente fase. Para el escenario generado por la falla de Averroes, la deformación del fondo marino considerada es del trabajo reciente de Estrada et al (2021).

3. Siempre que se indique una deformación del lecho marino, la perturbación inicial de la masa de agua se puede evaluar como una imagen instantánea de la deformación del fondo. Esto establece la condición inicial para el siguiente paso: la propagación de la ola en superficie (tsunami).

4. Posteriormente se calcula la propagación, por lo que la ruptura de la superficie del agua alcanza e interactúa con la batimetría y geometría costera.

5. Finalmente, se calcula la inundación tierra adentro y se obtienen las variables requeridas que describen el impacto costero (área inundada, run-up, calado, velocidad máxima de flujo y flujo momento máximo en todas las zonas).



## 2.2. SELECCIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS.

- **ATLÁNTICO**

En el presente estudio se han utilizado un total de tres fuentes sísmicas. Dos de ellas fueron seleccionadas siguiendo el asesoramiento experto de los investigadores del IPMA (Instituto Portugués del Mar y la Atmósfera). Estas fuentes también fueron concertadas con el IGN (Instituto Geográfico Nacional) español, responsable del Sistema Español de Alerta Temprana de Tsunami. La tercera fuente fue tomada de Barkan et al. (2008) como el más probable, para estos autores, de generar el evento tsunami de 1755 entre 16 registros sísmicos estudiados por ellos.

La primera fuente corresponde a una versión a escala de la falla Horseshoe para el evento de 1969 (Baptista et al, 2019), usando los parámetros de escala para el evento de 1755 en la fuente A1 en Baptista et al. (2011).

El conjunto completo de parámetros utilizados se recopilan en la Tabla 1. La deformación resultante del fondo marino y la perturbación inicial subsiguiente del agua de mar se muestra en la Figura 1.

Source N°	East Long	North Lat	Depth (km)	L (km)	W (km)	Strike	Dip	Rake	Slip	Mw
A1	10.45	36	8	85	20	221	47	44	5.29	7.7
Baptista et al. (2011)	-	-	-	165	70	42.1	35	90	15	8.4
Scaled A1	10.45	36	8	165	70	221	47	44	15	8.4

Tabla 1 Parámetros sísmicos escalados para el escenario 1

Las fuentes sísmicas de la Tabla 1 se describen como tales: 1) Fuente A1 en Baptista et al (2019) para el evento de 1969; 2) Fuente para el evento de 1755 propuesto en Baptista et al (2011); y 3) Versión escalada de la fuente A1 para un evento similar a 1755 propuesto por A.M. Baptista y R. Omira.

Aquí la profundidad proporcionada es hasta la parte superior de la falla. Como se utilizó la profundidad en el centroide de la falla, este valor debe ser reemplazado por:

$$\text{Depth\_Okada} = \text{depth\_top} + (W/2) * \sin(\text{dip} * \pi / 180) = 33.5974 \text{ km}$$

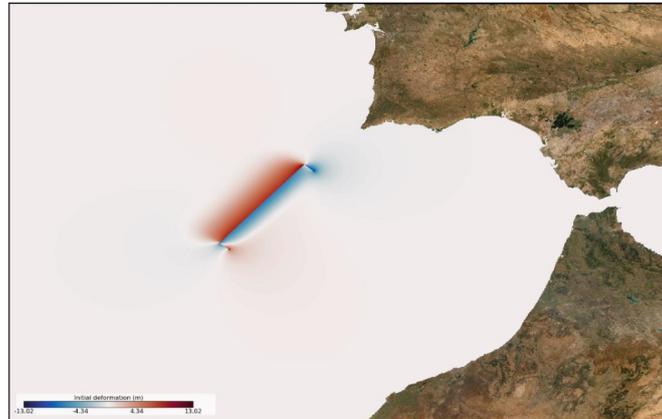


Figura 1 Perturbación inicial de la superficie del mar producida por la fuente escalada

La Figura 1 corresponde a la condición inicial del modelo numérico (Tabla 1). En rojo positivo (hacia arriba) valores, en valores negativos azules (hacia abajo).

La segunda fuente sísmica considerada como candidata es una combinación de la falla Horseshoe y la falla del Marqués de Pombal. Así, esta falla está compuesta por dos segmentos que son descritos por el Okada parámetros en la Tabla 2 la deformación resultante del fondo marino y la subsiguiente formación inicial del agua de mar, la perturbación se muestra en la Figura 2.

Segment fault	East Long	North Lat	Depth (km)	L (km)	W (km)	Strike	Dip	Rake	Slip	Mw
Marques de Pombal	10.25	36.64	5	120	80	20	35	90	12	
Horseshoe	10.32	35.92	5	170	100	42	35	90	14	8.8

Tabla 2 Parámetros escalados sísmicamente para el escenario considerado 2

Los parámetros para los dos segmentos de falla que describen la segunda fuente sísmica propuesta en la Tabla 2 son como sigue: 1) Marqués de Pombal y 2) Horseshoe. La profundidad es hasta la parte superior de la falla. Profundidad Okada = 27,9431 km para MdP y Depth\_Okada = 33,6788 km para HSF.

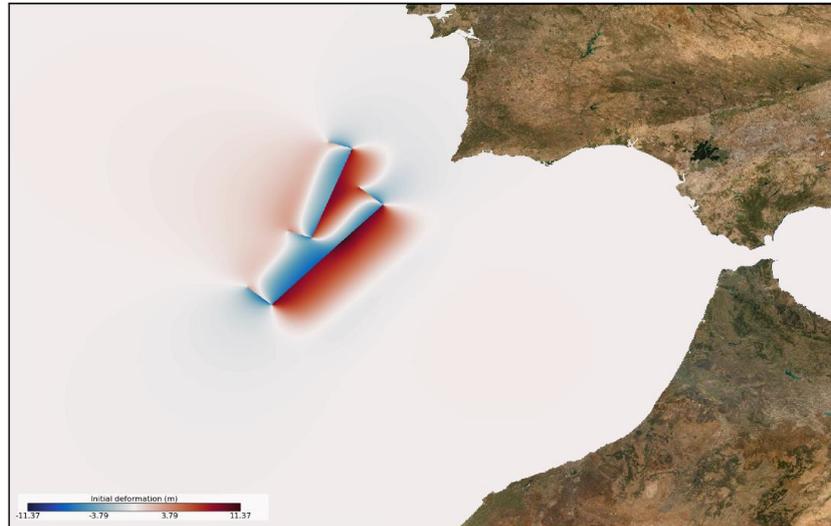


Figura 2 Perturbación inicial de la superficie del mar producida por la fuente escalada

La Figura 2 corresponde a la condición inicial del modelo numérico descrito en la Tabla 2. Valores positivos se representan en rojo (hacia arriba) y los valores negativos en azul (hacia abajo).

La tercera fuente se extrajo de Barkan et al (2008). Estos autores consideran que esta es la más probable entre las 16 fuentes sísmicas que han analizado, etiquetadas como fuente 8 en su estudio.

Longitudo	Latitude	Strike	Dip	Rake	Depth*	Length*	Width*	Slip (m)
-10.75°	36.04°	345.0°	40.0°	90.0°	5	200	80	12.9

Tabla 3 Parámetros escalados sísmicamente para el escenario considerado 3

La Tabla 3 representa los parámetros de Okada que definen la deformación inicial del fondo marino para la fuente 8 en Barkan et al. (2008). (\*) en km, deslizamiento en m. Profundidad\_Okada = 30,7115 km. Los resultados para esta fuente se muestran en la Figura 3.

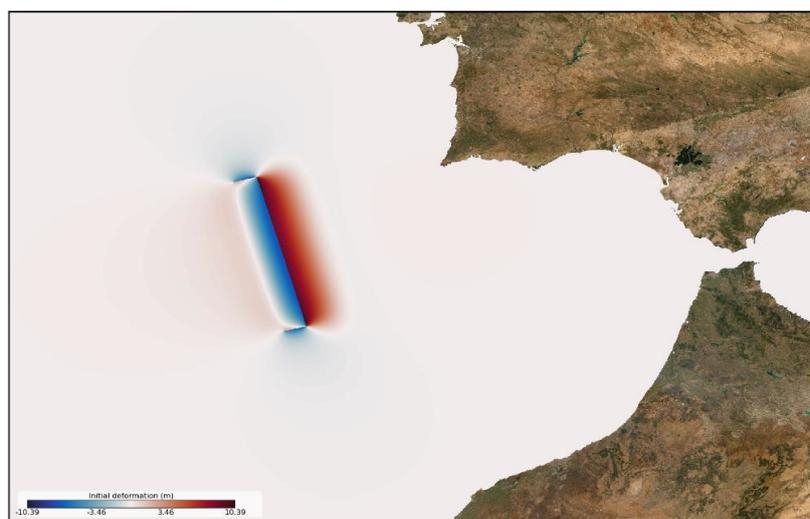




Figura 3 Perturbación inicial de la superficie del mar producida por la fuente 8 en Barkan et al. (2008).

