

La necesidad y la oportunidad de estudiar el impacto económico de los tsunamis en las costas españolas

Dr. Miguel Llorente Isidro - Área de Riesgos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España.
(m.llorente@igme.es)

Dr. Jorge Macías Sánchez - Grupo de Investigación en Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico y Aplicaciones.
Universidad de Málaga. (jmacias@uma.es)

1. Introducción

En los últimos 20 años los tsunamis han sido responsables de cientos de miles de víctimas mortales directas y más de 11 millones de desplazados¹, lo que convierte a este tipo de fenómenos en los más mortíferos de entre los peligros naturales de la historia de la humanidad. No todas las zonas del mundo son propensas a sufrir tsunamis, solo lo son las regiones próximas a una masa de agua importante, o conectadas a ella por medio de algún accidente geológico; y entre las zonas donde puede generarse un tsunami, la probabilidad de que ocurra es diferente en cada una de ellas. Más de la mitad de los registros de tsunamis² tienen como punto de origen el Océano Pacífico (figura 1), aunque es más acertado decir que de todos los registros de tsunamis el 60% aproximadamente se originan en el denominado Anillo de Fuego, la zona próxima a las costas de Asia y América, donde las placas oceánicas colisionan con las continentales y generan una intensa actividad sísmica y volcánica. Llama la atención que, si bien en el Océano Atlántico (incluyendo el Mar Caribe) se acumula un 10% de los eventos, en el Mediterráneo la cifra es del orden del 13%. Es llamativo porque, puesto en perspectiva, el Mediterráneo es unas 70 veces más pequeño que el Océano Pacífico en términos de área, por lo que, por unidad de superficie, el Mar Mediterráneo es una zona en apariencia más tsunamigénica que el Anillo de Fuego. Se puede plantear como hipótesis que en el Mediterráneo el registro de tsunamis es más completo que en otras partes del globo, por razones relacionadas con los asentamientos humanos, su nivel de desarrollo y su capacidad para registrarlos. También se puede plantear como hipótesis que ni siquiera el catálogo de eventos en el Mediterráneo sea completo, ya que es creíble que hayan ocurrido tsunamis que hayan pasado inadvertidos o cuya huella geológica aún no se haya descubierto. A pesar de estas dos hipótesis de no-completitud del registro, se pueden obtener algunas conclusiones preliminares de gran interés. Por ejemplo, y con efecto sobre las costas de la Península Ibérica, la probabilidad de que ocurra un tsunami en el Mediterráneo es del 14% cada año, mientras que en el Atlántico es del 5% cada año, o tal vez sea aún más frecuente si se confirmaran las



Efectos del tsunami de Japón (2011).
Fuente: AFP/GETTY.

Los mapas y los estudios de riesgos no tienen propósito predictivo; de hecho, lo último que se quiere es que se cumpla ni siquiera una sola de las premisas con que se realizan. El propósito de los mapas de riesgo es que sirvan como instrumento para alertar de las posibles consecuencias indeseadas para que, desde el día uno de su publicación, o incluso antes con trabajos de divulgación como este mismo artículo, se empiece a poner remedio para mitigar esos efectos, unas consecuencias que se calculan con la mejor ciencia disponible en cada momento.

(1) UNESCO (2018): *High Level Panel Discussion, World Tsunami Awareness Day (WTAD)*; 16/10/2018. www.ioc-unesco.org/wtad2018

(2) *National Geophysical Data Center, NGDC*, o base de datos de la Agencia Norteamericana para la Atmósfera y el Océano, NOAA: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml>

hipótesis de no-completitud. La IOC-UNESCO³ es más contundente en su forma de expresar la probabilidad, si cabe, pues señala que para un intervalo promedio de 30 años, es casi seguro que se produzca un tsunami significativo en el Mediterráneo.

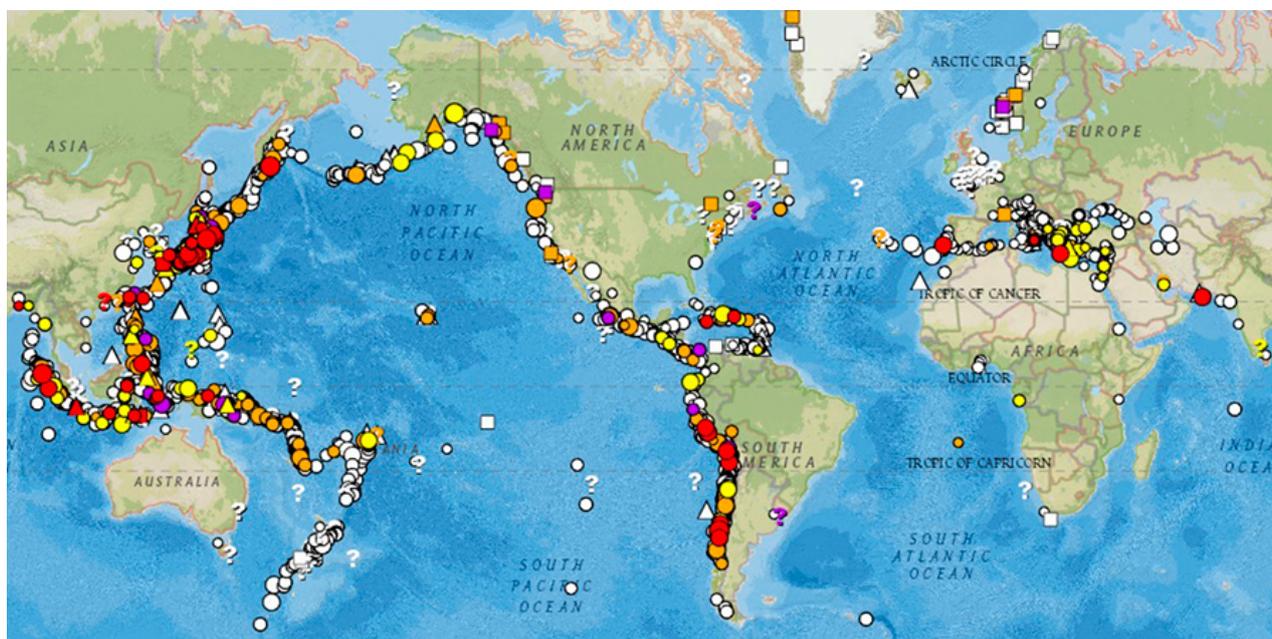


Figura 1. Base de datos de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* de los Estados Unidos (NOAA), sobre tsunamis² (<https://maps.ngdc.noaa.gov>). Los colores representan el grado de impacto en vidas humanas y la forma del símbolo indica su origen (terremotos, círculo; volcanes, triángulo; movimientos de ladera, cuadrado).

Se estima que en las zonas costeras habita más del 40% de la población mundial⁴, pero como se ha visto en eventos de tsunami recientes (Sumatra, 2004; Japón, 2011; Indonesia, 2018), los afectados no son solo los habitantes de la zona, sino también los turistas allí donde esta actividad tiene gran desarrollo asociado a la costa. Tanto es así, que en el tercer aniversario del Día Mundial para la Concienciación sobre los Tsunamis, se ha puesto parte del foco en esta particularidad del riesgo de tsunamis.

En España⁵ se estimó para el año 2017 que en las zonas de playa en particular, las pernoctaciones alcanzaron su máximo en unas 40.000 personas al día. Tomando como referencia el tsunami de Lisboa de 1755, se puede hacer un cálculo aproximado del número de españoles potencialmente víctimas de un tsunami equivalente a aquél que pudiera ocurrir hoy. Así, en 1755, en España, perecieron unas 1.214 personas⁶. Por aquel entonces la población era de unos 9 a 10 millones de habitantes⁷ y dado que el crecimiento poblacional hasta la actualidad ha sido cercano a x5 (o incluso x20 en zonas costeras), la cifra orientativa sería entre 5.000 y 24.000 personas. Es decir, que en términos de víctimas mortales, la magnitud de referencia para un evento similar al de 1755 podría presuponerse teóricamente en hasta unas 60.000 personas, incluyendo locales y turistas. En términos de afectados, la cifra ha de ser mucho mayor. En todo caso, esta aproximación debe ser revisada y trabajada para ofrecer una cifra apoyada en los métodos más avanzados, y usando el mayor número de datos y de la mejor calidad que resulte posible.

(3) IOC-UNESCO (2017): *10 years of the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System (NEAMTWS). Accomplishments and Challenges in Preparing for the Next Tsunami*. Paris (Francia). Information Document 1340.

(4) UN (2017): *Ocean Atlas 2002-2016*, <http://www.oceansatlas.org> (2018)

(5) INE (2017): <http://www.ine.es> (2018).

(6) IGN (2001): *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Monografía n. 19. Ministerio de Fomento. Dirección General del IGN. 756 pp. ISBN 84-95.172-26-7.

(7) INE (1987): *Censo de 1787 "Floridablanca"* 5/50441.

2. Qué es un tsunami

Para entender qué es un tsunami hay que empezar por el concepto más sencillo, el de una ola. En un estanque profundo de aguas tranquilas, si se lanza una piedra se forman en el agua unas ondas u olas. La distancia de "una ola" a otra suele ser bastante pequeña en este ejemplo, del orden de unos pocos centímetros, y la altura de las olas es aún menor. A la distancia entre dos crestas sucesivas la llamamos *longitud de onda*; al tiempo que tardan dos crestas en pasar por un mismo punto lo llamamos *periodo*; por último, a la mitad de la altura entre la cresta y el valle, lo llamamos *amplitud* (figura 2). Si se pudiera seguir con un rotulador a las moléculas de agua en esas olas, cerca de la superficie se dibujaría un círculo y, a medida que se va profundizando, se dibujarían círculos de menor radio cada vez. Hay una profundidad a partir de la cual el agua del estanque ya no se movería, esta profundidad es igual a la mitad de la longitud de onda. El ejercicio teórico del rotulador y las moléculas de agua serviría también para observar otra cosa: el desplazamiento de una ola ideal no transporta agua. Por eso, llamamos a este tipo de fenómenos *perturbaciones oscilatorias*. Si dos personas sujetan una cuerda, cada una por un extremo, y la agitan formando ondas, se comprobará que, en efecto, no hay transporte de masa, pues ninguno gana ni pierde cuerda, sólo la agitan cada uno por su extremo. Es decir, sólo hay transporte de energía. La energía de esas olas se describe mejor por medio de su longitud de onda que a través de su altura, pues a mayor longitud de onda, el volumen perturbado será mayor.

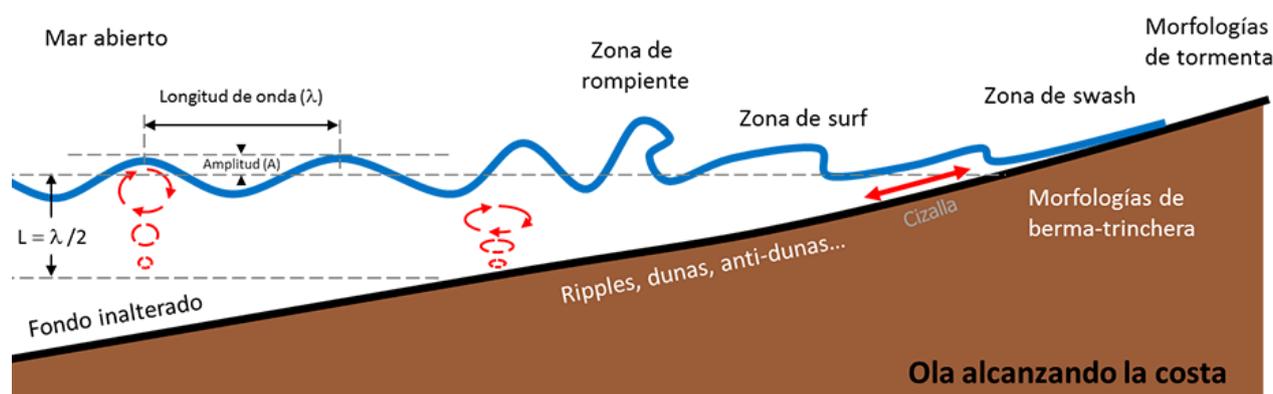


Figura 2. Esquema simplificado de una ola común aproximándose a la costa y distintas zonas de la playa de acuerdo a la forma de las olas. En rojo, el movimiento de una partícula en el agua.

En el mar, las olas están provocadas principalmente por el viento y por el efecto de la atracción gravitatoria de los cuerpos cercanos, el sistema Sol-Tierra-Luna. En números redondos, las olas del Océano Atlántico tienen una longitud de onda de unos 90 metros y, en el Pacífico, de unos 300 m. Pues bien, un tsunami, a diferencia de otros tipos de perturbaciones oscilatorias en masas de agua, tiene una longitud de onda del orden de las decenas de kilómetros. Mientras que una ola común tiene un periodo del orden de 15 segundos, un tsunami tiene periodos típicos del orden de 10 a 30 minutos⁸, o incluso más. Dado que la profundidad media de los océanos es de unos 3.000 metros, un tsunami afecta o moviliza toda la columna de agua del océano, o casi toda.

A medida que una ola se acerca a la costa se sobre-eleva, rompe y después progresa como una lámina hacia el interior (figura 2) aunque todo ello está en función, además de las características de la ola, de la geometría de la costa, incluyendo la parte emergida y la sumergida. El hecho de que las olas se deformen y rompan proviene de la imposibilidad del agua de seguir un patrón circular cuando la profundidad es menor que la mitad de longitud de onda. Tanto es así, que llega un momento en el que la oscilación se puede simplificar a un movimiento paralelo al fondo, en cizalla. Un tsunami, por este motivo, es más parecido a una zona de *swash* (o de esparcimiento) que a una ola propiamente dicha, y su avance tierra adentro sigue una oscilación (más o menos) paralela al relieve (si ignoramos la turbulencia). Cuando predomina el movimiento del agua hacia tierra, se dice que el tsunami está en avance (o en *run-up* en inglés) y cuando predomina el movimiento del agua hacia el mar se dice que el tsunami

(8) Bryant, E. (2008): *Tsunami, the underrated hazard*. Springer Praxis Books / Geophysical Sciences. Segunda edición. ISBN: 978-3540742739.

está en retroceso, en resaca (o en *backwash* en inglés). Mientras que en avance el proceso es decelerado (en contra de la gravedad y sobre una superficie no inundada y, por tanto, de alta fricción), en resaca el proceso es acelerado (a favor de la gravedad y moviéndose sobre una superficie inundada); por lo que un tsunami en resaca es igual o más peligroso que en avance.

Mar adentro, en zonas profundas, la altura de un tsunami es muy pequeña, de unos pocos centímetros, y se desplaza muy rápido, comparable a la velocidad de un vuelo comercial (8) (unos 900 km/h). Sin embargo, a medida que se acerca a la costa, por este efecto de no poder desarrollar el movimiento oscilatorio, la altura del tsunami se va haciendo cada vez mayor. La perspectiva de un tsunami desde tierra es parecida a un aumento súbito del nivel del mar, que progresa hacia tierra a una velocidad parecida a la de un caballo a galope (8) (casi 40 km/h). En definitiva, un tsunami puede provocar inundaciones costeras cuyo poder destructivo radica tanto en la velocidad con la que se desplaza el agua como en el volumen de agua y el número de veces que se repite, ya que no es “una ola” sino “un tren de olas” o una sucesión de olas. A esto hay que añadirle que a medida que el flujo avanza se va enriqueciendo en sedimentos (rocas, arena) y todo tipo de objetos (coches, residuos, troncos y restos vegetales) que se añaden a su capacidad para causar daños.

3. Desencadenantes de los tsunamis

A estas alturas llega la pregunta de qué provoca un tsunami. En la base de datos de la NOAA² ya se apuntan algunos de los procesos que con mayor asiduidad dan lugar a tsunamis, que en orden de frecuencia serían: los terremotos, los movimientos de ladera y las erupciones volcánicas. Pero en realidad, cualquier fenómeno que tenga capacidad para desplazar un gran volumen de agua en poco tiempo será capaz de generar un tsunami.

3.1. Tsunamis provocados por terremotos

Los terremotos son un fenómeno muy habitual, de hecho, están ocurriendo constantemente, pero sólo detectamos los que están en el rango de medición de los instrumentos. En promedio, al año se registran en el mundo más de un millón de terremotos de magnitud Mw⁹ superior a 2. A medida que la magnitud es mayor, la frecuencia decrece rápidamente. Cada año se registran, de media, unos 20 terremotos 7 Mw o mayores (figura 3).

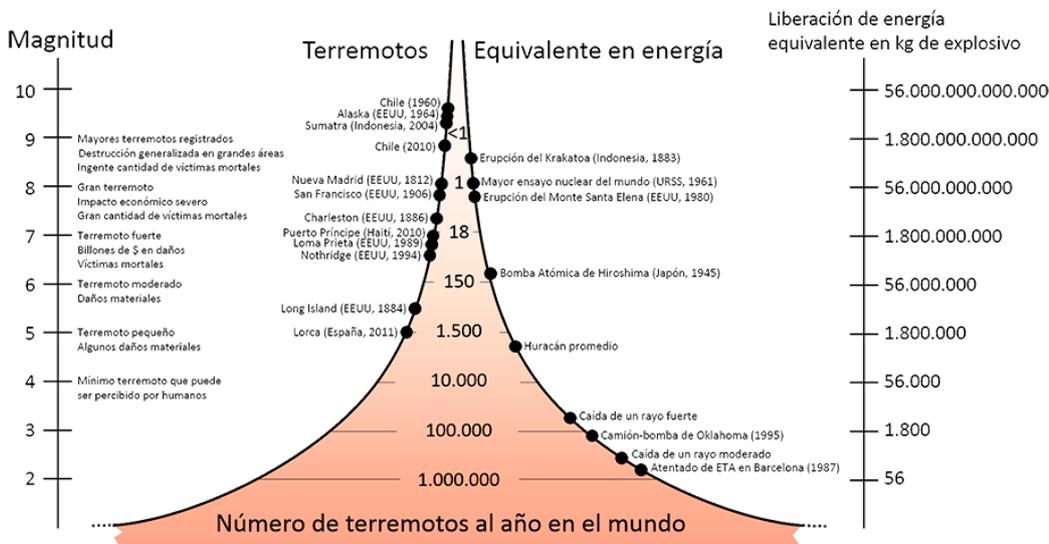


Figura 3. Relación entre el número de terremotos y su magnitud con un equivalente en energía liberada (en kg de trinitrotolueno o TNT)¹⁰.

(9) La escala sismológica Magnitud Momento (Mw) es la más utilizada en la actualidad por los servicios sismológicos del mundo.

(10) Modificado de *Incorporated Research Institutions for Seismology* (2018). <http://www.iris.edu>

Para que un terremoto provoque un tsunami, es necesario que se manifieste deformación con componente vertical en la superficie del fondo de la masa de agua (figura 4). Los terremotos en zonas de fallas convergentes o divergentes (mecanismo focal de falla inversa o normal) son más propensos a dar lugar a tsunamis que aquellos que se producen en zonas de fallas transformantes (o transcurrentes), ya que un mecanismo de falla inverso o normal implica una deformación mayoritaria en la componente vertical, mientras que las fallas transformantes implican deformación sobre todo en la componente horizontal. No obstante, como la deformación de las rocas por un terremoto es finita, los terremotos profundos (con hipocentro a más de 100 km) no pueden dar lugar a tsunamis, aun siendo de gran magnitud, pues la deformación no llega a ser significativa en el fondo de la masa de agua.