### Simulaciones de propagación y altura máxima de ola para las fuentes candidatas

Para seleccionar la fuente sísmica retenida para realizar el estudio numérico completo, incluyendo la inundación de alta resolución en las costas, originalmente se produjo una simulación de propagación para las tres fuentes candidatas y la altura máxima de la ola se graficó a lo largo de toda la simulación numérica. Los resultados se muestran en las siguientes figuras, para las tres fuentes consideradas:

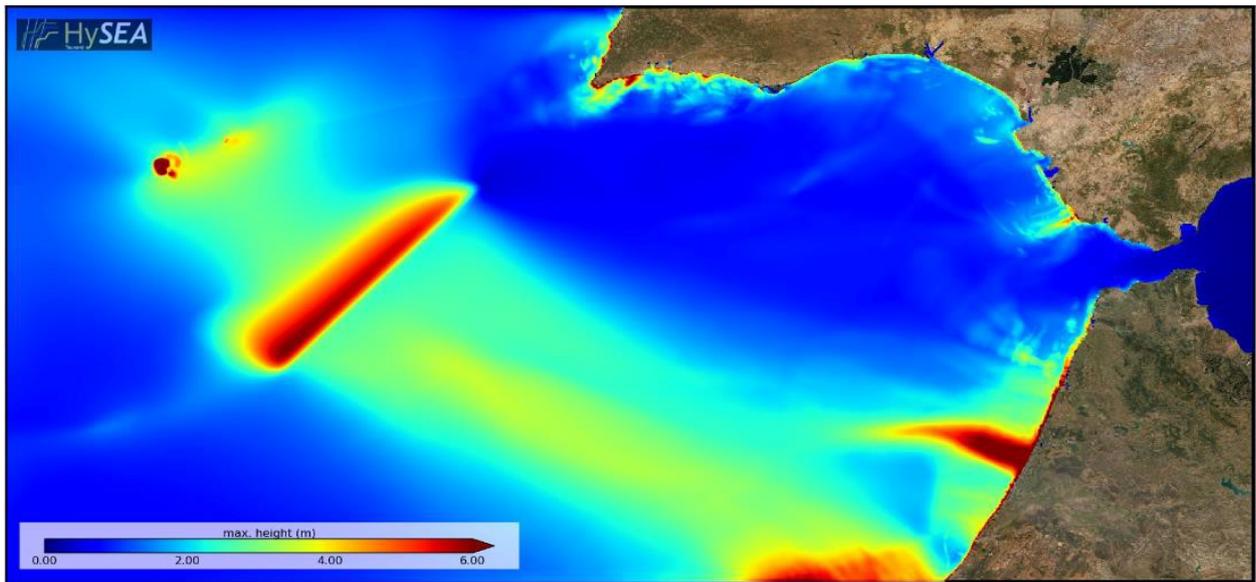


Figura 4 Altura máxima de ola producida por la HSF escalada

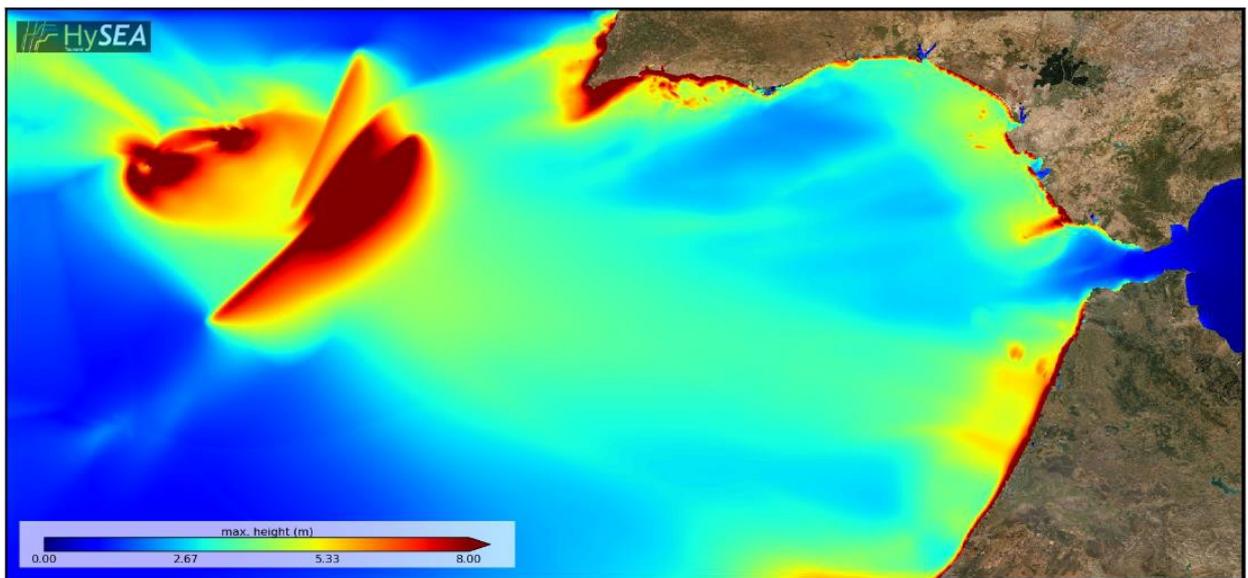


Figura 5 Altura máxima de ola producida por la fuente combinada MdP+HSF

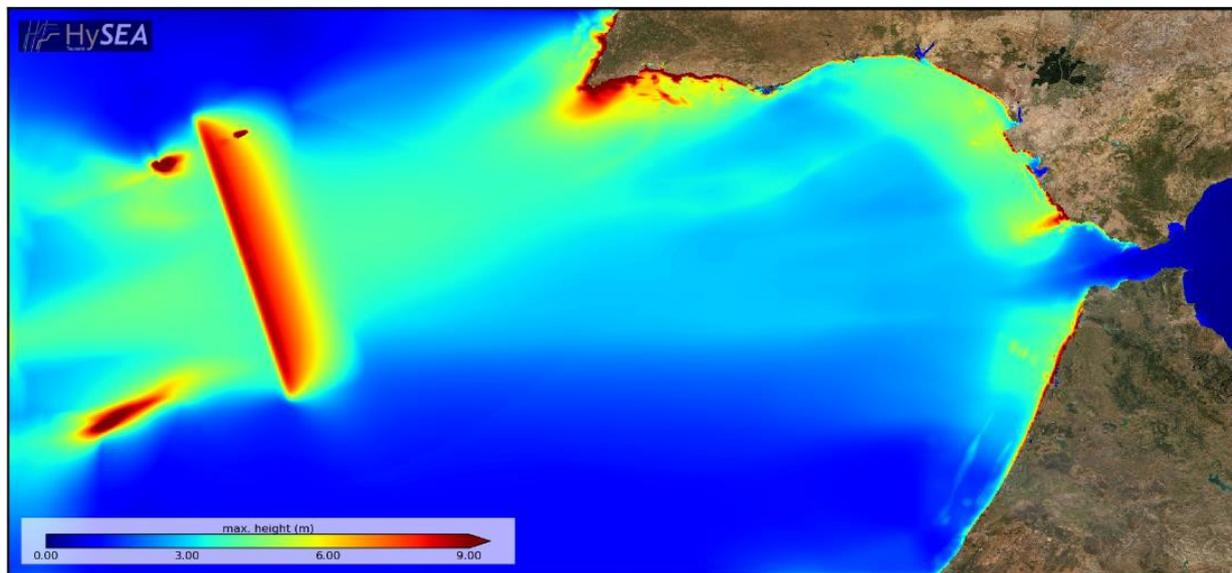


Figura 6 Altura máxima de ola producida por la fuente 8 en Barkan et al (2008)

El rumbo ( $345^\circ$ ) de la falla propuesta en Barkan et al (2008) produce una deformación inicial orientada de tal forma, que produce un impacto más directo en las costas española y portuguesa del golfo de Cádiz. La otra fuente que produce un gran impacto en el área de estudio son las fallas combinadas MdB+HSF. La rotura de los ángulos de 20 y 42 parecen no estar tan dirigidos a la costa española del Golfo de Cádiz, pero en la Figura 5 se observa un impacto importante en el Algarve y bastante similar al de la fuente 8 en Barkan et al (2008) en las costas de Huelva y Cádiz. También se ha realizado un análisis más detallado de las áreas inundadas.

Por lo tanto, se observa que estas dos fuentes producen un mayor impacto en la costa oeste de Andalucía que la versión a escala del HSF. Por otro lado, la fuente 8 en Barkan et al (2008) no tiene evidencia geológica (no se identifica una estructura tectónica asociada), mientras que el combinado MdB+HSF sí lo tiene. Por ello, el combinado MdB+HSF (la segunda fuente mencionada anteriormente) es el que se utilizará como fuente sísmica para la evaluación del peligro de tsunami.

- **MEDITERRÁNEO**

Para seleccionar los escenarios que se han utilizado en nuestras simulaciones de inundaciones de muy alta resolución, se ha considerado la base de datos QAFI de fallas del cuaternario activas. Son un total de 48 fuentes ubicadas en el Mar de Alborán, a lo largo de la costa mediterránea española y a lo largo de la costa argelina. Están representadas en la figura 7. De estas fuentes, solo las de la cuenca del Alborán y algunas de la cuenca (occidental) argelina son relevantes para este estudio. En este caso, no existe un solo escenario que pueda ser considerado en cierto sentido como el más desfavorable para toda la costa mediterránea.