Dado que la profundidad es un aspecto tal vez más crítico que el mecanismo focal, un mapa de la distribución de terremotos por profundidad permite dar una idea preliminar de las zonas más propensas a generar tsunamis desencadenados por terremotos, que delimitan bastante bien los contornos de las placas tectónicas. Según el catálogo del Centro Sismológico Internacional, la gran mayoría de terremotos se producen a una profundidad inferior a 50 km (figura 5) y éstos ya sí podrían ser generadores de tsunamis si su magnitud fuera importante. No obstante, la mayoría de los terremotos más superficiales son de mecanismo predominantemente transformante. Por este motivo los tsunamis de origen sísmico no son tan frecuentes como los terremotos superficiales.

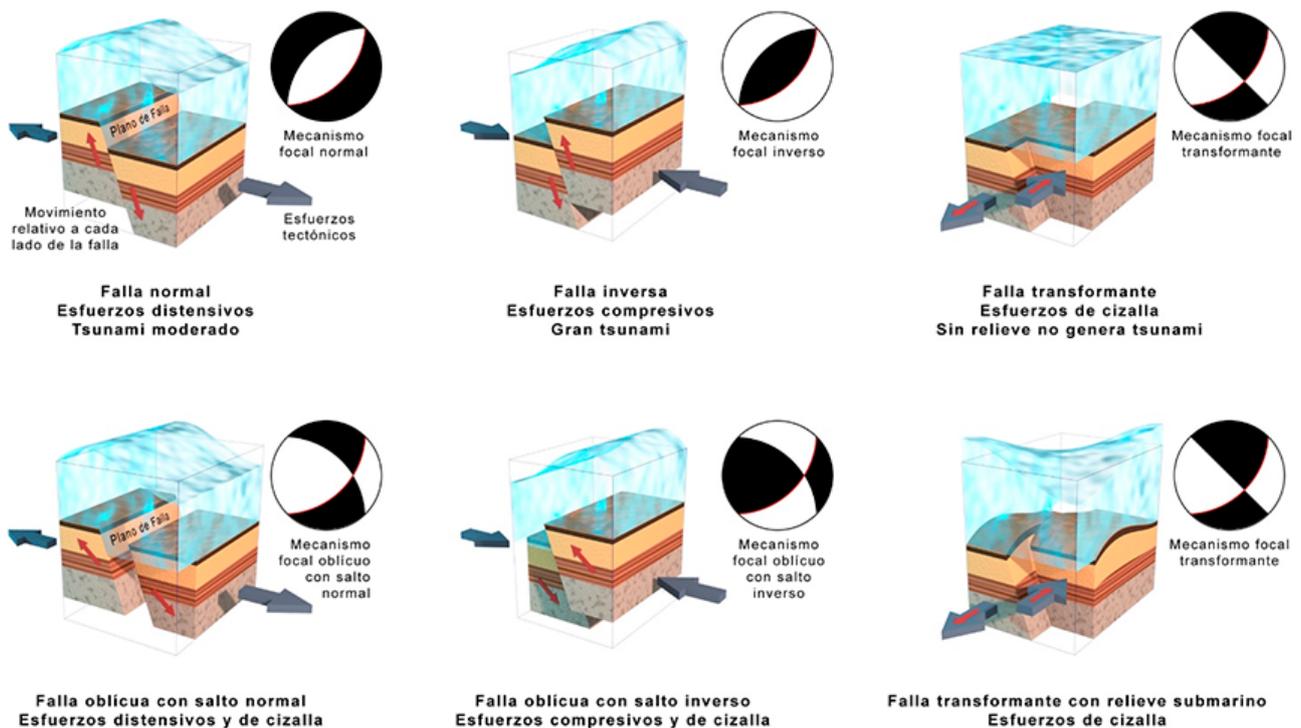


Figura 4. Los mecanismos focales de un terremoto (círculos con zonas negras y blancas) describen de forma gráfica la matriz numérica que caracteriza el movimiento relativo de dos bloques que se separan por una falla¹¹, remarcada con una fina línea roja a efectos didácticos. La indicación del “tamaño” del tsunami es meramente orientativa, a igualdad de otros factores, y sin considerar efectos secundarios de un terremoto (como deslizamientos submarinos o costeros).

(11) Ilustrador: Cristóbal Aparicio Barragán; reinterpretando de IGEO (<http://www.igeo.ucm-csic.es/>).

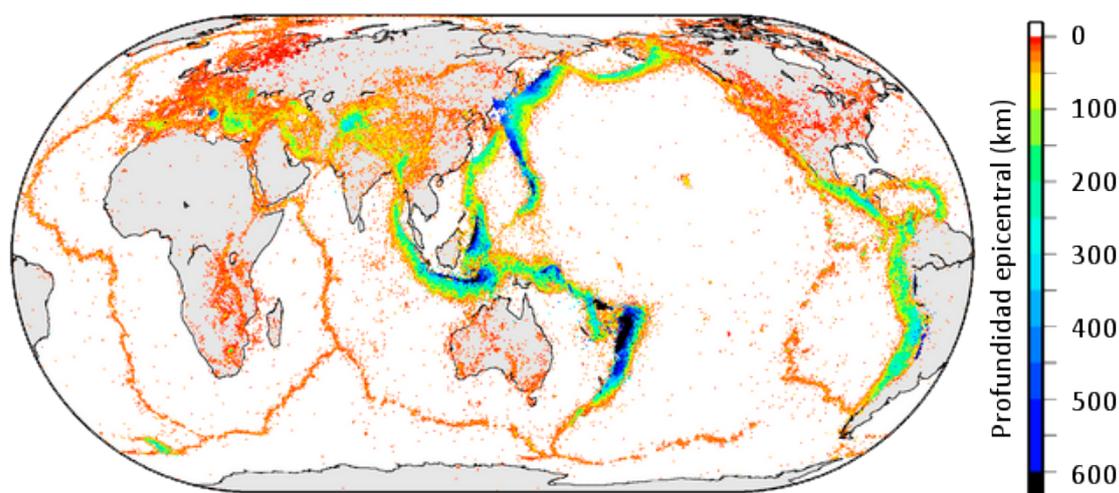


Figura 5. Distribución de los terremotos del mundo representando el color la profundidad del hipocentro. Modificado del Centro Sismológico Internacional.¹²

En principio, la idea de que para generar un tsunami es necesario deformación de la corteza con componente vertical suena bastante obvia. Un experimento casero rudimentario demuestra que una variación vertical brusca en el fondo de un cubo con agua genera olas en la superficie. Sin embargo, un terremoto no sólo puede deformar la corteza por un salto vertical, también puede desplazar el fondo oceánico una falla transformante si el relieve es lo bastante complejo y abrupto como para que un frente vertical se vea desplazado. Es la primera de las dos hipótesis que a día de hoy se barajan como posible causa del reciente tsunami de Indonesia¹³ del 28 de septiembre de 2018. La segunda hipótesis que se plantea para la generación de este tsunami (con unas 2.000 víctimas y unos 5.000 desaparecidos) es que el terremoto haya desencadenado un deslizamiento submarino y éste, a su vez, haya generado el tsunami¹³. Dos casos claros de estudio de deformación de la corteza con salto vertical son el tsunami de Sumatra del 26 de diciembre de 2004 (con varios centenares de miles de víctimas) y el terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011 (con decenas de miles de víctimas). Ambos con mecanismo focal de falla inversa. Este tipo de ruptura, la inversa o compresiva, es la que puede dar lugar a tsunamis con mayor facilidad, ya que la energía que pueden acumular las rocas en compresión es mucho mayor que la energía que acumulan en tracción y, por tanto, a igualdad de otros factores, la extensión de la zona de deformación suele ser mucho mayor que en los mecanismos normales o transformantes.

Durante el encuentro internacional de expertos en fuentes tsunamigénicas, celebrado en la Universidad de Málaga los días 6 y 7 de noviembre de 2017,¹⁴ se identificaron tres zonas probables y capaces de generar tsunamis con potencial impacto significativo en las costas españolas. Se trata del área del golfo de Cádiz *sensu lato* (donde se originó el terremoto y tsunami de Lisboa de 1755), el Mar de Alborán (donde hay abundante actividad sísmica) y el margen norte de África (de donde se originó el primer registro de tsunami sismogénico el 21 de mayo de 2003 con daños económicos, sobre todo en las Baleares, pagados por el Consorcio de Compensación de Seguros por un monto de unos 350.000 euros.¹⁵

(12) International Seismological Centre (<http://www.isc.ac.uk>), Thatcham, Reino Unido, 2018.

(13) Abdul et al. (2018): Finding of the unexpected tsunami due to the strike-slip fault at central Sulawesi, Indonesia on 28 September 2018, from the preliminary field survey at Palu. Ministerio de Asuntos Marinos y Pesqueros de Indonesia, International Research Institute of Disaster Sciences IRIDES, y universidades de Tohoku y Chuo (Japón). <http://irides.tohoku.ac.jp/>

(14) Expert meeting on tsunamigenic sources with potential impact in the Iberian coast, Balearic and Canary Islands - Málaga, 6-7 Nov 2017. Organiza: Área de Riesgos Geológicos del IGME y grupo EDANYA de la Universidad de Málaga.

(15) Espejo, F. (2017): El Consorcio de Compensación de Seguros y los tsunamis: La cobertura de los riesgos extraordinarios en España. *Expert meeting on tsunamigenic sources with potential impact in the Iberian coast, Balearic and Canary Islands*. Málaga, 6-7 Nov 2017.

3.2. Tsunamis provocados por movimientos de laderas

Los movimientos de ladera ocurren a modo de corolario de toda una secuencia de procesos geológicos. La fuerza que actúa en última instancia es la gravedad, ocasionando que una parte de una ladera se movilice pendiente abajo hasta una nueva situación de equilibrio. En laderas emergidas a veces es suficiente un cambio de humedad, el tránsito de un animal, el viento, la lluvia o un terremoto. La relación entre la magnitud de los terremotos y el área afectada por movimientos de ladera (AAML) es conocida desde hace décadas¹⁶ y se está progresando hacia conceptos más depurados como, por ejemplo, la relación entre la aceleración pico del suelo y el AAML¹⁷. Sea como fuere, que una masa de roca caiga en un cuerpo de agua puede provocar una gran ola. De hecho, el mayor tsunami jamás registrado en términos de altura alcanzada (el 9 de julio de 1958) fue provocado por un movimiento de ladera que terminó en la bahía de Lituya, en Alaska, generando una ola cuyo remonte (*run-up*) fue de más de 520 metros¹⁸. La simulación de este tipo de mega-tsunamis representa un reto para los modelos matemáticos y la única simulación numérica realizada con éxito, hasta el momento, en la geometría real de la Bahía de Lituya, corresponde al grupo de investigación en Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico y Aplicaciones de la Universidad de Málaga (grupo EDANYA¹⁹). Otro ejemplo imposible de obviar en toda introducción a los tsunamis es el de la presa de Vajont, en Italia, el 9 de octubre de 1963. La ladera que deslizó junto al embalse de Vajont, entró en la masa de agua a unos 100 km/h, generando una ola que sobrepasó la represa (de 262 m de alto) liberando 30 millones de metros cúbicos cauce abajo²⁰. Se cobró cerca de 2.000 víctimas.

A diferencia de los tsunamis provocados por terremotos, los provocados por movimientos de ladera afectan a una extensión menor y se consideran, por tanto, tsunamis locales. Este criterio puede ser utilizado para discernir, al menos en parte, el origen de un tsunami cuando su fuente es submarina. Sin embargo, dado que la correlación entre terremotos y movimientos del terreno en zonas emergidas es conocida, cabe pensar que exista también una correlación entre los terremotos y los deslizamientos submarinos, por lo que la génesis de muchos tsunamis puede ser una intrincada combinación de ambos efectos. Otros fenómenos de naturaleza co-sísmica, como la licuefacción de suelos, podrían también constituir desencadenantes de movimientos de ladera, incluidos los submarinos.

En realidad, no fue hasta el evento de Papúa Nueva Guinea del 17 de julio de 1998 (un terremoto y deslizamiento submarino) cuando se comenzó a considerar seriamente el efecto de los deslizamientos submarinos como causa significativa de tsunamis²¹. Este tsunami se cobró más de 2.000 víctimas. Como consecuencia, se desarrollaron campañas de investigación batimétricas para describir mejor el fondo marino y los depósitos del deslizamiento, mejorando desde entonces el reconocimiento y la cartografía de otros eventos similares. De hecho, la hipótesis de un gran deslizamiento asociado al flanco volcánico de la isla de La Palma, en el archipiélago canario, donde existen registros de multitud de mega-deslizamientos²², tuvo una gran repercusión mediática. Sin embargo, el estudio de este tipo de deslizamientos apunta a que su frecuencia es del orden de las decenas de miles de años, relacionados con los procesos volcánicos de desarrollo de los edificios volcánicos.

En España (y en otras regiones volcánicas próximas) la probabilidad de que se desarrolle un mega-deslizamiento es muy pequeña, por lo que tiene más interés desde el punto de vista científico que desde la perspectiva de plani-

(16) Keefer DK (1984): *Landslides caused by earthquakes*. Geol. Soc. of Am. Bull. 95:406–421.

(17) Tiwari, B. y Ajmera, B. (2017): *Landslides Triggered by Earthquakes from 1920 to 2015*. En: Mikos, M. et al. (eds): *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017. Springer, Cham.

(18) Miller, J. (1960): *The Alaska earthquake of July 10, 1958: Giant wave in Lituya Bay*. Bulletin of the Seismological Society of America ; 50 (2): 253–266.

(19) González-Vida J.M. et al. (2018): *The Lituya Bay landslide-generated mega-tsunami, numerical simulation and sensitivity analysis*. Natural Hazards and Earth System Sciences. En revision. <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-224>.

(20) Ward, S.N. y Day, S. (2011): *The 1963 landslide and flood at Vajont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation*. Ital. J. Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.), Vol. 130, n.1 (2011) pp 16-26. DOI: 10.3301/IJG.2010.21

(21) Tappin, D. R. (2017): *Tsunamis from submarine landslides*. <https://doi.org/10.1111/gto.12200>

(22) Carracedo, J. et al. (2009): *Megadeslizamientos en las Islas Canarias*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009. (17.1) 44-56. ISSN: 1132-9157.

ficación. Al menos, así se concluyó durante la reunión internacional de expertos de 2017 celebrada en la Universidad de Málaga¹⁴. Durante este encuentro también se concluyó que la posible ocurrencia de deslizamientos más pequeños y próximos a núcleos de población sí podría generar impactos localmente significativos. No obstante, las laderas de los volcanes italianos Etna y Stromboli llevan décadas siendo monitorizadas con el doble propósito de vigilancia volcánica y de mega deslizamiento vinculado también a la ocurrencia de tsunamis²³.

3.3. Tsunamis provocados por erupciones volcánicas

Los procesos volcánicos incluyen muchos tipos de fenómenos diferentes y la mayoría de ellos implican o pueden implicar una movilización de un gran volumen de material. Entre estos procesos están los deslizamientos, las explosiones o los flujos de piroclastos. El evento volcánico y ulterior tsunami más conocido tal vez sea el de la isla de Krakatoa, que el 27 de agosto de 1883 culminaba su erupción con una explosión generalizada del edificio volcánico. Gran parte de la isla desapareció como consecuencia de esa explosión. 296 ciudades fueron destruidas y perecieron unas 36.000 personas, más del 90% como consecuencia del tsunami²⁴. La energía que se calcula que liberó esta explosión se compara con unas 10.000 bombas atómicas como la arrojada sobre Hiroshima¹⁰. En comparación con los tsunamis provocados por terremotos, los provocados por volcanes representan del orden del 5% en los registros actuales². No obstante, de nuevo se puede plantear la no-completitud de los registros, pues es muy complicado realizar observaciones de este tipo de fenómenos. Existen unos 60 registros de tsunamis provocados por volcanes² durante el siglo XX. Algunos autores²⁴ reconocen hasta ocho mecanismos por los que un volcán puede provocar un tsunami, a saber: explosiones submarinas; flujos piroclásticos; lahares; terremotos de origen volcánico; movimientos de ladera; colapso de frentes de lava en la zona costera; colapso por subsidencia de calderas volcánicas; y ondas expansivas o de choque por explosiones en áreas emergidas. De ellos, parece ser que el más frecuente sería el provocado por explosiones submarinas.

En España, las Islas Canarias son la única región volcánicamente activa, pero no existe hasta la fecha ningún estudio que permita establecer un vínculo creíble (o útil a efectos de planificación) entre la probabilidad de erupción y la probabilidad de que ésta genere un tsunami; al menos más allá del colapso de los flancos mencionado en el apartado de movimientos de ladera (caso de la Isla de La Palma). Por otra parte, otros volcanes que podrían generar tsunamis (aunque es discutible que llegaran a afectar a las costas españolas) son el Etna, las Azores, el Stromboli (que el 30 de diciembre de 2002 generó un evento de este tipo²³ u otros aún más lejanos.

3.4. Tsunamis provocados por cambios en la presión atmosférica

En el archipiélago Balear, las inundaciones costeras provocadas por fenómenos atmosféricos son relativamente comunes y por ello, reciben un nombre propio: *rissagas*. En la prensa y en la literatura científica se han rebautizado como *meteotsunamis*, un término que se está popularizando. La última *rissaga* que afectó a las costas españolas ocurrió el pasado 15 de julio de 2018 y golpeó sobre todo al puerto de Alcudia. Hasta mediados de 1930, se pensaba que este tipo de oscilaciones extraordinarias (de mayor rango que las marejadas) respondían a configuraciones astronómicas, al igual que las mareas. Surge entonces un trabajo²⁵ que correlaciona los cambios de presión atmosférica con la generación de estos ascensos o descensos del nivel del mar, y que se ha ido depurando después ampliamente en la literatura científica. El fenómeno está actualmente descrito como una respuesta de amplificación de las oscilaciones en el mar y las oscilaciones atmosféricas²⁶, que genera perturbaciones que, a escala temporal y espacial, son mucho más cercanas a las de un tsunami que a las de otro tipo de fenómenos

(23) Michieli Vitturi, M. et al. (2018): *Modelling and numerical simulations of tsunami waves generated by landslides at Stromboli volcano (Aeolian islands, Italy)*. Geophysical Research Abstracts. Vol. 20, EGU2018-18885, 2018.

(24) Paris, R. et al. (2013): *Volcanic tsunami: a review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia* (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea). Natural Hazards. DOI 10.1007/s11069-013-0822-8.

(25) Nomitsu, T. (1935): *A theory of tsunamis and seiches produced by wind and barometric gradient*. Mem. Coll. Sci. Imp. Univ. Kyoto A,18(4), 201-214.

(26) Lin, L.C. y Liang, M.C. (2017): *Meteotsunamis produced by high frequency atmospheric pressure forcing*. doi: 10.3319/TAO.2017.03.20.01. Terr. Atmos. Ocean. Sci.

costeros con potencial para causar daños (como tormentas u ondas estacionarias o *seiches*²⁷). Es decir, se trata de un acoplamiento de una oscilación de fuerte gradiente barométrico en la atmósfera con las ondas en la superficie del mar de origen gravitatorio o provocado por fuertes vientos.

3.5. Tsunamis provocados por meteoritos

No es posible abordar los tsunamis sin, al menos, hacer una mención a este particular desencadenante. En primer lugar, hay que tener en consideración que de recibir el impacto de un meteorito, lo más probable es que ocurra en alguno de nuestros océanos, pues ocupan el 70% de la superficie planetaria. De manera similar a un desprendimiento de roca, el impacto de un meteorito sobre una masa de agua puede provocar un tsunami, con la diferencia nada desdeñable de uno respecto a otro de la *hiper-velocidad* con la que llegan los meteoritos a la Tierra. Si los tsunamis de origen volcánico plantean dificultades en su observación, este tipo de eventos es aún más difícil de describir o caracterizar; de hecho, aún no hay ningún registro histórico fehaciente del tándem meteorito-tsunami, pero se presupone que el evento de impacto meteorítico al que se atribuye la extinción masiva de hace unos 65 millones de años, pudo haber generado un gran tsunami. La simulación de este tipo de eventos se suele hacer de manera similar al de una explosión puntual²⁸, lo que permite aproximar mejor las ondas de choque que provocaría la llegada de un meteorito a hipervelocidad. Por ahora, estos ejercicios tienen interés científico, pero haría falta mejorar nuestra capacidad de detección de cuerpos celestes para poder dar una cifra creíble sobre la probabilidad de este tipo de impactos.