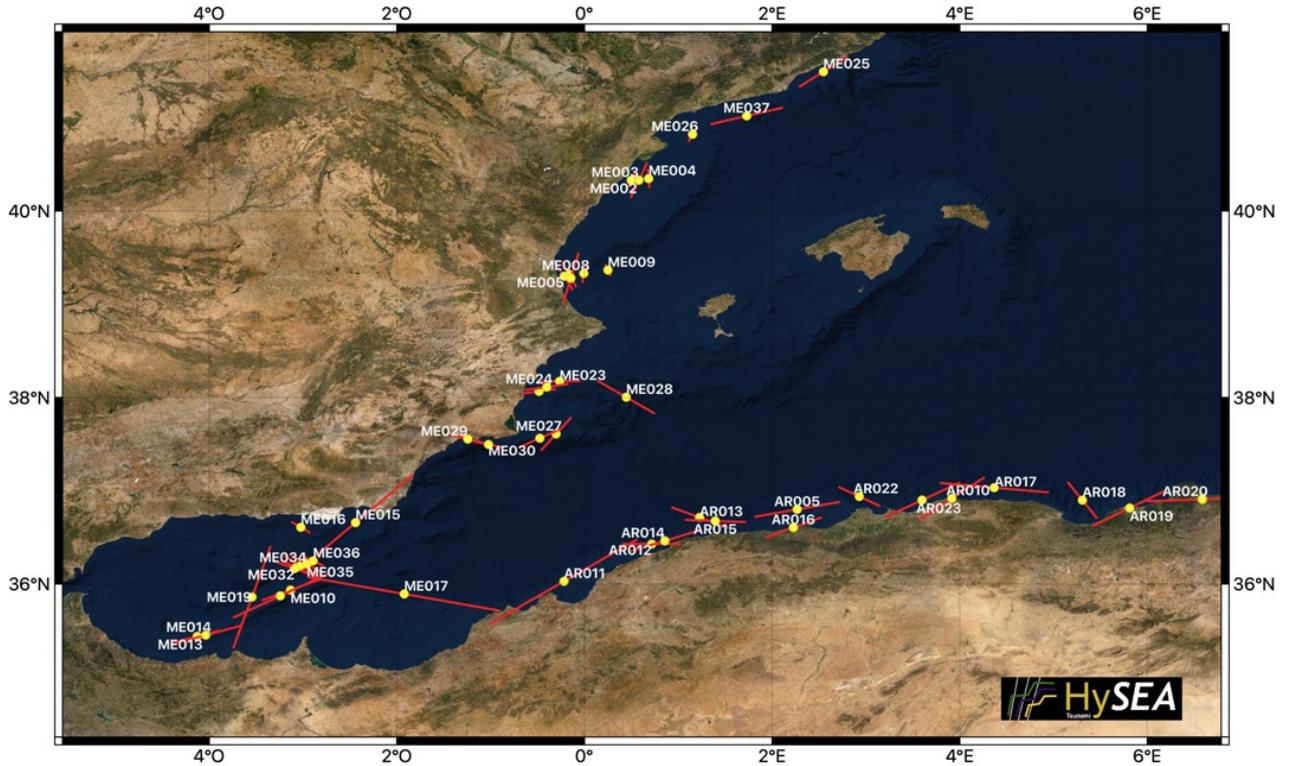


Fig. 7 Fuentes sísmicas en la base de datos QAFI, que se han utilizado para simular una gran cantidad de potenciales escenarios tsunamigénicos en el Mediterráneo Occidental.

Por ello se ha calculado la envolvente de los 4 escenarios considerados como más desfavorables, y se construirá como la suma de todas la manchas de inundación máxima de dichos escenarios, reflejando el área máxima de inundación del conjunto de fuentes tsunamigénicas.

Se han realizado simulaciones numéricas de alta resolución con un píxel de inundación de 5 m para cada uno de los cuatro casos seleccionados, y finalmente se computa la envolvente de todos ellos.

Las siguientes tablas y figuras muestran la condición inicial de las tres fuentes seleccionadas, la altura máxima de propagación en las simulaciones y el conjunto completo de parámetros utilizados.



NAME	LON	LAT	DEPTH	LENGTH	WIDTH	STRIKE	DIP	RAKE	SLIP
ME014	-4.037	35.453	5.5	67.0	15.6	75.0	45.0	75.0	4.2
ME012	-3.243	35.874	5.5	95.0	15.6	245.0	45.0	80.0	6.0
AR011	-0.219	36.030	12.5	156.0	38.9	60.0	40.0	135.0	8.0
ME032*	-3.091	36.166	5.0	42.0	10.2	290.0	80.0	-180.0	1.0

Table 1. Okada's parameters defining initial sea bottom deformation for the sources considered (ME014, ME012, AR011, and ME032) extracted from QAFI database v.4. (\*) The values for ME032 are not used here.



Fig 8. Falla ME014 Tofiño-Xauen Bank Northern Flank



Fig. 9. Falla ME012 Alboran Ridge South

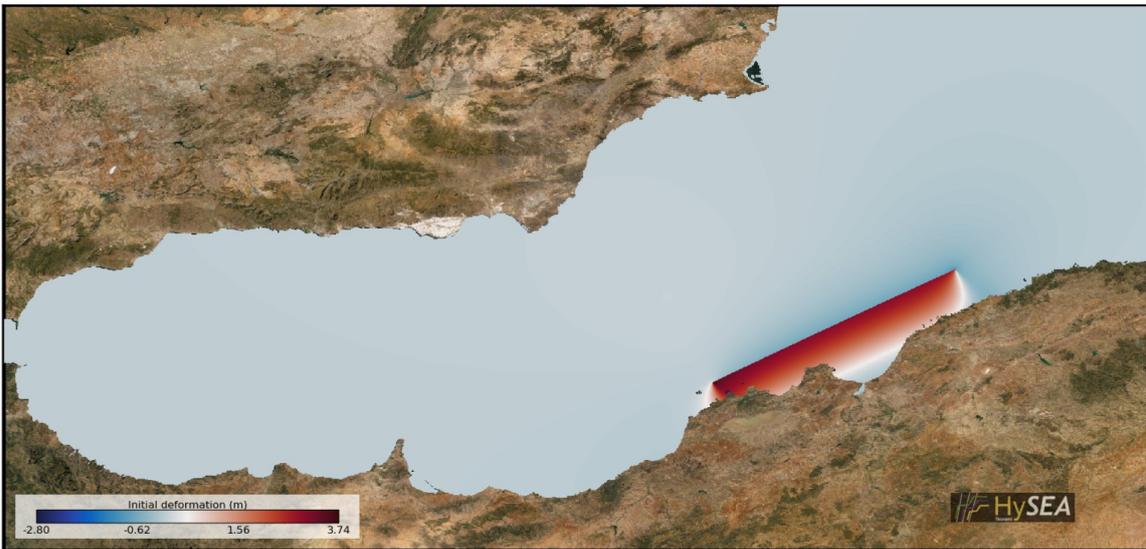


Fig. 10. Falla AR011 Arzew

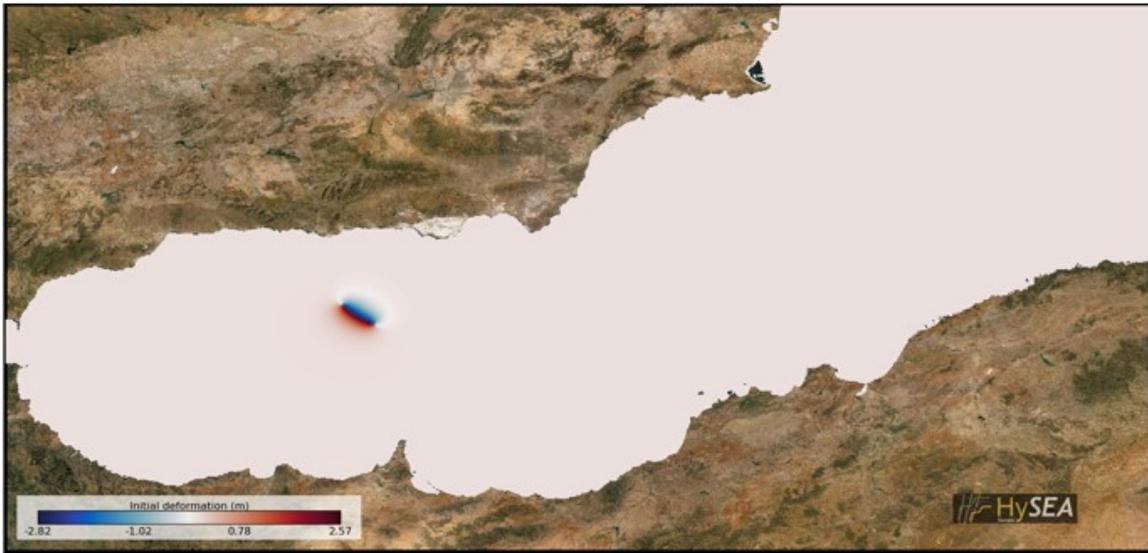


Fig. 11. Falla ME032 Averroes

En Las Figuras 8, 9, 10 y 11 se muestra la perturbación inicial de la superficie del mar producida por las fuentes sísmicas consideradas. Esto corresponde a la condición inicial para el modelo numérico. En rojo valores positivos (hacia arriba), en azul valores negativos (hacia abajo).

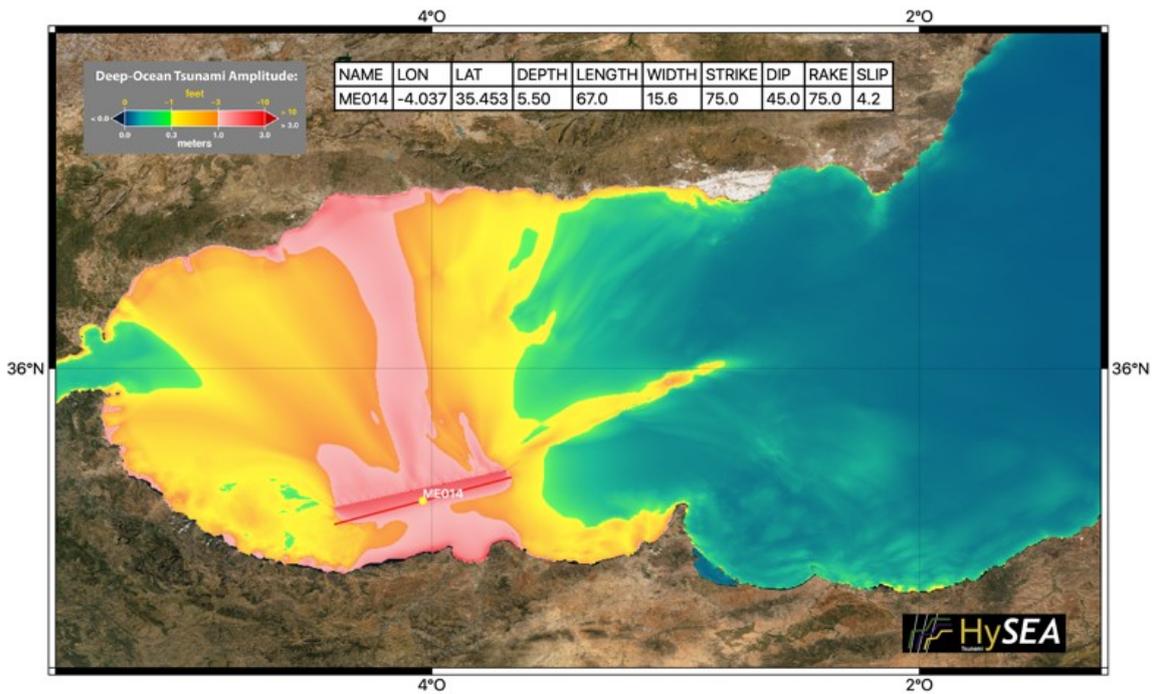


Fig 12. Falla ME014 Tofiño-Xauen Bank Northern Flank

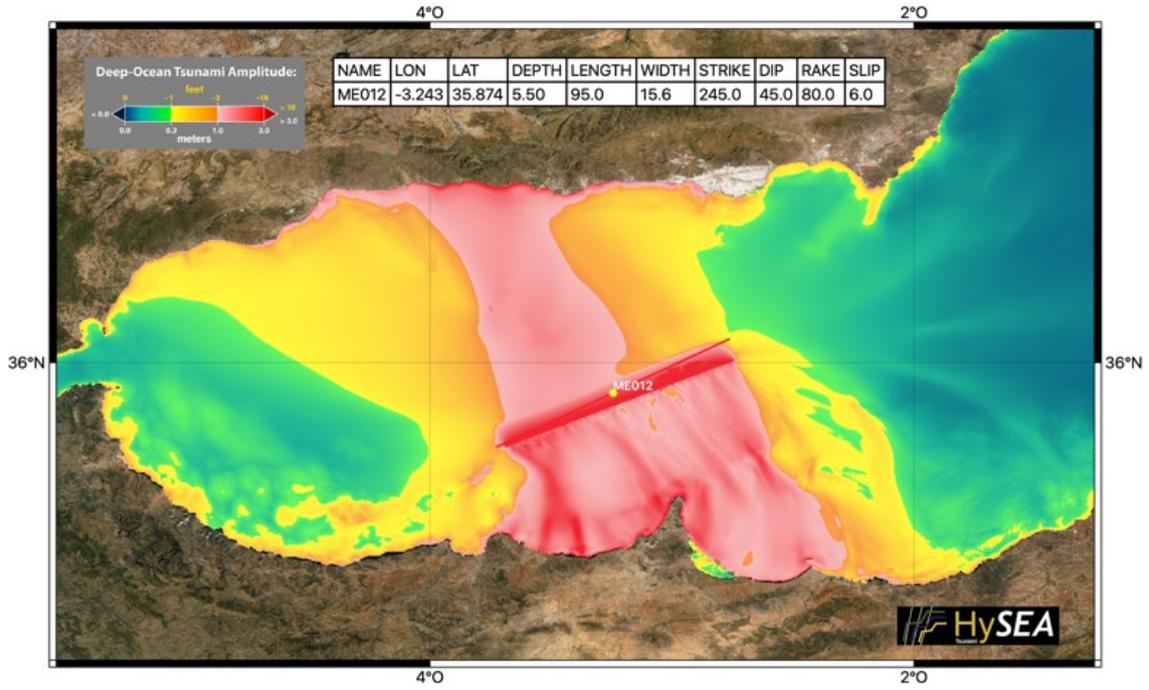


Fig. 13. Falla ME012 Alboran Ridge South

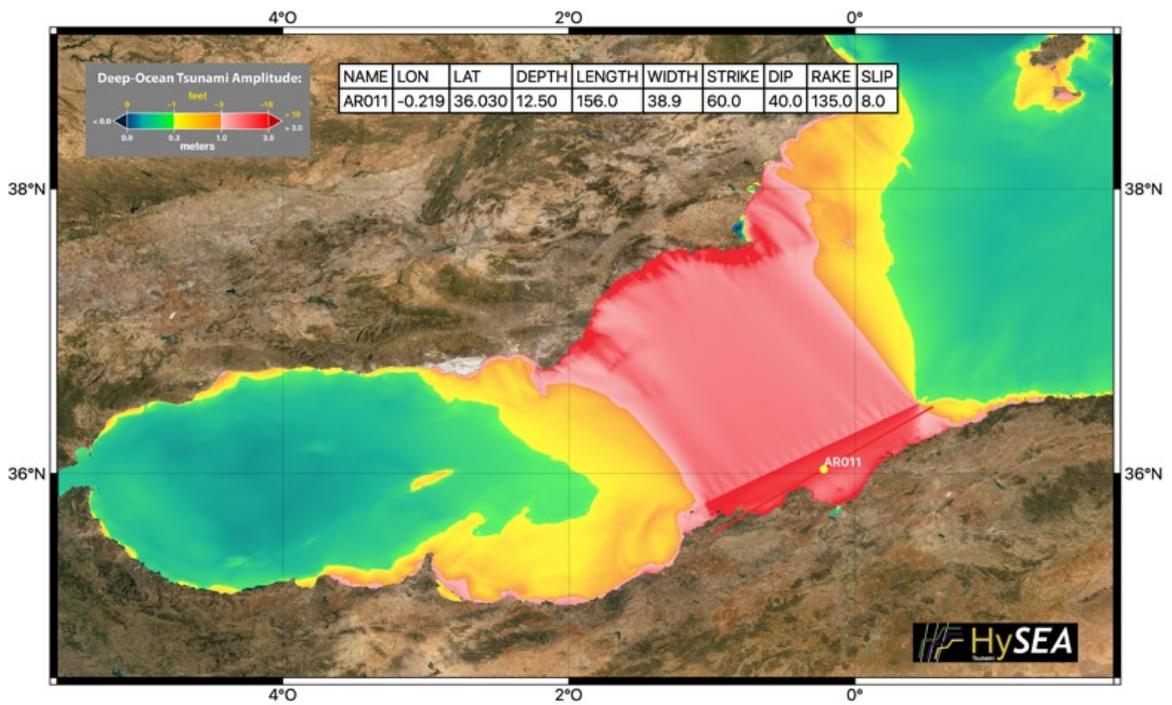


Fig. 14. Falla AR011 Arzew

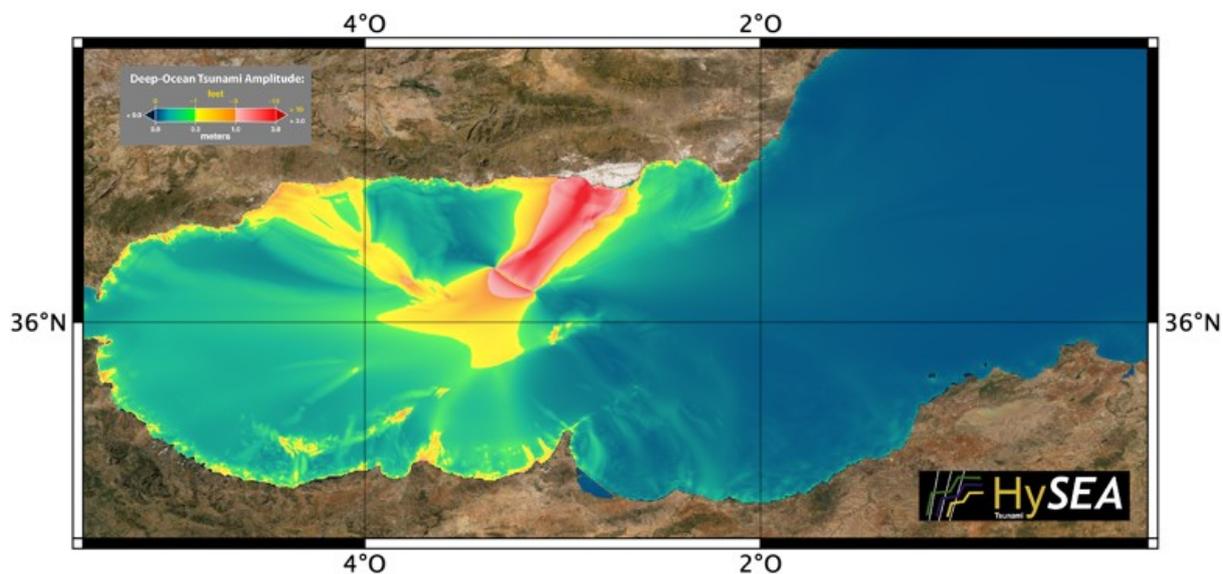


Fig. 15. Falla ME032 Averroes

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestra la altura máxima de ola, simulada en los escenarios considerados: ME014, ME012, AR011 -desde QAFI v.4- y ME032 según lo propuesto por Estrada et al (2021).

### 2.3. DATOS TOPO-BATIMÉTRICOS USADOS

Se han utilizado diferentes fuentes de datos para la construcción de los datos topo-batimétricos:

El conjunto de datos batimétricos GEBCO. La cuadrícula GEBCO\_2020, es un modelo global para océano y tierra a intervalos de 15 segundos de arco. [GEBCO Gridded Bathymetry Data](#)

Modelo de terreno digital EMODnet (DTM), con resolución de cuadrícula de 1/16 \* 1/16 minutos de arco (alrededor de 115 \* 115 metros). [EMODnet Bathymetry Viewing and Download service \(emodnet-bathymetry.eu\)](#)

Modelo batimétrico del litoral andaluz. Resolución 20x20. Año 2008. Escala 1: 50.000. [Acceso a la REDIAM \(junta-andalucia.es\)](#)

Modelo digital de terreno (MDT05 / MDT05-LIDAR) con resolución de cuadrícula de 5 metros. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Las cuadrículas topo-batimétricas están construidas de tal manera que la topografía y batimetrías utilizadas generan un modelo coherente donde las incompatibilidades en los datos se suavizan para producir una transición perfecta entre diferentes datos. Esta consistencia se consigue homogeneizando altura



y profundidad, refiriéndolos al valor cero. Para ello, ha sido necesario interpolar el vacío existente entre el cero hidrográfico (referencia de las isóbatas extraídas de las cartas náuticas) y el cero topográfico.