4. La simulación de tsunamis

Todo estudio de peligros naturales se hace con un único objetivo: minimizar los impactos indeseados de su ocurrencia (figura 6). Dado que la predicción de muchos eventos naturales no es posible, se recurre a diferentes técnicas o estrategias para su evaluación, que pueden incluir el uso de datos históricos o geológicos con traslado, tal cual, a la situación actual o mediante herramientas de generación de escenarios con estimación de probabilidad de ocurrencia, lo que implica necesariamente el uso de técnicas de simulación.

A la hora de evaluar el impacto de un peligro natural es necesario establecer algunas hipótesis de trabajo y, en particular, resulta útil asociar la probabilidad del desencadenante a la probabilidad de la ocurrencia del peligro natural. Con ello se despreja la variabilidad en los resultados debidos a cambios en otras variables y, por ello, se requiere una actualización continua de este tipo de estudios. Dado que la cantidad de desencadenantes de un proceso natural y, en particular de los tsunamis, puede ser muy variada, cualquier aproximación centrada en un único desencadenante infravalora el peligro real de la ocurrencia del fenómeno. No obstante, con los datos disponibles hoy en día se puede aproximar bastante si se centra el caso de estudio en la causa más probable (o más probada), que para los tsunamis son los terremotos. Otra forma de abordar un peligro natural es simular un evento previo conocido, partiendo de la hipótesis de que "si ha ocurrido en el pasado, podría volver a ocurrir en el futuro". En sentido estricto esta hipótesis es buena si los procesos son cíclicos (como la evaporación y precipitación de agua) pero para procesos no-cíclicos (como los movimientos de ladera o los terremotos) la hipótesis pierde validez en favor de una aproximación más probabilista. Incluso en casos de inundación por precipitación extrema, si bien el desencadenante es un proceso cíclico, no lo es su resultado, la inundación, pues los cambios morfológicos del cauce y los cambios que ocurren a nivel de cuenca dan como resultado inundaciones diferentes para precipitaciones idénticas en distintos momentos. Es por ello que la validez de este tipo de estudios se suele acotar a un futuro próximo, que para las inundaciones fluviales es de seis años según la Directiva Europea de Inundaciones²⁹.

(27) Vilibic, I. et al. (2016): *Modern approaches in meteotsunami research and early warning*. Front. Mar. Sci., 3, 57, doi:10.3389/fmars.2016.00057.

(28) Wünnemann, K. y Weiss R. (2015): *The meteorite impact-induced tsunami hazard*. Phil.Trans.R.Soc. A373: 20140381. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0381>

(29) Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>

La dificultad de trabajar con terremotos como desencadenantes de tsunamis, es decir, con epicentro en una masa de agua, radica en que sus características no se suelen estimar con el mismo nivel de incertidumbre que los terremotos continentales. Esto se debe a la distribución de los sismógrafos, ubicados en su inmensa mayoría en tierra por razones obvias del coste de mantenimiento y a que se puede caracterizar mejor un terremoto con epicentro en terreno emergido por medio de estudios complementarios (geológicos e incluso históricos en proximidad con poblaciones). La falta de estudios de geología marina enfocados a la caracterización de las fuentes sísmicas tsunamigénicas es por tanto un reto que debe abordarse para reducir la incertidumbre. Entre tanto, muchas de las fuentes se caracterizan de acuerdo al estado de conocimiento actual, que se centra sobre todo en los registros sísmicos instrumentales y en la información derivada de las campañas oceanográficas, que a estos efectos aportan información de tipo batimétrico y geofísico. Con esta información se delimitan y caracterizan las propiedades de las fuentes y se calcula su probabilidad de ruptura asociada a la magnitud y a la profundidad epicentral.



Figura 6. Efectos del tsunami de Japón (2011).

Fuente: AFP/GETTY.

4.1. La deformación cortical como origen de un tsunami

Dado que la mayor incertidumbre en el estudio de tsunamis es su fuente y debido a que es muy caro el estudio de las fuentes sismo-tsunamigénicas marinas (que implica trabajos oceanográficos intensivos), reducir las incertidumbres que sí se pueden controlar adquiere especial relevancia. Por ello, a nivel mundial existen iniciativas de *benchmarking*, una especie de competición de validación de casos de estudio, tanto reales como de laboratorio, para poner a punto los modelos de cálculo. Estos ensayos los lidera y dirige la NOAA en su Programa Nacional de Mitigación del Peligro de Tsunamis (más conocido por sus siglas, NTHMP del inglés *National Tsunami Hazard Mitigation Program*) que establece los requisitos o estándares a cumplir.

La fuente tsunamigénica, cuando es de origen sísmico, se suele aproximar siguiendo el modelo de Okada³⁰, que se apoya en la teoría de elasticidad para dar lugar a la deformación cortical que, en primera instancia, da lugar al tsunami.

A partir de este modelo se deriva la deformación cortical que da lugar a la “condición inicial”, es decir, a la situación de deformación de la superficie libre del mar que genera el tsunami. De aquí en adelante queda simular la evolución de la onda inicial, primero en mar abierto para, finalmente, recrear su impacto en la costa.

4.2. La simulación de flujo del tsunami en mar abierto

Simular flujos es, posiblemente, uno de los mayores retos de la ciencia moderna, a pesar de que las ecuaciones que describen su movimiento son de principios del siglo XIX. A estas ecuaciones se las conoce como “ecuaciones de Navier-Stokes” (ENS) en honor a sus padres, el francés Claude-Louis Henri Navier y el irlandés George Gabriel Stokes. Se derivan de tres de los más importantes pilares de la ciencia, la Ley de Conservación de la Masa (Ley de Lomonosov-Lavoisier) la Ley de Conservación del Momento (Segunda Ley de Newton) y la Ley de Conservación de la Energía (Primera Ley de la Termodinámica). Las ENS no tienen solución unívoca conocida a día de hoy (salvo para casos particulares y sencillos) y existe toda una rama dedicada a su aproximación mediante métodos numéricos con la ayuda de computadores, conocida como CFD (*Computer Fluid Dynamics*, o dinámica de fluidos computacional)³¹. Una de las aproximaciones (simplificaciones) más socorrida para simular agua (y otros fluidos newtonianos) es utilizar las ecuaciones “no lineales de aguas someras” (en inglés *Non-Linear Shallow Water Equations*, NLSWE) o Ecuaciones de Saint-Venant (en honor a su desarrollador, el francés Jean Claude Barré de Saint-Venant).

Para el caso de flujos encauzados (como el agua de un canal) se puede simplificar el movimiento del agua considerando que, para una sección en particular del cauce, el flujo sigue un único vector de dirección (simulación uni-dimensional). Para el caso de los tsunamis, la aproximación puede ser unidimensional (en perfiles) pero se desprecian los efectos relacionados con la interacción de las ondas durante su aproximación a la costa y debidas a su geometría, así como los efectos anidados de las reflexiones y difracciones de las ondas. Con ello se elimina toda posibilidad de evaluar efectos de amplificación costeros, que son críticos para explicar muchas circunstancias de un tsunami. A pesar de ello, la aproximación 1D es muy apropiada para abordar casos de estudio generalizados (o donde no sea posible realizar otro tipo de aproximaciones) siempre que se realice por especialistas de primer orden aportando resultados confiables³², que pueden llegar a ser contrastados con modelos físicos reducidos a escala. Las aproximaciones bi-dimensionales consideran que, para un punto cualquiera del dominio de cálculo, el agua puede desplazarse en cualquier dirección de un plano. La diferencia en términos computacionales de un modelo 1D a un modelo 2D es de varios órdenes de magnitud de diferencia, tanto en demanda de datos como en tiempo de cálculo. En un ordenador convencional, una simulación puede tardar semanas en completarse dependiendo, sobre todo, del tamaño y resolución del dominio de cálculo. La simplificación a un modelo 3D, incrementa a su vez la complejidad otro tanto, y a día de hoy sólo se utiliza para casos de mucho detalle (en ningún caso a escala general o de cuenca) y, sobre todo, en el ámbito industrial (turbinas, motores, pilares de puentes, presas) a un coste computacional muy alto.

La literatura científica está repleta de ensayos de simulación de tsunamis, y no ha sido hasta tiempo reciente que la computación empieza a abandonar, de forma lenta y progresiva, el cálculo en CPU (*Central Processing Unit*, o unidad central de procesamiento) para ejecutarse en GPU (*Graphics Processing Unit*, o unidad de procesamiento gráfico) ganando con ello velocidades de cálculo en el orden de 100-200 veces más rápidas (debido a que la arquitectura de las GPUs permite realizar miles de operaciones sencillas simultáneamente, lo que hace posible la alta paralelización de determinados algoritmos de cálculo).

(30) Okada, Y. (1985): *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space*. Bulletin of the Seismological Society of America, 75: 1135:1154.

(31) Uno de los retos matemáticos del milenio, que sería premiado con un millón de dólares americanos, es probar la unicidad de solución de las ENS: <http://www.claymath.org/millennium-problems/navier-stokes-equation>

(32) Aniel-Quiroga, I. et al. (2018): *Tsunami run-up estimation based on a hybrid numerical flume and a parameterization of real topobathymetric profiles*. Natural Hazards and Earth System Sciences; 18, 1469–1491, 2018 <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1469-2018>

Uno de los modelos de simulación de tsunamis más avanzados, en cuanto a algoritmos precisos y computacionalmente eficientes, ha sido desarrollado en España por el grupo EDANYA³³ de la Universidad de Málaga. Este equipo de matemáticos ha estudiado e implementado decenas de esquemas numéricos, comparado sus resultados y tiempos de cálculo hasta seleccionar el código óptimo para la simulación numérica de tsunamis en el contexto de los Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis. Se trata del modelo de simulación *Tsunami-HySEA*, englobado en la familia de códigos HySEA³⁴ (*Hyperbolic Systems and Efficient Algorithms* o sistemas hiperbólicos y algoritmos eficientes), desarrollado en lenguaje CUDA para GPUs NVIDIA. La eficiencia de cálculo para resolver la propagación ha permitido reducir los tiempos de cálculo desde los días (o semanas) de los medios convencionales, a sólo algunos minutos e incluso, en la actualidad, a segundos con el uso de múltiples tarjetas NVIDIA de última generación (Teslas V100). Tanto es así, que este código ya ha sido integrado como módulo de cálculo en Sistema de Alerta Temprana en varios países, incluido el nuestro, aunque por cuestiones diversas, en España seguimos dependiendo de matrices de decisión y bases de datos pre-calculadas. Este sistema, desarrollado en la Universidad de Málaga, recibió el pasado mes de marzo el prestigioso galardón *NVIDIA Global Impact Award*, otorgado por primera vez en su historia a un organismo de investigación no-estadounidense y, además, ha superado los estándares requeridos por el NTHMP³⁵.

Pero para esta parte del estudio de los tsunamis, la propagación, solo se tiene en cuenta la deformación del fondo y su efecto en mar abierto. Al llegar a tierra, comienza la fase de cálculo de la inundación.

4.3. La inundación del tsunami

Aunque simular la inundación en tierra con modelos bidimensionales implica el uso de las mismas ecuaciones que la simulación en mar abierto, la demanda computacional es mucho mayor. Esto es debido a múltiples factores, entre los que se encuentran la divergencia y convergencia de flujos por la presencia de obstáculos en el terreno; a que se puede “secar” y “mojar” varias veces un mismo punto; pero sobre todo, a que la resolución necesaria para trabajar en la costa debe ser mucho mayor que en mar abierto. Por ejemplo, pasar de una resolución de 400x400 metros a 50x50 metros implica tardar unas 500 veces más; es decir, de 5 minutos a 2.560 minutos (casi dos días).

Cuando se habla de simulación de inundaciones, en realidad lo que se genera no es “una simulación”. Lo normal es que se hagan múltiples simulaciones, de manera que aquellos errores detectables en una simulación sean solventados en la siguiente y así sucesivamente hasta que las incertidumbres no sean significativas para los objetivos de cálculo. No es infrecuente que el proceso pueda implicar decenas de ensayos previos. Por si fuera poco, generalmente se simulan distintos escenarios y se repiten todas las simulaciones “finales” para comprobar la estabilidad del resultado, aplicando variaciones a distintos parámetros (análisis de sensibilidad).

El modelo *Tsunami-HySEA* utiliza una estrategia de mallas estructuradas anidadas sobre el mismo esquema de cálculo, de manera que la de menor resolución (nodos de cálculo más alejados o píxeles más grandes) realiza una computación más ágil y sirve para aportar la condición de contorno a la siguiente malla de mayor resolución y así sucesivamente según convenga. El mismo código numérico realiza ambas fases de la simulación: la propagación en mar abierto y la inundación costera, adaptando los algoritmos numéricos implementados en cada caso de manera adecuada. Esto representa una gran ventaja a la hora de su utilización en la práctica, ya que evita pasos intermedios de procesamiento de datos para la adaptación del modelo de propagación al de inundación.

(33) <https://www.uma.es/edanya/>

(34) <https://edanya.uma.es/hysea/>

(35) Macías, J. et al. (2017): *Performance benchmarking of Tsunami-HySEA model for NTHMP's inundation mapping activities*. Pure and Applied Geophysics, 1-37. doi: 10.1007/s00024-017-1583-1.

4.4. Datos necesarios para simular tsunamis de origen sísmico

Para poder construir un modelo de simulación de tsunamis de origen sísmico hacen falta muchos datos. Por un lado, es necesario contar con un catálogo de eventos sísmicos y con un catálogo de fallas activas. Luego, hace falta conocer los parámetros que definen la fuente sísmica, la falla, que se simplifica a un plano horizontal (figura 7). Por otro lado, se requiere de información del relieve emergido susceptible de ser inundado (topografía) e información del relieve sumergido (batimetría), así como un mapa de las distintas rugosidades al flujo en la parte emergida.

Para el caso de estudio de España, el catálogo de eventos sísmicos y la topografía los proporciona el Instituto Geográfico Nacional de forma libre y para todo el público vía web. En cuanto a las fallas activas, el Instituto Geológico y Minero de España proporciona, en acceso abierto, la Base de Datos sobre Fallas Cuaternarias Activas (QAFI, *Quaternary Active Faults of Iberia*), así como otras fuentes de información necesarias para comprender el marco tectónico regional (el mapa GEODE –geología digital continua de España y productos derivados o asociados). En cuanto a las fuentes sísmicas tsunamigénicas, aún se está trabajando para consensuar los parámetros. En cuanto a la batimetría, el Instituto Geológico y Minero de España pertenece a la red EMODnet (*European Marine Observation and Data Network*)³⁶ que genera coberturas batimétricas continuas lo más homogéneas y coherentes posible, utilizando datos de diversas campañas oceanográficas. La última versión disponible es de septiembre de 2018, con un píxel de 250x250 metros. Además, es necesario contar con batimetrías de la zona próxima a la costa a mayor resolución, que pueden obtenerse de distintos proveedores, como el Instituto Hidrográfico de la Marina, el Ministerio para la Transición Ecológica y proyectos de investigación oceanográfica (como el proyecto FAUCES³⁷, con socios de sobrado prestigio, como el Instituto Geológico y Minero de España, el Instituto de Ciencias del Mar [Centro Superior de Investigaciones Científicas], el Instituto Español de Oceanografía, la Universidad de Salamanca y la Comisión de Geología Marina de la Sociedad Geológica de España).

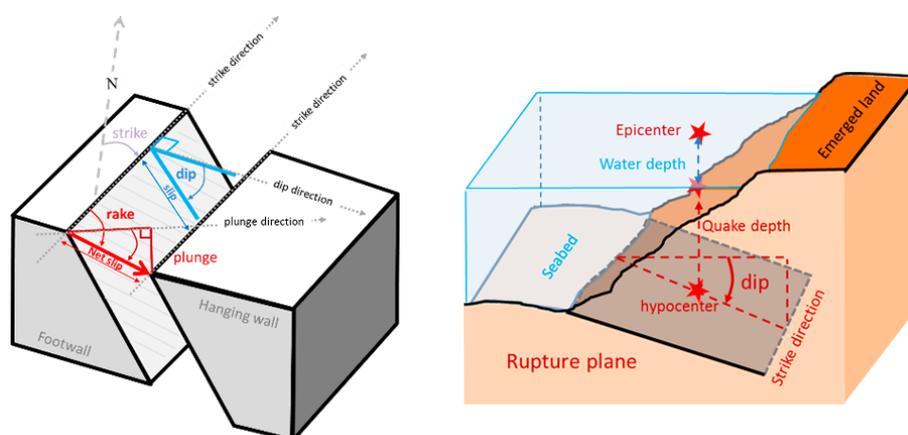


Figura 7. Datos necesarios para caracterizar la fuente sismo-tsunamigénica: coordenadas del epicentro (latitud, longitud); profundidad del hipocentro (km); salto neto de falla (*net slip*, metros); dirección y buzamiento del plano de falla (*strike direction*, *dip direction*, en grados medidos desde el Norte hacia el Este); dirección de cabeceo (*plunge direction*); ángulo de cabeceo (*rake*); y, finalmente, longitud y anchura del plano de falla (km).

4.5. Los resultados de las simulaciones de tsunamis

Uno de los cuellos de botella de toda simulación es la elección cuidadosa de las variables a obtener. A mayor cantidad de variables que se pida devolver al modelo, más se ralentiza el proceso de cálculo, pues se puede llegar a necesitar mucho tiempo en la escritura de grandes volúmenes de datos. Además, se requiere una gran inversión de tiempo en su post-procesado y presentación, de modo que resulte fácil de interpretar incluso para el

(36) <http://www.emodnet-bathymetry.eu/>

(37) <https://faucesproject.wordpress.com/>

público más experto. En todo caso, típicamente son objeto de interés las siguientes tres variables de la fase de propagación (figura 8 y figura 9):

- las alturas de ola en su proximidad a la costa, pues aportan un valor de referencia clave para estimar la “intensidad” esperable de un tsunami a lo largo de una costa;
- el tiempo de llegada de la primera ola (positiva o negativa) o de la ola más significativa (representa la ventana máxima disponible para toda acción de autoprotección y alerta temprana);
- registros mareográficos virtuales en puntos singulares (donde se puede observar la oscilación completa del tsunami a lo largo del tiempo).

En cuanto a la parte de inundación, típicamente se usan las siguientes variables (figura 10):

- la altura máxima de remonte del tsunami (o *run-up*, que proporciona la información sobre el límite afectado tierra adentro en términos de altitud sobre el nivel del mar que alcanza el tsunami a lo largo de la costa);
- la profundidad máxima del agua en cada punto inundado (lo que incluye implícitamente la extensión máxima o alcance máximo);
- la velocidad máxima del agua en cada punto inundado (si bien es cierto que es menos común que la profundidad porque el tratamiento es muy exigente; para empezar, implica dos valores por píxel: módulo en dirección este-oeste y módulo en dirección norte-sur y para continuar, su variabilidad espacial es muy grande);
- el flujo específico del agua en cada punto (que integra el concepto clásico de volumen de agua movilizado por unidad de tiempo en cada punto, con o sin indicación de dirección).

Todos estos parámetros se pueden obtener distribuidos en el tiempo, por ejemplo, al objeto de generar vídeos o material más detallado, pero dado que el volumen de los datos así expresado es muy grande, su procesado es muy lento.