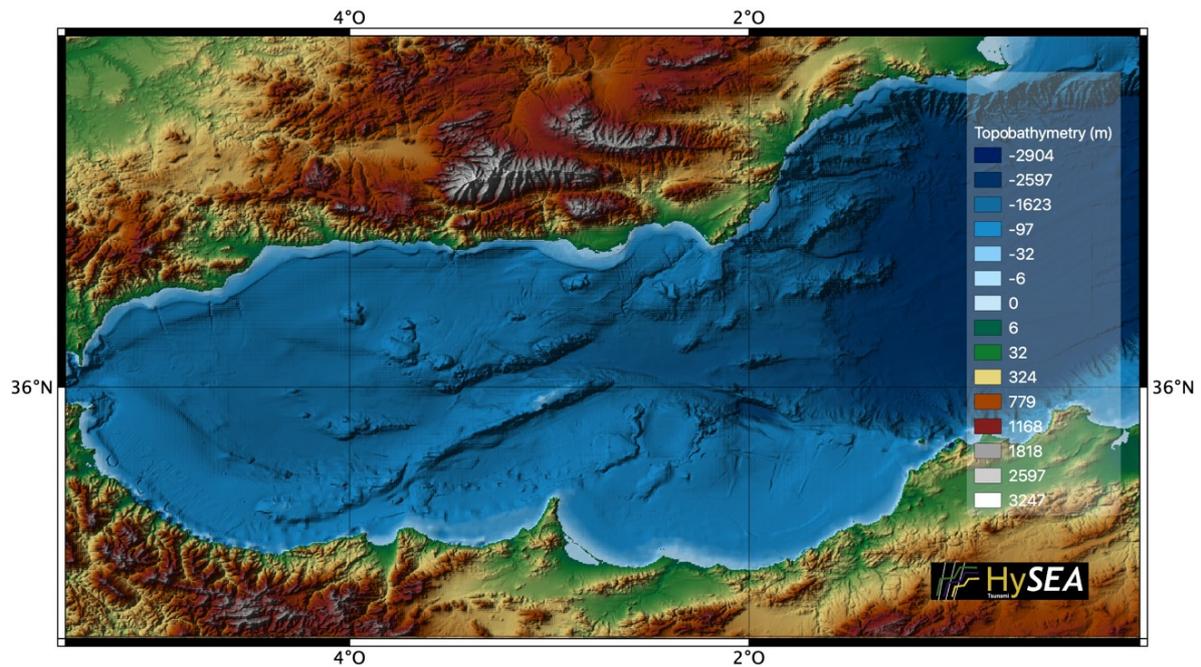


Figura 16. Cobertura del dominio de cálculo y los datos batimétricos utilizados en la propagación.

#### 2.4. MALLAS ANIDADAS

Se ha utilizado un conjunto de cuatro mallas anidadas para realizar el estudio de inundación a una resolución muy alta. El dominio de cálculo está cubierto por una malla con una resolución numérica de 320 m. Luego, se consideran tres mallas anidadas, con resoluciones de 160 m, 40 m y 5 metros, respectivamente (ver figura 9). Toda la costa andaluza está cubierta por dos cuadrículas de nivel 0, dos cuadrículas de nivel 1, trece rejillas del nivel 2 y 51 rejillas del nivel 3. Figuras 17 y 18.

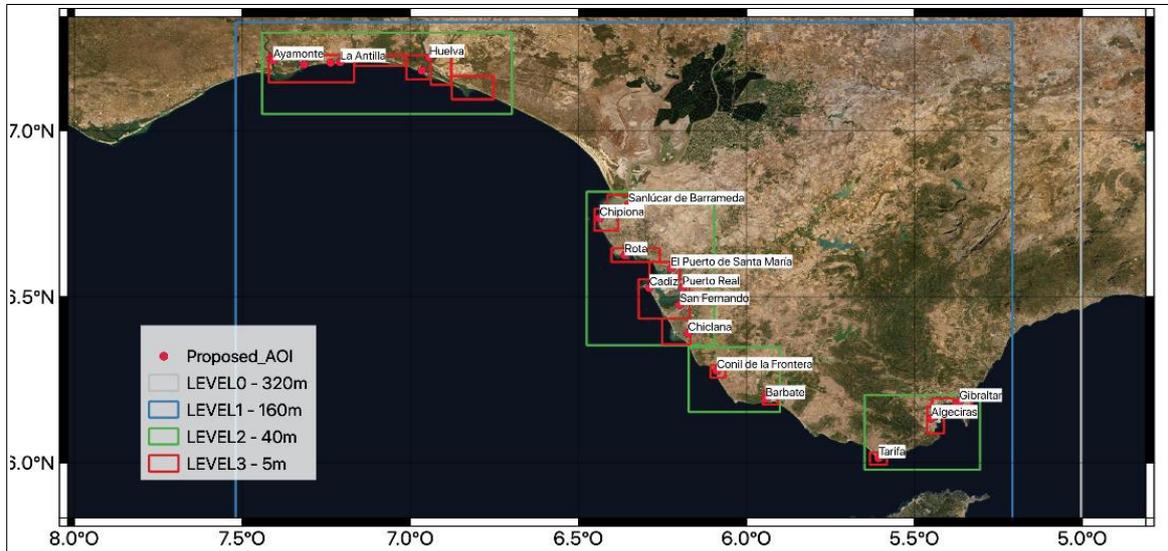


Figura 17. Dominio Computacional en la zona atlántica

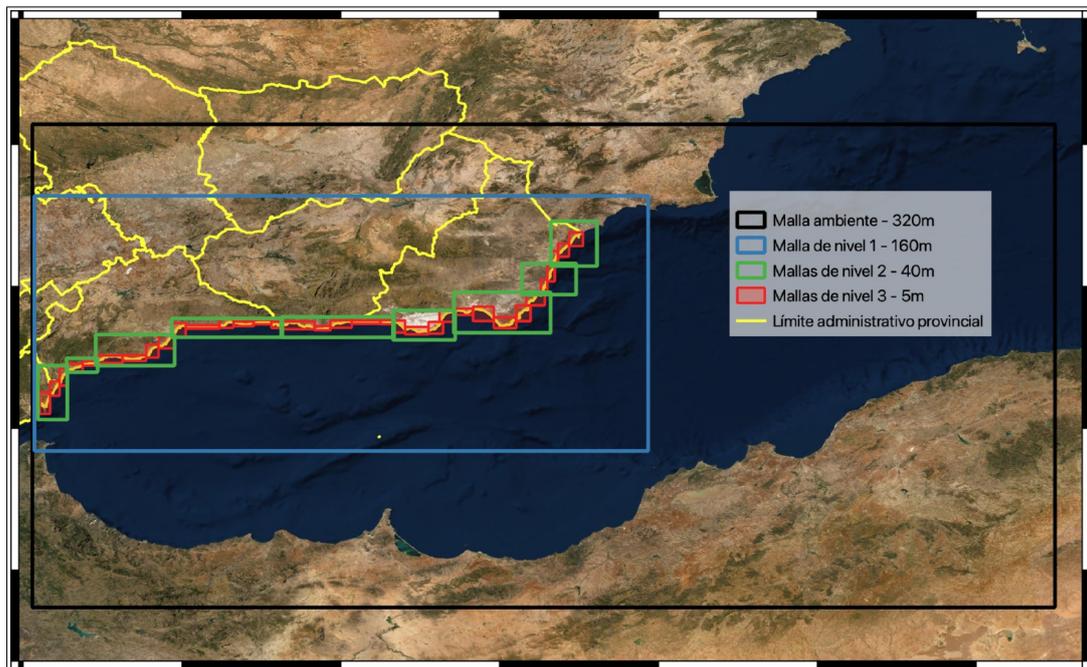


Figura 18. Dominio Computacional en la zona mediterránea

Figuras 17 y 18. Dominio de cálculo (nivel 0) discretizado con una resolución numérica de 320 m, nivel 1 (en azul) con una resolución de 160 m, y las 13 cuadrículas del nivel 2 con una resolución de 40 m (en verde), y 57 cuadrículas de alta resolución de 5 m (en rojo).



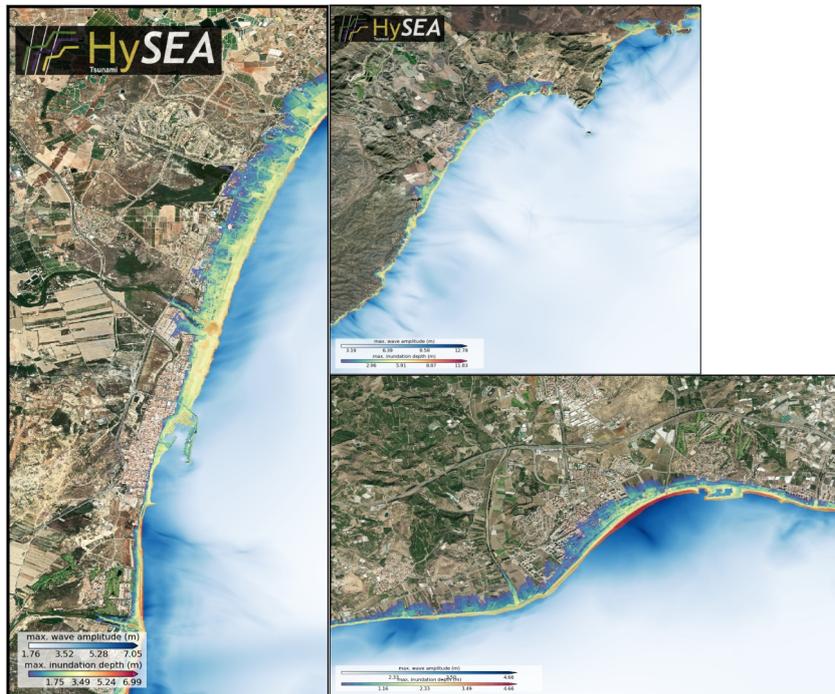
## 2.5. RESULTADOS

Para cada una de las simulaciones, se generan los siguientes resultados:

NAME	DESCRIPTION	OUTPUT FILENAME
Arrival time	Time of arrival	*_arrival_times.tif
Run-up	Run-up along coastal strip	*_runup.tif
Max water height	Maximum height of the water column in all the inundated area	*_max_inundation.tif
Max speed	Maximum speed in all the inundated area	*_max_u.tif
Max flow	Maximum flow in all the inundated area	*_max_q.tif
Max momentum flux	Maximum momentum flux in all the inundated area	*_max_mom_flux.tif

Tabla 4

Se obtuvieron los datos correspondientes del escenario más desfavorable tanto de la vertiente atlántica; así como de los cuatro eventos, además de una "envolvente máxima" que recopila la información de un "peor escenario" para toda la costa mediterránea.