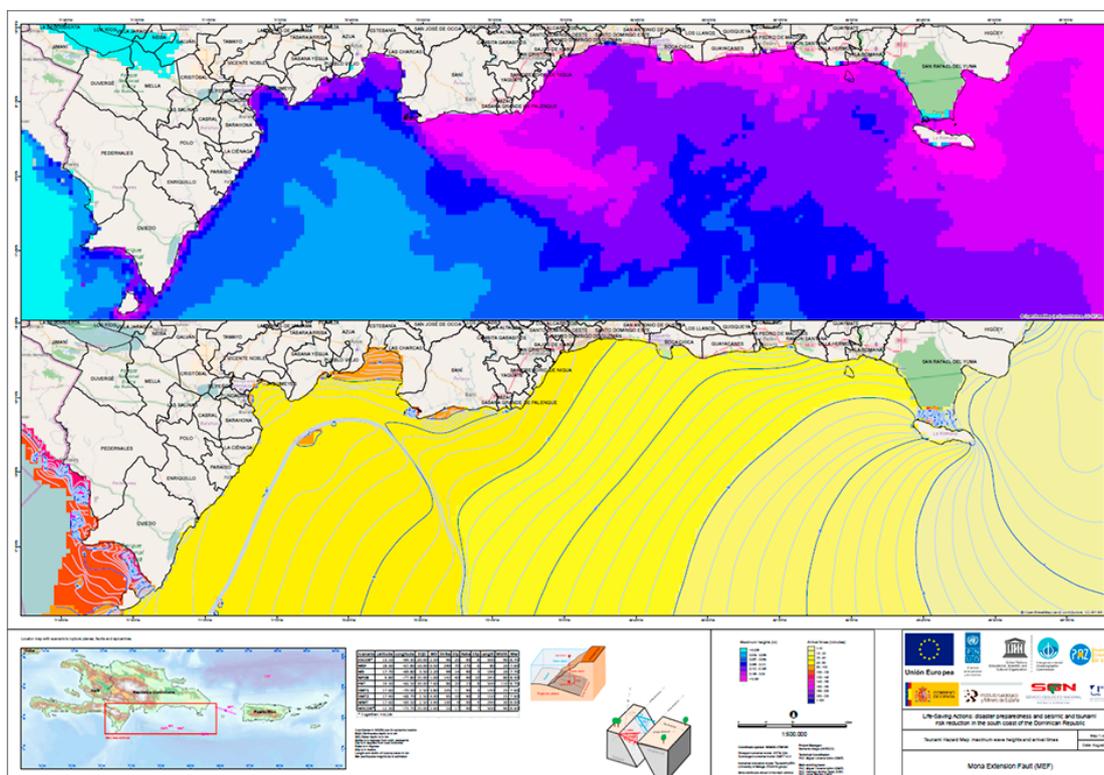


Figura 8. Ejemplo de mapa de tiempos de amplitud máxima de onda (arriba) y tiempo de llegada (abajo)³⁸.

(38) Llorente, M. (dir, 2016): Informe sobre mapas de peligrosidad por tsunami e índice de vulnerabilidad de infraestructuras para la costa Sur de la República Dominicana. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Servicio Geológico Nacional (SGN) y Universidad de Málaga (UMA). Contrato UNESCO 4500301291. Informe inédito.

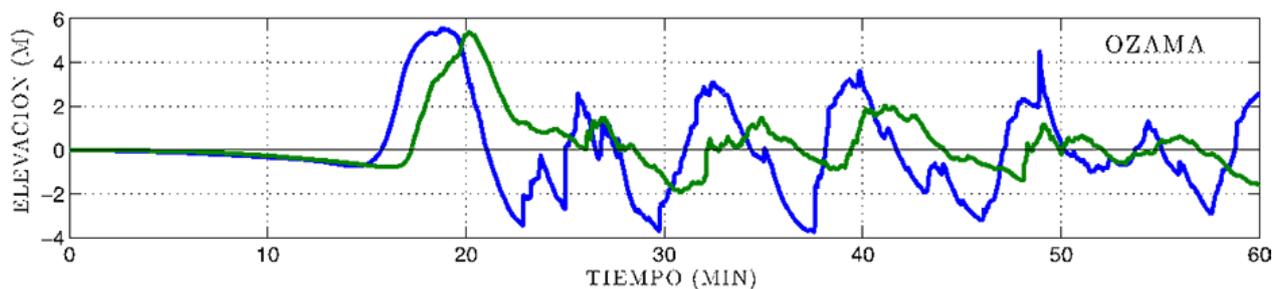


Figura 9. Ejemplo de registro mareográfico virtual en dos puntos ubicados antes y después de un espigón portuario³⁹.

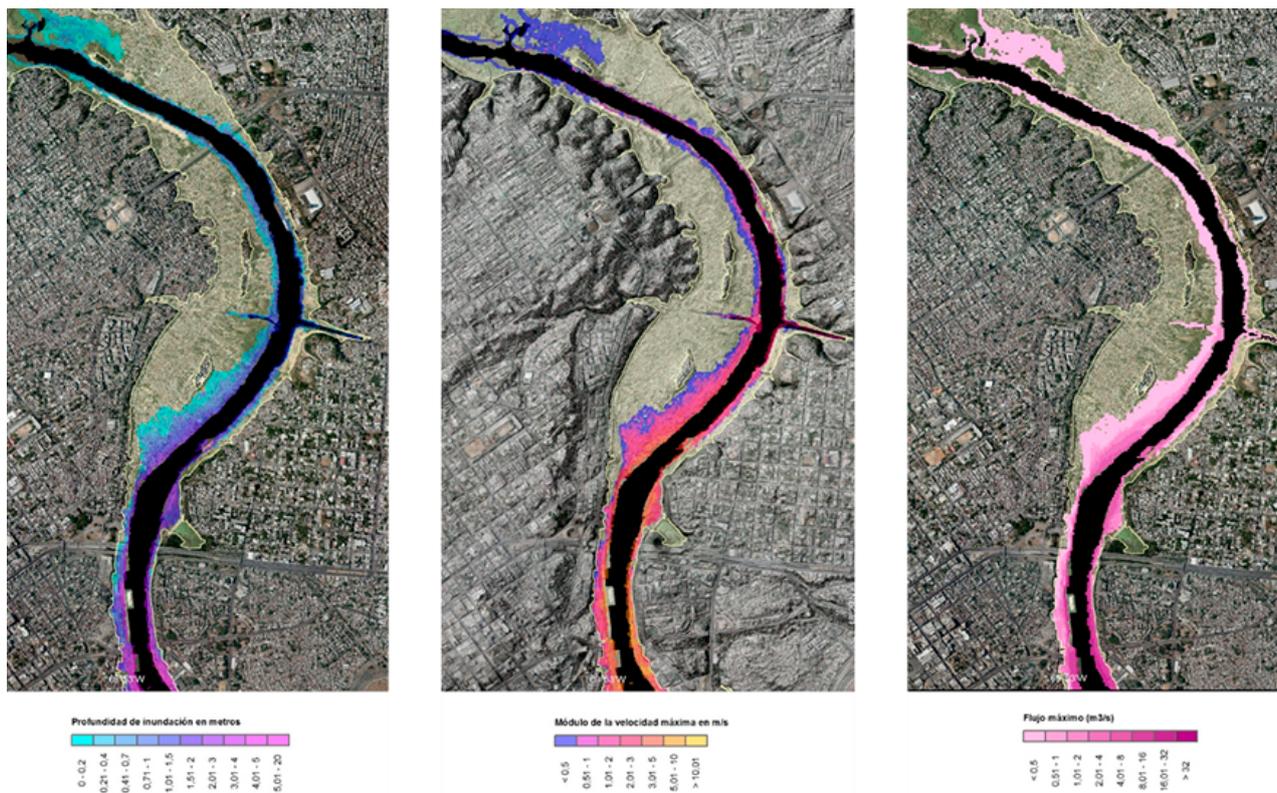


Figura 10. Ejemplo de tres parámetros (calado, velocidad y flujo) obtenidos mediante el modelo Tsunami-HySEA y post-procesados en un Sistema de Información Geográfica³⁹.

5. La evaluación del daño de un tsunami

Si se parte del concepto de tsunami como el de una inundación, se podría dar por válido el esquema clásico que correlaciona velocidad de flujo y profundidad (o calado, figura 11)⁴⁰ con la probabilidad binaria de daño. Pero los tsunamis plantean muchos retos adicionales. Si se tratara de un único flujo, como en el caso de una inundación, el esquema sería perfectamente aplicable, pero como ya se apuntaba en apartados anteriores, un tsunami tiene dos flujos como mínimo, el de avance y el de resaca. Si en avance un tsunami causa daños, los daños que causa el tsunami en resaca se añaden a los anteriores. Incluso esta hipótesis sería válida para el intervalo del espacio de alcance máximo de la ola más significativa (que no tiene porqué ser la primera), pero en los intervalos donde

(39) Llorente, M. (dir, 2016): Memoria de los trabajos de efectos co-sísmicos: licuefacción, movimientos del terreno y tsunamis; Proyecto: Estudio de la Amenaza Sísmica y la Vulnerabilidad Física del Gran Santo Domingo, República Dominicana. IGME.

(40) Martín Vide, J.P. (2006): Ingeniería fluvial. UPC. Barcelona. 331 pp.

alcanza la segunda ola más significativa, ya hay más de cuatro flujos. Por su parte, esta simplificación sería válida para tsunamis de origen lejano, pero para los tsunamis provocados por la causa más frecuente, los terremotos, y en caso de terremotos próximos a la costa, es posible esperar un cierto nivel de daños como consecuencia de la aceleración del suelo provocada por el propio terremoto. Tal y como se ha visto en el caso del reciente tsunami de Indonesia de 2018, los daños de un tsunami se pueden añadir a toda la cadena de efectos directos e indirectos de un terremoto: colapsos parciales o totales de infraestructuras (incapaces de soportar las cargas adicionales de la oscilación del suelo), licuefacción de suelos, movimientos de ladera (deslizamientos, desprendimientos), agrietamientos del suelo, y el sinfín de causas concatenadas (incendios, contaminación).