Ejemplo de ola máxima y profundidad de inundación máxima de la envolvente en el escenario más desfavorable en algunas áreas de estudio.



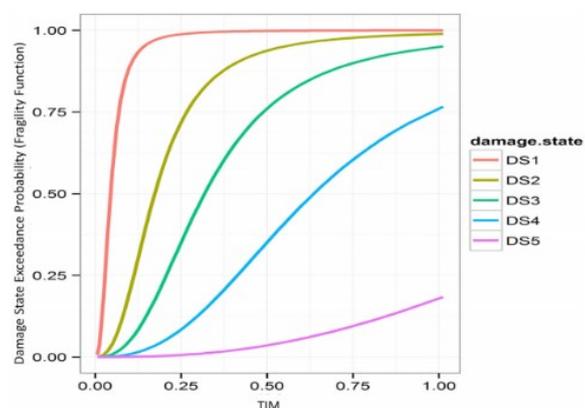
### **3. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD EDIFICATORIA.**

Una de las aproximaciones necesarias para llegar a completar un análisis de riesgos por maremotos de forma óptima es el análisis de la vulnerabilidad de los núcleos urbanos que puedan llegar a verse afectados por la fase de inundación. La alta exposición que presentan las costas en la actualidad, debido a su alta ocupación y un grado de urbanización muy elevado, hace obligatorio el estudio de la vulnerabilidad de los entornos edificados en las zonas costeras, máxime si tenemos en cuenta su relación con la necesidad de evacuación en caso de una alerta temprana.

Este tipo de estudios se han abordado desde la perspectiva de la vulnerabilidad/fragilidad edificatoria, es decir, la capacidad de resistencia de los edificios ante el envite de las fuerzas generadas en la fase de inundación por un maremoto.

Este análisis se ha llevado a cabo, como muestra gran parte de la literatura científica, mediante el uso de curvas o funciones de vulnerabilidad/fragilidad, usadas a su vez de manera tradicional en los estudios de vulnerabilidad edificatoria en otros riesgos como sísmico o inundaciones.

Estas funciones de vulnerabilidad/fragilidad son modelos estadísticos que proveen la estimación de un daño esperado o pérdida usando como parámetro una medida de intensidad, ya sea, la velocidad máxima, el calado o como hemos mencionado antes el flujo momento máximo.



Ejemplo de función de vulnerabilidad para daño por tsunami (Charvet et al.2017)

Pero estas funciones son modelos que deben construirse ex profeso en las zonas donde se va a realizar el análisis de riesgos por maremoto, debido a las diferencias en los estándares constructivos de cada región. Es decir, en España no deben usarse las funciones desarrolladas en otras regiones con riesgo de maremotos, pues los resultados pueden no ser completamente precisos y válidos, en su caso, debido a las diferencias constructivas de los edificios.

En España en la actualidad no existen desarrolladas funciones de vulnerabilidad/fragilidad edificatoria ante el riesgo de maremotos, aunque sí para otros riesgos, y por lo tanto, es necesario desarrollar una



metodología alternativa que evalúa de forma rigurosa la vulnerabilidad de los edificios ante el riesgo de maremoto.

En ausencia de estas funciones de vulnerabilidad/fragilidad, en este estudio, se va a utilizar el modelo PTVA-3 (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment), metodología desarrollada en 2003 y actualizada en base a las últimas observaciones tomadas en los últimos eventos, y conformándose como una de los métodos más usados a nivel global. En concreto, la versión tercera de este modelo (PTVA-3) fue una modificación mejorada de la desarrollada por Dall'Osso en 2009, y es en la actualidad, aunque existe una cuarta versión, la más usada a nivel global.

El análisis de riesgos se realizará en base al cálculo de la vulnerabilidad de los edificios presentes en los núcleos de población de las costas de Andalucía. Se trata de un **escenario determinista** donde se van a tener en cuenta los valores del evento más desfavorable que se dan tanto en la zona atlántica, así como el escenario más desfavorable en la zona mediterránea, es decir, la envolvente de los 4 escenarios anteriormente mencionados. Para ello se han realizado las simulaciones que permitan obtener las características de la ola a su llegada a la costa, así como el comportamiento de la misma a su llegada a tierra y su consiguiente impacto en los núcleos de población.

Para ello se aplicará el modelo **PTVA-3 (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment)** cuyo resultado es un índice sintético de vulnerabilidad, denominado **RVI (Relative Vulnerability Index)**, índice de vulnerabilidad relativa, por cada edificio, clasificando la vulnerabilidad en 5 categorías: muy alta, alta, media, moderada y baja. El modelo, desarrollado inicialmente en 2003<sup>1</sup>, está ampliamente contrastado e implementado como método de evaluación del impacto de un maremoto en las estructuras edificatorias situadas en zonas costeras. Se pueden encontrar numerosas referencias bibliográficas sobre su aplicación en diferentes áreas geográficas, como Australia, Chile, Portugal, Japón, Grecia, Italia, Irán, España o EE.UU.

Cabe destacar que el PTVA-3 si bien se trata de un modelo de cálculo de vulnerabilidad, este introduce elementos de peligrosidad que acercan de manera considerable el resultado a un índice de riesgo.

En concreto, en el modelo PTVA-3 la puntuación del RVI, que oscila en un rango entre 1 y 5, siendo 1 la menor vulnerabilidad y 5 la mayor, es calculada a través de la suma ponderada de dos elementos separados y cuya ecuación es la siguiente:

$$\mathbf{RVI (1, 5) = \frac{2}{3} (SV) + \frac{1}{3} (WV)}$$

(ecuación 1)

---

<sup>1</sup> Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y., and Smith, D.: Assessing tsunami vulnerability, an example from Heraklion, Crete, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 377–389, 2003,

Papathoma, M. and Dominey-Howes, D.: Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 733–747, 2003,



En primer lugar, la vulnerabilidad de la capacidad de carga de las estructuras de los edificios, asociada a los valores de empuje del flujo hidrodinámico de la ola, y denominado vulnerabilidad estructural, **SV (Structural Vulnerability)**.

En segundo lugar, la vulnerabilidad de los elementos de los edificios debido a su contacto con el agua, o sea, su parte inundada, y denominado vulnerabilidad por el agua **WV ( Water Vulnerability )**.

En este sentido es necesario destacar que debido, como es evidente, a que es necesaria la presencia un calado, es decir, una altura de inundación para desarrollar el modelo PTVA-3 y calcular la vulnerabilidad edificatoria, **solo se analizarán los edificios situados en la mancha de inundación.**

Ha quedado demostrado que los edificios con una estructura débil pueden sufrir daños severos, incluso cuando han sido parcialmente inundados. Esto es debido a un número bajo de plantas, materiales de construcción poco resistentes como la madera, con poca cimentación o un estado de conservación deficiente.

En referencia al segundo elemento, WV, se ha demostrado que los edificios que no han sido golpeados directamente por la ola, pero sí que han sufrido una inundación en casi su totalidad experimentan daños cercanos al 60%. Es por ello que la WV se tiene en cuenta como elemento necesario en un escenario de inundación por maremoto.

Por lo tanto, SV y WV se valoran numéricamente en un rango de 1 a 5, donde SV se ha ponderado en  $\frac{2}{3}$  y WV en  $\frac{1}{3}$  del total de la ecuación. Es necesario anotar que se debe reescalar a este rango entre 1 y 5 los valores obtenidos en las ecuaciones 2, 3 y 4, acorde a la tabla 5.

El cálculo de la vulnerabilidad estructural SV es calculado a través de la siguiente fórmula:

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

(ecuación 2)

Donde **(Bv)** son las características de los edificios, **(Ex)** es la profundidad de la mancha de inundación en el punto en el que se encuentra el edificio y **(Prot)** es el grado de protección ofrecida al edificio por algún tipo de barrera, ya sea natural o artificial.

RVI (1-5)	1-1.8	1.8-2.6	2.6-3.4	3.4-4.2	4.2-5
Nivel de vulnerabilidad	BAJA	MODERADA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
SV (ORIGINAL)	1 a 25	25 a 50	50 a 75	75 a 100	10 a 125
SV (REESCALADO)	1	2	3	4	5
Bv (ORIGINAL)	-1 a -0.6	-0.6 a -0.2	-0.2 a 0.2	0.2 a 0.6	0.6 a 1
Bv (REESCALADO)	1	2	3	4	5
Ex (ORIGINAL)	0 a 1 m	1 a 2 m	2 a 3 m	3 a 4 m	>4 m
Ex (REESCALADO)	1	2	3	4	5
Prot (ORIGINAL)	0 a 0.2	0.2 a 0.4	0.4 a 0.6	0.6 a 0.8	0.8 a 1
Prot (REESCALADO)	1	2	3	4	5



RVI (1-5)	1-1.8	1.8-2.6	2.6-3.4	3.4-4.2	4.2-5
Nivel de vulnerabilidad	BAJA	MODERADA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
WV (ORIGINAL)	0 a 0.2	0.2 a 0.4	0.4 a 0.6	0.6 a 0.8	0.8 a 1
WV (REESCALADO)	1	2	3	4	5

Tabla 5.

(Bv) viene determinada por un rango numérico de - 1 a 1, y que debe ser reescalado a un rango de valores entre 1 y 5 para su uso en la ecuación 2, según la tabla 5, y depende de las características del edificio. Estas características son las siguientes y vienen determinadas por la fórmula:

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

(ecuación 3)

Donde:

**s** = número de pisos

**m** = material de construcción

**g** = hidrodinámica de la planta baja

**f** = resistencia de la cimentación

**so** = perfil del edificio y orientación

**mo** = objetos móviles

**pc** = estado de conservación

Los valores de cada uno de los atributos en base a las características del edificio pueden consultarse en la siguiente tabla:

	-1	-0.5	0	0.25	0.5	0.75	1
<i>s</i>	> 5 plantas	4 plantas	3 plantas		2 plantas		1 plantas
<i>m</i>	hormigón armado		ladrillo doble		ladrillo simple		madera
<i>g</i>	100% planta abierta	75% planta abierta y ventanas	50% planta abierta		25% planta no abierta pero con ventanas		planta no abierta
<i>f</i>	pilares profundos		pilares medio profundos				pilares poco profundos
<i>so</i>	perfil hidrodinámico alto		perfil hidrodinámico o medio				perfil poco hidrodinámico



	-1	-0.5	0	0.25	0.5	0.75	1
<i>mo</i>			riesgo mínimo de daño por objetos móviles	riesgo moderado de daño por objetos móviles	riesgo medio de daño por objetos móviles	riesgo alto de daño por objetos móviles	riesgo muy alto de daño por objetos móviles
<i>Pc ó (mediante año de construcción)</i>	muy bueno	bueno	medio		pobre		muy pobre

Tabla 6

Para el cálculo de la variable *Bv* nos hemos basado en los datos catastrales de los edificios. Los atributos que contendrá dicho archivo son:

Coordenadas XY	Nº de plantas	Cota de los edificios (m.s.n.m)	Material construcción	Año construcción	Estado de preservación	Geometría del edificio	Perfil de los edificios
-------------------	---------------	------------------------------------	-----------------------	------------------	------------------------	------------------------	-------------------------

Existe cierta complejidad a la hora de caracterizar cada uno de los edificios, ya que algunas de sus características no vienen especificadas en el archivo catastral, y por lo tanto, deberían recogerse mediante trabajo de campo o una fotointerpretación muy minuciosa. Por esta razón se ha de realizar una serie de modificaciones sobre el modelo PTVA-3, con el objetivo de optimizar el análisis GIS, donde en los campos ***g* (hidrodinámica de la planta baja) y *mo* (daños producidos por objetos móviles)** se va a considerar **en exclusiva el valor más desfavorable**, es decir, el que añada una vulnerabilidad más alta. Al tratarse de un análisis de peligrosidad determinista donde las características de la ola vienen marcadas por el peor escenario, también se van a considerar los valores más desfavorables en lo que a vulnerabilidad se refiere en estos casos, obteniendo valores más conservadores.

El atributo ***s*** vendrá determinado por el número de plantas del edificio, reflejado en los datos catastrales, y conforme a la Tabla 6.

El atributo ***m*** vendrá definido por la calidad de la construcción, reflejada también en los datos catastrales suministrado, y conforme a la siguiente tabla:

campo en catastro: 105_tip	Valor
1	-1
2	-0,5



campo en catastro: 105_tip	Valor
3	-0,5
4	0
5	0,5
6	0,5
7	1
8	1
9	1

Tabla 7

Debido a la dificultad de caracterizarlo mediante los datos catastrales, el atributo **f** será calculado acorde al año de construcción, teniendo en cuenta la entrada en vigor de las normas sismorresistentes en España, y ponderando así la capacidad de resistencia de sus cimientos, según la siguiente tabla:

Año de construcción	Valor
>2002 (entrada en vigor última norma sismorresistente NCSE-02)	-1
1974-2002 (entrada en vigor PDS-1, primera norma sismorresistente)	0
>1974 (anteriores a la primera norma sismorresistente)	1

Tabla 8

El estado de preservación **pc**, en caso de no poder realizarse mediante trabajo de campo o fotointerpretación, se ponderará conforme al año de construcción según la siguiente tabla:

Edad	Año de construcción	Valor
21 años	>2000	-1
41 años	1980-2000	-0,5
71 años	1950-1980	0
121 años	1900-1950	0,5
	>1900	1

Tabla 9

El atributo **so** será calculado mediante fotointerpretación o análisis GIS, resolviendo la dirección del eje mayor del edificio con respecto a la costa, siendo más vulnerables aquellos edificios con el mayor lado



perpendicular o diagonal al flujo (menor perfil hidrodinámico), y según los valores recogidos en la siguiente tabla:

Perfil hidrodinámico	Valor
Lado regular y cuadrado o corto perpendicular a la dirección del flujo (forma alta hidrodinámica)	-1
Regular y no cuadrado con el lado largo perpendicular o diagonal a la dirección del flujo (forma hidrodinámica promedio)	0
Irregular con el lado corto perpendicular a la dirección del flujo (mala forma hidrodinámica)	0.5
Irregular con el lado largo perpendicular o diagonal a la dirección del flujo (forma hidrodinámica muy pobre)	1

Tabla 10

La variable **Ex** es la exposición que refiere la profundidad de la columna de agua de la mancha de inundación en el punto en que está el edificio. Los valores que se obtienen de la altura del agua son también reescalados conforme a la tabla 5. Es necesario para su obtención simplemente cruzar los datos de posición del edificio, dados por el campo coordenadas xy, con la capa de calados.

La variable **Prot** es el factor de protección del que dispone el edificio, en base a la presencia de unos atributos y cuyo resultado se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Prot(0, 1) = 1/301 ( 100 * Prot_{br} + 73 * Prot_{nb} + 73 * Prot_{sw} + 55 * Prot_w )}$$

(ecuación 4)

Donde:

**Prot<sub>br</sub>** = la posición de la fila del edificio respecto a la costa

**Prot<sub>nb</sub>** = la presencia de barreras naturales

**Prot<sub>sw</sub>** = la presencia de rompeolas y barreras artificiales, como dársenas, puertos, etc

**Prot<sub>w</sub>** = la presencia de muros de ladrillo alrededor del edificio.

Esta ecuación da como resultado un valor entre 0 y 1 que debe ser reescalado, para su incorporación a la ecuación 2, al rango 1-5 conforme a la tabla 5.

Las diferentes ponderaciones de los atributos se realizarán conforme a la tabla 11. Es importante destacar que no se dispone de información aplicable a un GIS de estos atributos, y los cuatro atributos deben caracterizarse mediante fotointerpretación o análisis GIS. Al tratarse de infraestructuras de cierto tamaño, su caracterización es más rápida por el número de edificios que pueden llegar a proteger. Solo la variable **Prot<sub>w</sub>**, la presencia de muros de ladrillo alrededor del edificio, por la dificultad de caracterizar



este tipo de protección por edificio, como el caso anterior, **se tomará exclusivamente el valor más desfavorable**, es decir, el valor que ofrezca una protección menor.

	0	0.25	0.5	0.75	1
Prot_br	> 10 <sup>a</sup>	7-8-9-10 <sup>a</sup>	4-5-6 <sup>a</sup>	2-3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Prot_nb	Protección muy alta	Protección alta	Protección media	Protección moderada	Sin protección
Prot_sw	Vertical >5 metros	Vertical 3-5 metros	Vertical 1.5-3 metros	Vertical 0-1.5 metros o inclinado 1.5-3 metros	Inclinado 0-1.5 metros o sin protección
Prot_w	Altura del muro entre el 80-100% de la altura del agua	Altura del muro entre el 60-80% de la altura del agua	Altura del muro entre el 40-60% de la altura del agua	Altura del muro entre el 20-40% de la altura del agua	Altura del muro entre el 0-20% de la altura del agua

Tabla 11

La segunda variable de la ecuación 1, **WV**, vulnerabilidad por agua, se calcula como el cociente del número de plantas inundadas del edificio entre el número de plantas totales del mismo, lo que da como resultado un valor entre 0 y 1, y que a su vez debe ser reescalado al rango entre 1 y 5.

$$\mathbf{WV (0, 1) = \text{número de plantas inundadas} / \text{número de plantas totales}}$$

(ecuación 5)

Una vez que ya disponemos del valor de las variables SV y WV podemos calcular el RVI mediante la ecuación 1 y el resultado se convierte a una de las cinco categorías de vulnerabilidad.

#### **4. PELIGROSIDAD POR ARRASTRE DE PERSONAS.**

El análisis del concepto de peligrosidad ante el riesgo de maremotos se ha abordado desde diferentes perspectivas a lo largo de la abundante literatura científica. Una de ellas es la peligrosidad por arrastre de personas, que viene a definirse como el peligro de ahogamiento por la pérdida de estabilidad o sustentabilidad debido a la profundidad de inundación y/o a la velocidad del flujo del tsunami entrante. Normalmente se utiliza el producto de ambos, conocido como flujo máximo (caudal, q), y que viene definido como el caudal máximo registrado en todo el dominio de cálculo, en todos los tiempos de la simulación.

Puede ser especialmente útil para medir la energía derivada del flujo de la fase de inundación en cuanto a impacto sobre las personas se refiere, y las pérdidas humanas derivadas de ello. Existen algunos estudios que incluyen este tipo de peligrosidad por arrastre de personas en diferentes análisis de riesgos por maremotos.



Igualmente la relación del flujo, entendido como el producto del calado o altura de la inundación y la velocidad, con la peligrosidad, se ha adoptado en el análisis de otros riesgos, principalmente el de inundación, a la hora de delimitar las zonas más comprometidas dentro de un flujo, Ejemplo de ello es el artículo 9.2 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico que establece que se considerarán Zonas de Peligrosidad Alta (ZPA) aquellas zonas en las que pueden producirse graves daños para personas y bienes cuando las condiciones hidráulicas de la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

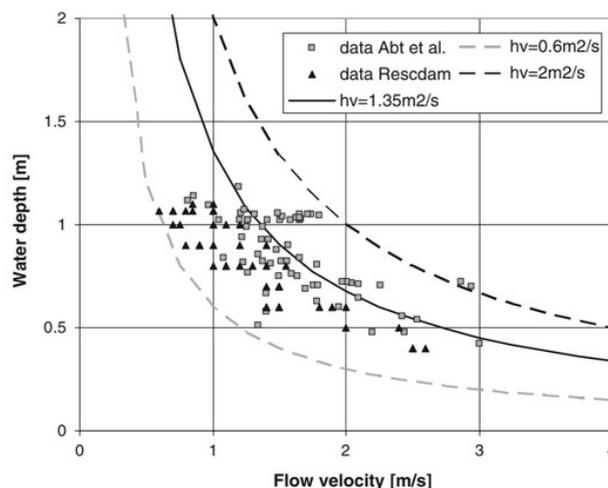
1. que el calado sea superior a 1 metro
2. que la velocidad sea superior a 1 m/s
3. que el producto de ambas variables sea superior a 0.5 m<sup>2</sup>/s

Su expresión viene dada por la ecuación:  $q = h \times u$

donde  $q$  es el caudal o flujo máximo,  $h$  la altura de inundación o calado y  $u$  la velocidad de flujo.