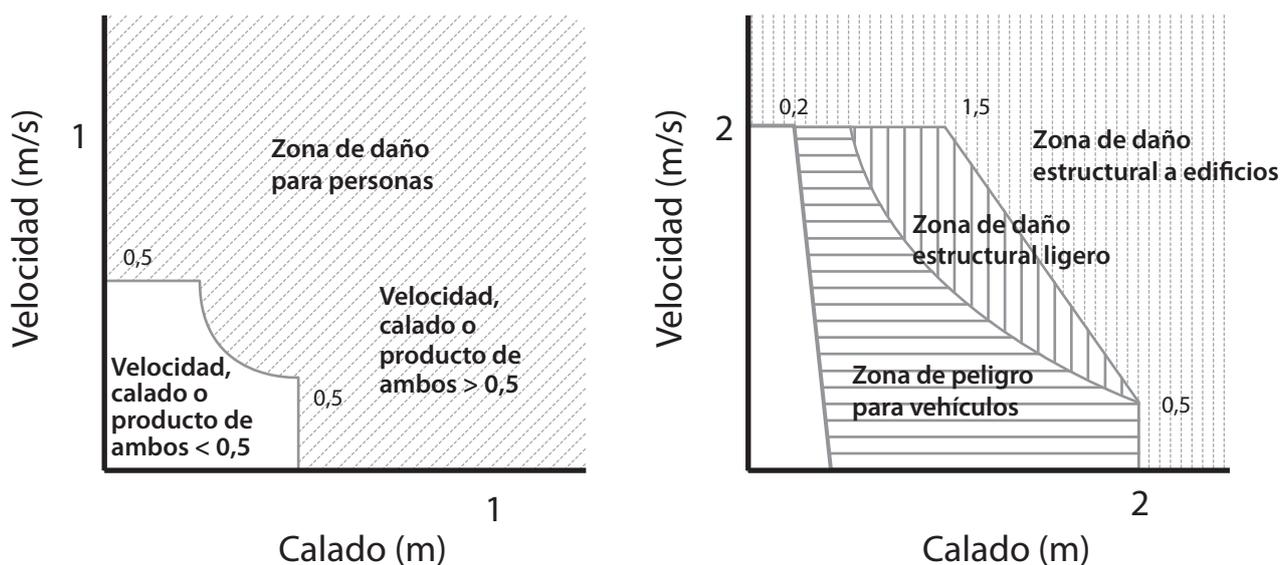


Figura 11. Esquema clásico de zonas de peligro para personas, vehículos e infraestructuras⁴⁰.

La aproximación cualitativa para la evaluación del riesgo por tsunamis más utilizada⁴¹ y que se pudo contrastar⁴² tras el terremoto de Sumatra de 2004, es objeto de multitud de variantes para su aplicación en distintos casos de estudio. Se trata del modelo PTVA-3 (*Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment*, o evaluación de la vulnerabilidad por tsunamis de Papathoma –el autor), que se expresa en forma del índice RVI (*Relative Vulnerability Index*, o índice de vulnerabilidad relativo). A pesar de que el autor original habla de *vulnerabilidad*, incorpora parámetros de peligrosidad (calado, orientación de la edificación respecto al flujo), por lo que en el mejor de los casos se trata de una vulnerabilidad específica, o incluso de riesgo relativo en el marco de los conceptos europeos de Zonas de Riesgos Naturales^{43 44}, que se apoya en los conceptos de la UNISDR⁴⁵.

Cabe señalar que para el caso de estudio en España, habría que revisar la validez de este modelo, y en particular para su integración en la aproximación general desarrollada por el IGME para el Consorcio de Compensación de Seguros⁴⁶ (CCS) a efectos de cálculo cuantitativo de pérdidas económicas. La interpretación cuantitativa de otros

((40) Martín Vide, J.P. (2006): Ingeniería fluvial. UPC. Barcelona. 331 pp.

41) Papathoma, M. et al. (2003): *Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete*. Natural Hazards and Earth System Sciences 3:377-389. EGU 2003.

42) Dominey-Howes, D. y Papathoma, M. (2007): *Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami*. Natural Hazards, 40: 113-136.

43) Tomas, R. et al (2015): *Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information*. Nat Hazards (2015) 78:1545-1563. DOI 10.1007/s11069-015-1786-7.

44) EC (2013): *INSPIRE data specs*. <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/nz>

45) UNISDR (2009): Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. 43 pp. UN, Suiza.

46) Llorente, M. (2015): GeoMEP. Modelo de evaluación de pérdidas por peligros geológicos. Aplicación al caso de las Islas Canarias. Madrid. 308 pp. IGME y CCS. NIPO: 720-15-133-1, DL: M-34018-2015.

trabajos similares podría ser particularmente útil en este sentido, como la *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*, del CCS⁴⁷.

6. Discusión

Del Área de Riesgos Geológicos del Instituto Geológico y Minero de España surgió a principios de los años 2000 una iniciativa para desarrollar estudios de riesgos geológicos que fue paralizada por falta de presupuesto, el Plan PRIGEO. Se buscaron apoyos y oportunidades y se alentaron iniciativas técnicas y científicas para el desarrollo de una herramienta que los técnicos y científicos estimamos “imprescindible” para un país moderno: cartografía de peligros naturales. Los principales peligros estaban considerados: las inundaciones, los terremotos, los movimientos de ladera y el volcanismo; y se hicieron varios esfuerzos por incluir otros peligros que por entonces eran menos conocidos fuera del sector técnico, como los tsunamis o las arcillas expansivas.

El primer peligro para el que Europa consiguió cuantificar y visualizar mediante una herramienta cartográfica fue el de inundación y ha sido solo gracias a la promulgación de la Directiva Europea de Inundaciones²⁹ que entró en vigor el año 2007 y a su ulterior implementación en las regulaciones nacionales. Menos de un año después, el IGME publicaba un manual técnico para la elaboración de mapas de inundaciones⁴⁸; y cuatro años después el MAPAMA publicaba la guía para elaborar el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables^{49, 50}.

Todo ello fue fruto de un importante esfuerzo previo de diferentes grupos de trabajo en los que el IGME y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCYE) pidieron, con insistencia, que se incluyeran los tsunamis como parte del análisis de los riesgos de inundación costeros. Pero los tsunamis quedaron explícitamente excluidos de la Directiva Europea de Inundaciones, de su transposición y relegados por completo. El tsunami de Sumatra de 2004 y el de Japón de 2011 dispararon el interés mundial por estos eventos y en la administración española creció el interés para abordar esta cuestión.

En 2015, se dio un importante paso en favor del estudio de los tsunamis en España: la DGPCYE publicaba la Directriz Básica correspondiente⁵¹, y dos años después en 2017, se presentaba el estudio cualitativo de las áreas de interés⁵², que destaca las costas Mediterráneas Peninsulares, el Golfo de Cádiz, Canarias y Baleares como áreas prioritarias frente a las costas gallegas y cántabras para abordar futuros trabajos.

(47) CCS (2017): Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones. https://www.consorseguros.es/web/documents/10184/48069/guia_inundaciones_completa_22jun.pdf

(48) Díez et al. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, 190 págs., Madrid. D.L. M-46538-2008; ISBN 978-84-7840-770-5; NIPO 657-08-026-2. Versión pdf: <http://www.igme.es/Publicaciones/publiFree/MapasPeligrosidad/Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones.pdf>

(49) MAPAMA (2011): Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. 324 pp. ISBN: 978-84-491-1136-5. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_snczi_baja_optimizada_tcm30-422920.pdf

(50) <https://sig.mapama.gob.es/snczi/>

(51) RD 1053/2015, por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos (BOE de 21 noviembre 2015). Nótese que la DGPCYE utiliza el término español maremoto como sinónimo del término japonés tsunami.

(52) PRINCIPIA y PROES (2017): Costas españolas: peligrosidad frente a maremotos, informe a la Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Disponible online en la siguiente URL (2018): <http://www.proteccioncivil.es/riesgos/maremotos/documentacion/>

7. Conclusiones

No cabe duda: ocurrirá un tsunami que afectará a las costas españolas. Es tan de Perogrullo como decir que mañana volverá a amanecer. Sin embargo, no podemos predecir cuándo, ni cómo, ni a qué parte de las costas españolas afectará el próximo tsunami.

Los mapas y los estudios de riesgos no tienen propósito predictivo; de hecho, lo último que se quiere es que se cumpla ni siquiera una sola de las premisas con que se realizan. El propósito de los mapas de riesgo es que sirvan como instrumento para alertar de las posibles consecuencias indeseadas para que, desde el día uno de su publicación, o incluso antes con trabajos de divulgación como este mismo artículo, se empiece a poner remedio para mitigar esos efectos, unas consecuencias que se calculan con la mejor ciencia disponible en cada momento.

A diferencia de los sistemas de alerta temprana, cuyo propósito es avisar con la mejor información posible y, por tanto, proveer a los afectados con la mayor exactitud posible de lo que sobreviene, los mapas y estudios de riesgos naturales permiten dar a conocer una realidad que no va a desaparecer por mirar a otro lado; permiten establecer unos umbrales de planificación acordes con el momento técnico y presupuestario, y para diseñar cuantas medidas se consideren oportunas para seguir la senda de Japón, cuyo objetivo (hoy utópico) es "cero víctimas por desastres naturales"¹.

Hoy se dan las circunstancias perfectas para liderar una iniciativa de estudio de los tsunamis en España. No será un estudio perfecto (no lo hay) pues, entre otras cosas, es necesario contar con información geológica de los océanos de mayor detalle, pero mientras eso llega, no podemos perder esta ola. El *know-how* está en España y al más alto nivel internacional. Si no empezamos ya, tal vez mañana sea demasiado tarde.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los compañeros que se han prestado para revisar o a mejorar el artículo, tanto del Instituto Geológico y Minero de España, de la Universidad de Málaga, del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, como otras personas cercanas que se han tomado la molestia sin otra contrapartida que este modesto párrafo.