Las unidades que se utilizan para cuantificar esta magnitud es metros cuadrados por segundo: m<sup>2</sup>/s

Jonkman et al. (2007) estudió la pérdida de sustentabilidad humana en flujos de corrientes, donde concluyó que existen valores críticos para la vida entre 0.6 m<sup>2</sup>/s y 2 m<sup>2</sup>/s. Esto nos permitirá clasificar los valores del flujo máximo en una serie de rangos que establezcan unos valores umbrales según un determinado nivel de peligrosidad.



Gráfica que muestra los valores críticos de velocidad y calado (Jonkman et al. 2007).

En base a ello establecemos el siguiente cuadro con los valores umbrales de las diferentes clases de peligrosidad por arrastre de personas:



Flujo (caudal). m <sup>2</sup> /seg	Tipo de peligro	Nivel de peligrosidad
< 0.6	Sin peligro	Muy bajo
0.6 - 1.35	Peligro para algunos	Bajo
1.35 - 2	Peligroso para la mayoría	Medio
2 - 5	Peligroso para todos	Alto
> 5	Muy peligroso	Muy alto

Tabla 12.

Estos valores de peligrosidad por arrastre de personas serán combinados con los mapas de vulnerabilidad de la población, obteniéndose de este modo los mapas de riesgo para la población.

## **5. PELIGROSIDAD POR TIEMPOS DE LLEGADA-CALADO.**

Uno de los enfoques con los que se ha abordado de manera tradicional la peligrosidad en el riesgo de maremotos es teniendo en cuenta los valores de calado de la fase de inundación del mismo. De esta forma, las áreas con un calado mayor representaban los índices de riesgo más altos.

Sin embargo, en recientes aproximaciones al concepto de peligrosidad en el riesgo de tsunamis, se ha tenido en cuenta no solo los valores de calado, sino también los valores de los tiempos de llegada de la primera ola o la más desfavorable. Esto cobra sentido si tenemos en cuenta que un área que potencialmente con riesgo de maremotos la peligrosidad por calado puede ser moderada, con calados de 1 a 2 metros, pero que sin embargo, la capacidad de evacuación de dichas zonas sea limitada por la cercanía de las fuentes tsunamigénicas, y por tanto, por los cortos tiempos de llegada. Estos calados moderados pueden representar una gran peligrosidad si no existe o es limitada la capacidad de evacuación, y más que suficientes para causar graves daños humanos y materiales.

Debido a esto, y a la heterogeneidad de ambos valores en las costas andaluzas, con dos zonas, la atlántica y la mediterránea, con unas características tsunamigénicas tan diferenciadas, se ha realizado una clasificación de la peligrosidad que tiene en cuenta ambas magnitudes, ponderando los calados y tiempos de llegada con la intención de obtener una matriz de peligrosidad que sirva de base para la realización de la cartografía de peligrosidad por calado/tiempos de llegada.



Calado \ Tiempo de Llegada	A ( más de 40 min)	B (entre 20 y 40 min)	C (menos de 20 min)
1 (menos de 1 m)	A1	B1	C1
2 (entre 1 y 2 m)	A2	B2	C2
3 (más de 2 m)	A3	B3	C3

Tabla 13. Matriz de peligrosidad combinando calado/tiempos de llegada



## **ANEXO 4**

### **RECOMENDACIONES A LA POBLACIÓN.**

En el siguiente enlace se encuentra la guía didáctica ante Tsunamis con las recomendaciones básicas para estar preparados y prevenir riesgos:

<https://juntadeandalucia.es/sites/default/files/2021-10/Gu%C3%ADa%20did%C3%A1ctica%20Tsunamis.pdf>



## **ANEXO 5**

### **SEÑALIZACIÓN ANTE EL RIESGO DE MAREMOTO.**

En estos momentos existe un grupo de trabajo de señalización ante el riesgo de maremotos formado por el Estado y las comunidades autónomas, dicho grupo está coordinado por la Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio del Interior.

Existe un primer borrador de propuesta de señales ante este riesgo, el objetivo es poder llegar a definir las señales que se consideren necesarias para información de la población ante el riesgo de maremotos y poder homologarlas en toda España. La idea es que cuando se defina el formato y texto de las señales, se pueda llevar a informe del Consejo Nacional de Protección Civil.



## ANEXO 6

### VISOR WEB CARTOGRÁFICO

En el siguiente enlace se encuentra un visor con la información básica relativa a maremotos:

<https://arcg.is/1Cia09>

Visor del Plan de Emergencia ante el riesgo de Maremotos en Andalucía, con las capas de la zona inundada según escenario más desfavorable en la activación de Copernicus EMS-078 en la zona Atlántica y la envolvente con los escenarios más desfavorables para las simulaciones realizadas por la Universidad de Málaga. Los escenarios están descritos en el Anexo 3. Análisis de Riesgo del Plan de Maremotos.

Además, se incluyen las capas de posibles Vías de evacuación y Puntos de encuentro, realizadas en un estudio de gabinete. Estas capas son una propuesta que ha de ser comprobada en campo por las entidades locales.

Los Puntos de encuentro propuestos se han definido cumpliendo con los siguientes criterios:

- Zonas no inundables.
- Zonas amplias y sin edificios cercanos.

Las vías de evacuación propuestas se han definido cumpliendo con los siguientes criterios:

- Vías amplias.
- Las rutas más óptimas hasta el Punto de encuentro más cercano.



**ANEXO 7**  
**GLOSARIO DE TÉRMINOS.**



## **GLOSARIO:**

- **Análisis determinista de tsunami:** análisis de la peligrosidad de un tsunami asociado a un evento dado, pudiendo tomar como magnitud de medida el calado, run-up o altura de ola en la costa.
- **Alerta temprana:** sistema encargado de la detección de tsunamis y de emitir el aviso de llegada de un tsunami a la costa.
- **Altura de ola de tsunami:** valor absoluto de la diferencia entre la altura de una onda del tsunami y la altura media del nivel del mar.
- **Amplitud de tsunami:** máxima amplitud de onda alcanzada en un tsunami, medida en metros.
- **Análisis probabilista de peligrosidad por tsunami (PTHA):** análisis de la probabilidad de que un tsunami alcance o exceda de una magnitud en un intervalo específico de tiempo en un lugar determinado.
- **Calado:** altura de la columna de agua en la marcha de inundación del tsunami, medida en metros.
- **CENEM:** Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación en Emergencias.
- **CECEM:** Centros de Coordinación de Emergencias 112 Andalucía.
- **DGEPC:** Dirección General de Emergencias y Protección Civil (Junta de Andalucía).
- **DGPCyE:** Dirección General de Protección Civil y Emergencias (Ministerio del Interior).
- **DTM:** Digital Terrain Model, Modelo Digital del Terreno.
- **EDANYA:** grupo de investigación Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico y Aplicaciones especializado en la simulación numérica de tsunamis de la Universidad de Málaga.
- **EMS Copernicus:** Emergency Management Service Copernicus. Servicio de gestión de emergencias de la Comisión Europea que proporciona información geoespacial a los agentes intervinientes en emergencias.
- **Fuente tsunamigénica:** mecanismo capaz de generar un tsunami. Puede ser de origen sísmico, volcánico o deslizamiento.
- **GEBCO:** The General Bathymetric Chart of the Oceans es un conjunto de datos batimétricos globales para océano y tierra a intervalos de 15 segundos de arco.
- **IEO:** Instituto Español de Oceanografía.
- **IGN:** Instituto Geográfico Nacional.
- **IPMA:** Instituto Portugués del Mar y la Atmósfera



- **IOC/UNESCO:** Grupo Intergubernamental de Trabajo de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental.
- **QAFI:** La Base de Datos de Fallas Activas de Iberia.
- **Magnitud de momento (Mw):** magnitud de un terremoto obtenida utilizando el momento sísmico.
- **NEAMTWS:** Sistema de Alerta de Maremotos del Atlántico Noreste, Mediterráneo y Mares Adyacentes.
- **NTHMP:** National Tsunami Hazard and Mitigation Program. Programa Nacional de Mitigación y Peligro de Tsunami de EE.UU.
- **PTVA-3 (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment):** evaluación de la vulnerabilidad por tsunami Papathoma. Metodología de cálculo de la vulnerabilidad relativa edificatoria.
- **PWS:** Public Warning System (Sistema de Aviso Público). Servicio de aviso masivo a la población en caso de emergencia mediante mensajería a los dispositivos móviles.
- **RAN:** Red de Alerta Nacional.
- **REDMAR:** Red de mareógrafos del organismo Puertos del Estado.
- **RRM:** Risk and Recovery Mapping. Subcategoría dentro del servicio de emergencias EMS Copernicus de la Comisión Europea, enfocado a la realización de estudios pre y post-emergencia, en el ámbito del análisis de riesgos, prevención y rehabilitación.
- **RSN:** Red Sísmica Nacional (Instituto Geográfico Nacional).
- **Run-up:** altitud topográfica alcanzada por el agua en la fase de inundación del tsunami.
- **RVI (Relative Vulnerability Index):** índice Relativo de Vulnerabilidad edificatoria obtenido mediante la metodología PTVA-3, que obtiene un valor relativo de la vulnerabilidad de los edificios en la fase de inundación de un tsunami, y clasificado en 5 clases.
- **SINAM:** Sistema Nacional de Alerta por Maremotos.
- **Slip (deslizamiento):** desplazamiento relativo en la dirección definida por el ángulo de deslizamiento, entre los bloques superior e inferior de la falla, medido en el plano de falla, medido en metros.
- **Tiempos de llegada:** tiempo de llegada del primer tren de ondas del tsunami a un determinado punto, medido en segundos.
- **Tsunami-HySEA:** código propio de la Universidad de Málaga (EDANYA Group) que resuelve numéricamente las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas.



- **Velocidad de flujo:** velocidad de la masa de agua en cada punto dado, expresada en m<sup>2</sup>/seg.
- **ZPA:** Zonas de Peligrosidad Alta según el artículo 9.2 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico.