



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Facultad de Ciencias Experimentales

LECCIONES APRENDIDAS DE LA CATASTROFE DE JAPÓN: TERREMOTO Y TSUNAMI DE 2011

Alumno/a: Juan Manuel Pulido Marroquino

junio, 2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

LECCIONES APRENDIDAS DE LA CATASTROFE DE JAPÓN: TERREMOTO Y TSUNAMI DE 2011



Trabajo de Fin de Grado presentado por

Juan Manuel Pulido Marroquino

Jaén, junio de 2022

ÍNDICE

RESUMEN/ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 ¿Qué es el riesgo (natural)?.....	8
2. RIESGOS GEOLÓGICOS	9
2.1 Terremotos.....	10
2.2 Tsunamis.....	11
3. TECTÓNICAS DE PLACAS	13
3.1 Placas tectónicas.....	14
3.2 Movimiento de las placas tectónicas.....	15
3.2.1 Bordes divergentes.....	16
3.2.2 Bordes convergentes.....	17
3.2.3 Bordes de fallas transformantes.....	18
4. CONTEXTO GEOLÓGICO	20
4.1 Anillo de fuego del Pacífico.....	20
4.2 Geología del archipiélago de Japón.....	21
4.3 Registro de terremotos y tsunamis en Japón.....	23
4.3.1 Procesos sísmicos en Japón.....	23
4.3.2 Tsunamis en Japón.....	27
5. TERREMOTO Y TSUNAMI DE JAPÓN DE 2011: EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS	30
5.1 La concatenación de procesos ligados al terremoto de 2011 en Japón.....	31
5.1.1 Puntos de escalada.....	33
5.2 Evaluación de daños durante el terremoto y tsunami de Japón en 2011.....	34
6. MEDIDAS DE PREDICCIÓN Y PREVENCIÓN TOMADAS ANTES Y DESPUÉS DEL DESASTRE: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL DESASTRE	36
6.1 Medidas de predicción.....	37
6.1.1 Simulaciones numéricas.....	37
6.2 Medidas de prevención.....	38
6.2.1 Daños producidos en las infraestructuras.....	38
6.2.2 Estructura de defensa costera.....	39

6.2.3 Otras medidas de defensa natural: Bosques costeros.....	43
6.2.4 Sistemas de alerta temprana.....	43
6.2.5 Medidas de evacuación.....	44
7. CONCLUSIONES.....	45
8. BIBLIOGRAFIA.....	46

RESUMEN

Los terremotos y tsunamis son algunos de los desastres naturales que más daños socioeconómicos, materiales y víctimas producen. Los sistemas de alerta y las medidas adoptadas para evitar o mitigar los daños producidos a menudo son insuficientes.

Los desastres geológicos como los terremotos y los tsunamis asociados a ellos están ligados a la dinámica interna de la Tierra, y en particular al movimiento de las placas tectónicas. Concretamente, los límites de placa convergentes son lugares de la superficie terrestre que entrañan un grave riesgo para la generación de estos fenómenos, con especial foco en las zonas de subducción. Conocer su distribución y los procesos ligados a los movimientos tectónicos es por tanto de vital importancia para entender y evaluar la magnitud del riesgo geológico, y adoptar las correctas medidas predictivas y preventivas.

En este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica de los procesos ligados a la actividad tectónica, analizando en particular los riesgos geológicos asociados a las zonas de subducción, concretamente terremotos y tsunamis. En dicho análisis, se estudia el terremoto y posterior tsunami acontecido el 11 de marzo de 2011 en Japón, sus consecuencias, y las medidas de predicción y prevención adoptadas antes y después de dicho acontecimiento.

ABSTRACT

Earthquakes and tsunamis are some of the natural disasters that cause the most socio-economic damage, material damage and casualties. Warning systems and measures taken to prevent or mitigate damage are often inadequate.

Geological disasters such as earthquakes and associated tsunamis are linked to the internal dynamics of the Earth, and in particular to the movement of tectonic plates. Specifically, convergent plate boundaries are places on the Earth's surface that pose a serious risk for the generation of these phenomena, with a special focus on subduction zones. Knowing their distribution and the processes linked to tectonic movements is therefore essential for understanding and assessing the magnitude of

the geological hazard, and for adopting the appropriate predictive and preventive measures.

In this work, a review of the processes linked to the tectonic activity is presented, analysing in particular the geological hazards associated with subduction zones, specifically earthquakes and tsunamis. In this analysis, we study the earthquake and subsequent tsunami that occurred on 11 March 2011 in Japan, its consequences, and the predictive and preventive measures adopted before and after the event.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica de la relación existente entre los mecanismos involucrados en la actividad tectónica y los riesgos geológicos asociados a dicha actividad, concretamente los terremotos y tsunamis. En particular, se analiza un caso de estudio en el que dicha actividad tectónica originó uno de los terremotos de mayor magnitud registrados hasta la fecha, generando a su vez un tsunami que tuvo un impacto catastrófico en la población afectada: el terremoto y tsunami acontecido el 11 de marzo de 2011 en Japón. Este caso de estudio es un ejemplo perfecto de análisis del riesgo geológico, ya que en él se pueden estudiar una serie de factores agravantes que aumentaron la magnitud de los daños considerablemente.

Los objetivos específicos que se persiguen en este trabajo son:

- Describir la estructura interna de la Tierra y su relación con la Tectónica de Placas
- Establecer una relación entre la actividad tectónica y la distribución de las zonas con mayor riesgo de actividad sísmica
- Analizar un caso de estudio, el terremoto y tsunami de Japón de 2011, estudiando el contexto geológico de la región, y relacionando la magnitud de los daños en función de factores tales como el grado de exposición, peligrosidad y vulnerabilidad
- Evaluar la efectividad de las medidas predictivas y preventivas adoptadas en este evento, y su repercusión para enfrentar futuros desastres naturales de tal envergadura

1.1 ¿Qué es el riesgo (natural)?

El riesgo natural se define como la probabilidad de que una zona sea afectada por un fenómeno natural que pueda causar daños. Se habla de riesgo siempre que se cumplan tres factores: exposición, vulnerabilidad y peligrosidad. Si cualquiera de estos factores no se diese, no existiría riesgo. (Keller y Blodgett, 2007). Estos factores se explican a continuación:

- Peligrosidad: probabilidad de que ocurra un proceso natural que modifique las condiciones, que suponga una liberación importante de energía, y/o que, en definitiva, pueda afectar a los bienes expuestos en el área de acción.

Ejemplo: que se produzca una inundación en una zona de viviendas situada en los márgenes de un cauce fluvial activo.

- Exposición: presencia de bienes o personas en una determinada zona que puedan verse dañadas por un proceso natural. Aludiendo al ejemplo anterior, la exposición se refiere a la presencia de viviendas y de las personas que las habitan en esa zona próxima al cauce fluvial activo.
- Vulnerabilidad: ausencia o escasez de medidas necesarias que puedan mitigar o evitar el daño ocasionado por un peligro en caso de producirse. Siguiendo con el ejemplo anterior, esta situación se daría ante la ausencia de murallas o cualquier otro tipo de estructura que pudiera proteger a dichas viviendas en caso de inundación.

Como se ha mencionado anteriormente, en el caso de que cualquiera de estos tres factores no se diese, no implicaría riesgo alguno. Por ejemplo: se produce la inundación (peligro) en una zona de casas cercanas al cauce de un río (exposición), pero existen las medidas necesarias para desviar y drenar esa subida repentina de agua, además de una muralla protectora. En este caso, por tanto, no habría riesgo.

La evaluación de estos tres factores es muy importante, ya que constituye la base para el diseño de medidas de prevención o mitigación de riesgo, que pueden enfocarse a reducir de forma independiente o coordinada cada uno de los factores.

2. RIESGOS GEOLÓGICOS

Los riesgos geológicos (en inglés *Geohazards*) son desastres naturales causados por la actividad geodinámica o cambios anormales en el ambiente geológico, que aluden tanto a procesos geológicos externos (por ejemplo, inundaciones) como internos (terremotos, actividad volcánica, etc) (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2009). Los riesgos geológicos a menudo conllevan graves consecuencias socioeconómicas, generando enormes daños tanto para la vida humana como en infraestructuras, y a menudo dañando también el medio ambiente (Brabb, 1991; Nadim *et al.*, 2006; Badoux *et al.*, 2016; Grahn and Jaldell, 2017; Froude y Petley, 2018).

Para entender mejor el impacto que conllevan los riesgos geológicos en la sociedad es importante establecer una diferenciación entre los conceptos de “riesgo geológico” y “catástrofe geológica”. El primero hace referencia a un supuesto acontecimiento futuro donde se producirían daños, mientras que el segundo se refiere a la consecuencia real producida por un proceso natural. (Llorente y Laín, 2009). Para evaluar el riesgo geológico y sus consecuencias, en este trabajo nos centraremos en dos procesos geológicos concretos: terremotos y tsunamis.

2.1 Terremotos

Los terremotos son temblores que se producen generalmente por el movimiento de las placas tectónicas. La litosfera está compuesta de catorce placas rígidas, que se mueven muy lentamente sobre una capa homogénea más plástica (astenosfera) dentro de la Tierra. Cuando dos placas chocan o se deslizan una respecto a otra (Figura 2.1), la presión que ejerce una placa sobre la otra hace que se acumule energía dentro de la litosfera. Los terremotos ocurren cuando esa energía acumulada se libera bruscamente, debido a que se excede la resistencia de las rocas, liberando energía en forma de ondas sísmicas (Murata, 2014).

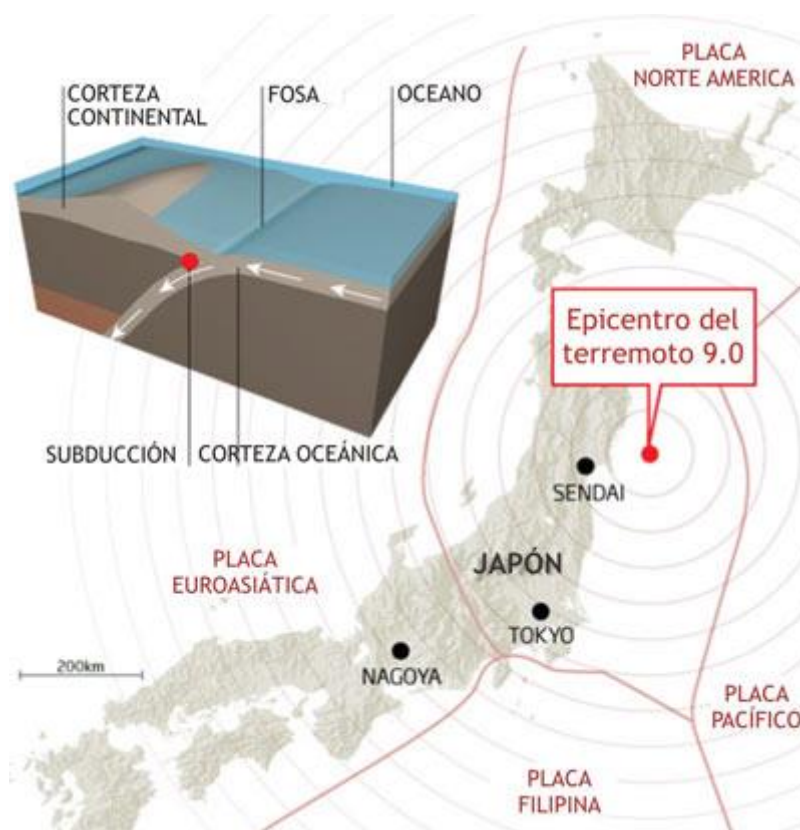


Figura 2.1 (página anterior): Ejemplo de acumulación de energía en la corteza y posterior liberación por el deslizamiento de una placa por debajo de otra (proceso de subducción) (terremoto de Japón 2011) (Tomada de: <http://elraptorblog.com/2011/03/el-terremoto-y-el-tsunami-de-japon>)

2.2 Tsunamis

Los tsunamis se definen como grandes desplazamientos de masas de agua como consecuencia de una perturbación en el fondo oceánico, formando olas de gran longitud de onda. Estas ondas que viajan a gran velocidad y perdiendo poca energía durante el trayecto, al aproximarse a aguas más someras, se amplifican y aumentan en altura, provocando inundaciones y generando daños severos. (Glosario de Tsunami, 2019).

Los tsunamis tienen diversos orígenes, los más importantes y comunes son terremotos, pero también pueden ser originados por erupciones volcánicas, deslizamientos submarinos o impacto de cuerpos extraterrestres (Figura 2.2). De hecho, el 80 % de los tsunamis se originan por terremotos con una magnitud sísmica superior a 7 (Suppasri *et al.*, 2012) (Figura 2.3).

Los grandes tsunamis suelen generarse por liberación brusca de energía durante un terremoto que genere una ruptura física del fondo oceánico o marino (los denominados “tsunamis tectónicos”, como los tsunamis de 2004 y 2011 en Sumatra y Japón, respectivamente), recorriendo además grandes distancias.

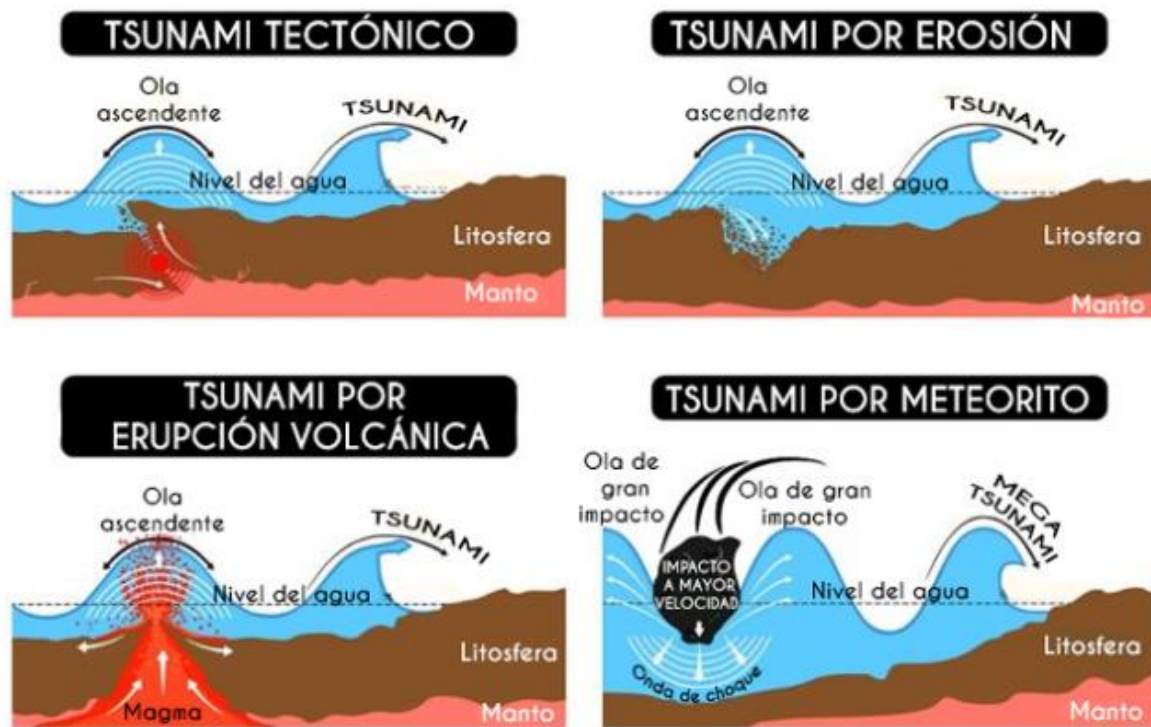


Figura 2.2: Principales agentes de perturbación que originan un tsunami (Recuperada de: *Tsunami. Lifeder*. <https://www.lifeder.com/tsunami/>)

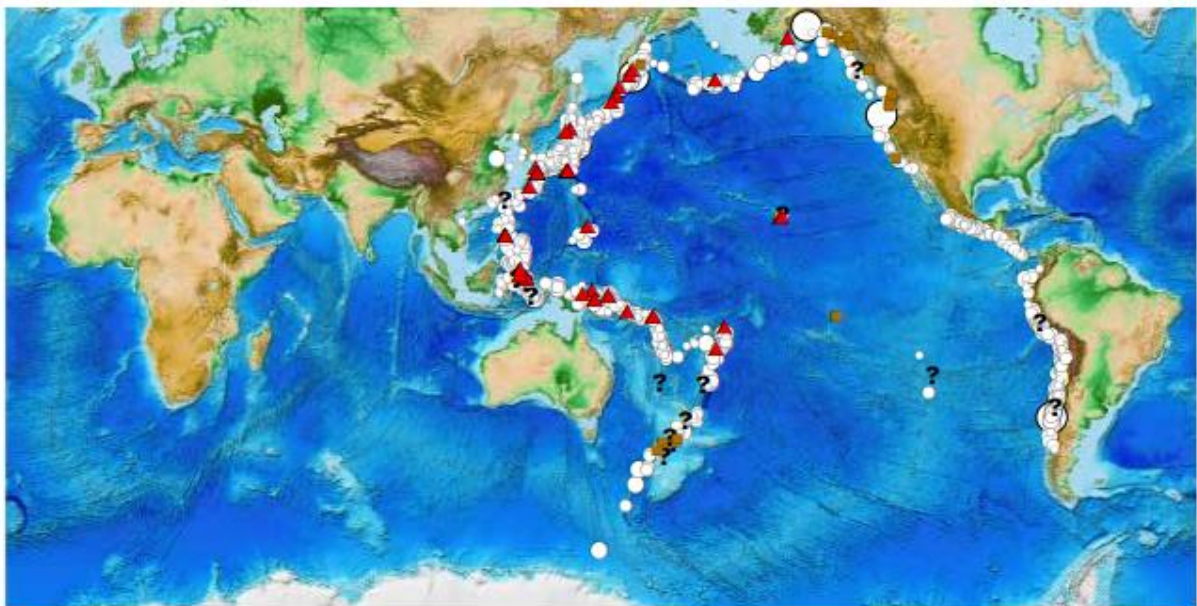


Figura 2.3: Localización de los procesos que han provocado tsunamis en el océano Pacífico: deslizamiento de tierras (cuadrado marrón), erupción volcánica (triángulo rojo), origen desconocido (interrogante) y terremoto (círculo blanco) (Tomada de: NEIC/ Sistema Mundial de Datos Geofísicos)

Cabe destacar que de todos los tsunamis provocados por terremotos, un 70% ocurren en el Pacífico, concretamente en las zonas de subducción del denominado “Anillo de Fuego del Pacífico” (Figura 2.3) (Glosario de Tsunami, 2019), una zona con una alta actividad sísmica y volcánica. Dicha actividad es consecuencia del movimiento de las placas tectónicas, que se explicará de forma más detallada en el siguiente apartado.

3. TECTÓNICA DE PLACAS

Alfred Wegener enunció la teoría de la “deriva continental”, en la que postulaba que todos los continentes habían estado una vez unidos en un único supercontinente llamado “Pangea”, y que éste comenzó a fracturarse hasta dar lugar a la configuración actual de masas continentales. No obstante, esta teoría no pudo demostrarse hasta principios del siglo XX, cuando numerosas evidencias científicas apuntaban a la existencia de una serie de mecanismos internos que provocaban el desplazamiento de dichas masas continentales. De esta forma la teoría de la “deriva continental” dio paso a la teoría de la “expansión del fondo oceánico”, enunciada por Harry Hess en 1962, que establecía que dicho desplazamiento se producía, por un lado, gracias a la creación de nuevo fondo oceánico a través de las dorsales oceánicas, por ascenso de magma desde el interior de la Tierra; y por otro, que la corteza oceánica más antigua y densa era consumida en las fosas submarinas.

Estas dos teorías se unieron para dar lugar a una teoría más completa, la teoría de la “Tectónica de Placas”, que de manera resumida expone que la litosfera (capa externa y rígida de la Tierra) descansa sobre una capa más débil y dúctil (astenosfera), que es lo que explica el movimiento de las masas continentales. La litosfera se divide en fragmentos denominados placas tectónicas, que se encuentran en continuo movimiento cambiando de tamaño y forma. (Tarbuk y Lutgens, 2019).

3.1 Placas tectónicas.

La superficie terrestre se divide en placas tectónicas, formadas por corteza continental y oceánica. Éstas constituyen la litosfera, capa más externa y rígida de la Tierra compuesta por la corteza y parte del manto superior (Figura 3.14). La litosfera descansa sobre una capa más débil y dúctil denominada astenosfera, que abarca desde la base de la litosfera hasta la mesosfera. La litosfera oceánica es más delgada, de varios kilómetros de espesor, mientras que la litosfera continental es gruesa, de decenas a cientos de kilómetros de espesor (Tarbuk y Lutgens, 2019).

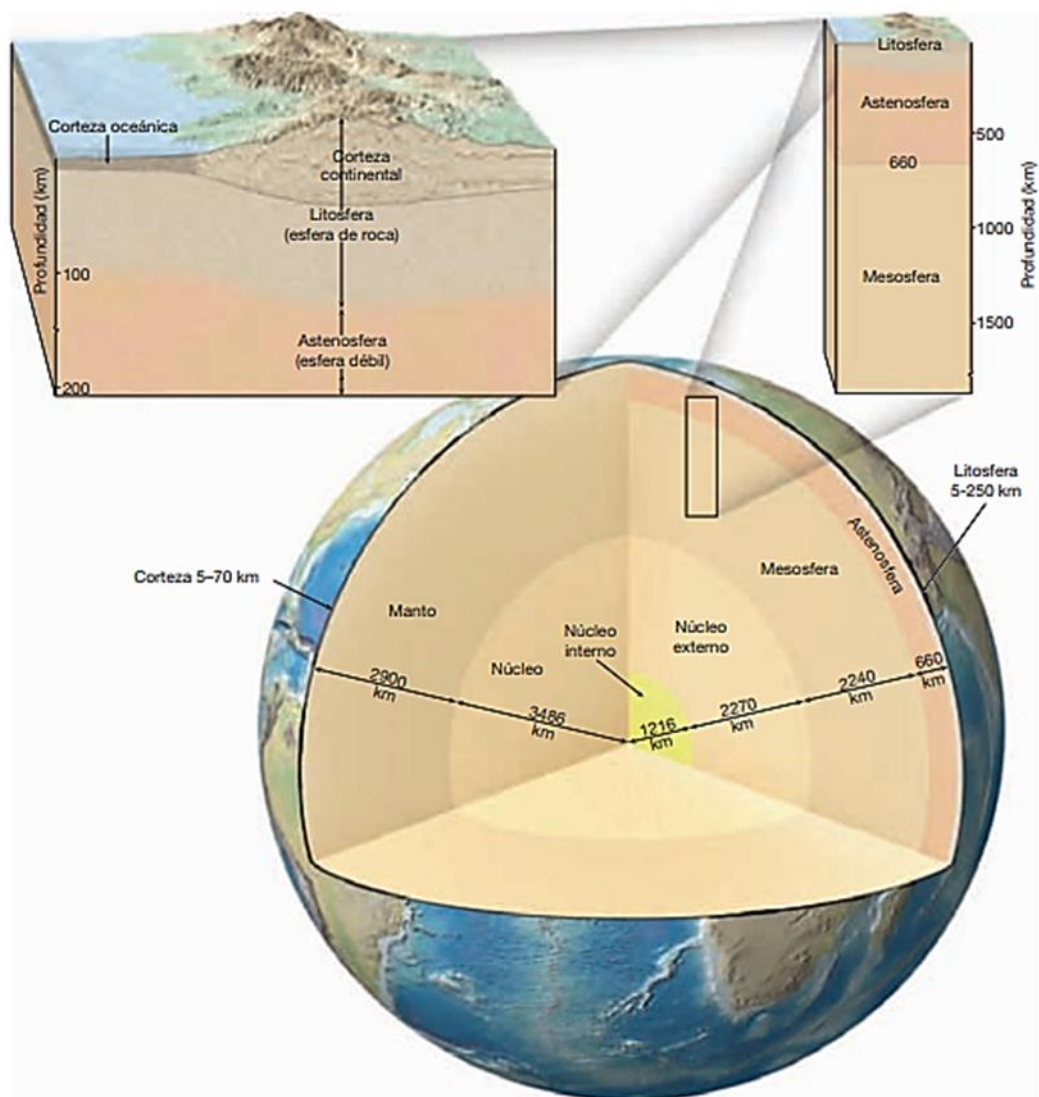


Figura 3.14: Estructura interna de la Tierra, compuesta por el núcleo, el manto, con una parte superior más viscosa denominada astenosfera; y la litosfera, compuesta por la corteza y parte del manto superior. Las células de convección se originan en el manto (Tarbuk y Lutgens, 2019)

Se diferencian 14 placas tectónicas mayores o principales (Africana, Antártica, Árabe, Cocos, Nazca, Caribe, Pacífico, Euroasiática, Filipina, Indoaustraliana, Norteamericana, Scotia, Sudamericana, Australiana) (Figura 3.2). Además, se han reconocido otras 43 placas secundarias, de un tamaño mucho menor (Tarbuk y Lutgens, 2019).

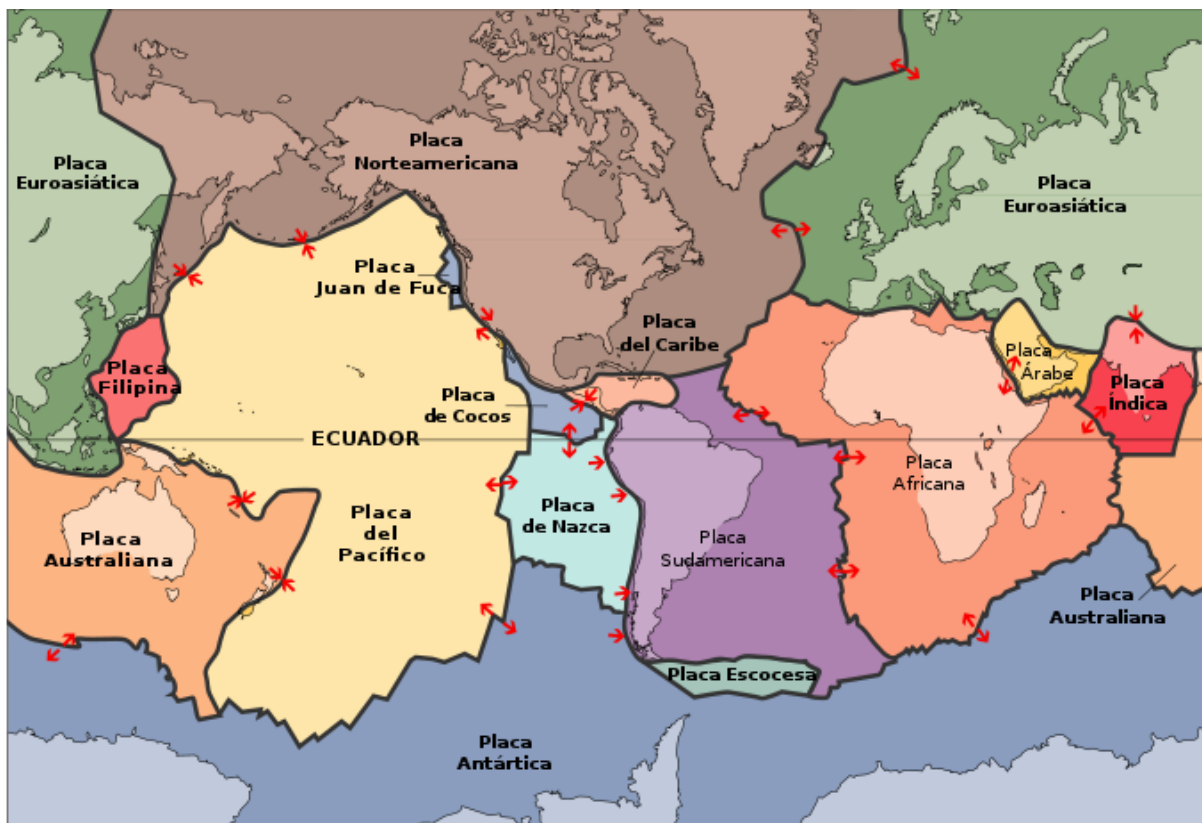


Figura 3.2: Principales placas tectónicas (Tomada de: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Plates_tect2_en.svg |Date= 09/2006)

3.2 Movimientos de las placas tectónicas

Las placas litosferas se desplazan sobre la astenosfera, principalmente por el efecto de las corrientes de convección (Figura 3.14). Estas corrientes se generan por diferencias de temperatura en el material del manto o magma, provocando un movimiento ascendente del magma a mayor temperatura al mismo tiempo que se produce un movimiento descendente del material a menor temperatura, dando lugar a “células de convección”.

Las placas se mueven unas respecto a otras, por lo que sus mayores interacciones se producen en sus bordes, y es aquí donde encontramos la principal causa de los terremotos. Hay tres tipos de bordes de placa (Figura 3.3):

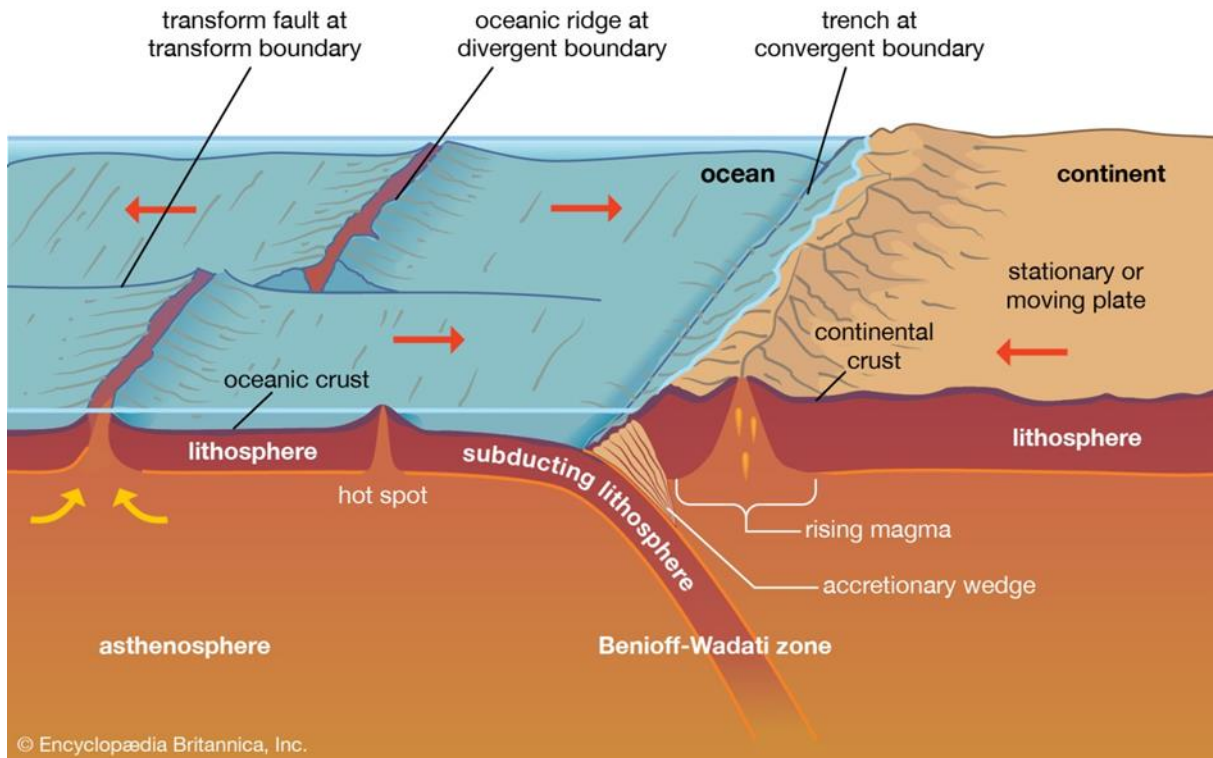


Figura 3.3: Recreación de los tres tipos de bordes o límites de placa (Tomada de: *Encyclopedia Britannica* <https://www.britannica.com/science/Wadati-Benioff-zone#/media/1/60933/229344>)

3.2.1 Bordes divergentes

Los límites o bordes de placa divergentes son aquellos en los que las placas litosféricas se separan como consecuencia del ascenso de magma del manto terrestre, creando nueva corteza oceánica. Suele ir acompañado de un abombamiento del terreno por el calor inducido en la base de la litosfera. El ejemplo más característico de este tipo de límite son las dorsales oceánicas, que forman largas líneas volcánicas activas que atraviesan los océanos (Tarbuk y Lutgens, 2019) (Figura 3.4). Otro ejemplo característico es el denominado “*Rift* africano”, un extenso y profundo valle al noreste de África donde se genera nueva corteza oceánica.

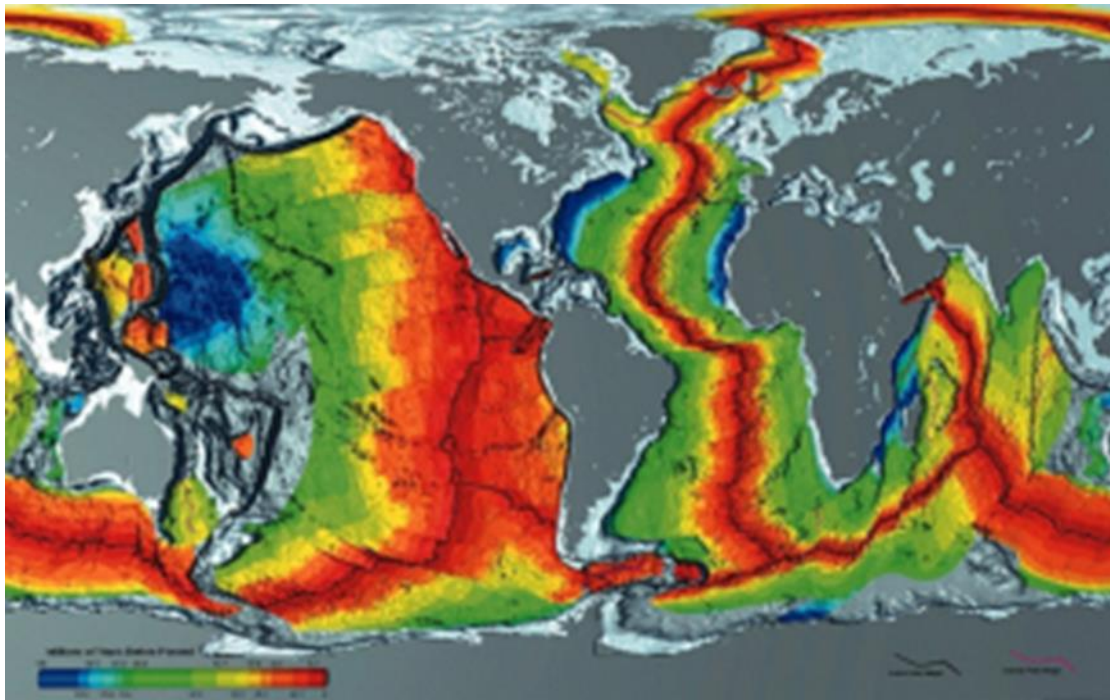


Figura 3.4: Distribución de las dorsales oceánicas en la superficie terrestre. Los colores indican la edad de la corteza oceánica: en rojo, la corteza más reciente (más próxima a la dorsal); en azul, corteza más antigua (Tomada de: <http://biogeo.esy.es/BG4ESO/dorsales.htm>)

3.2.2 Bordes convergentes

Los bordes convergentes son aquellos en los que se produce el acercamiento de dos placas litosféricas. Dicho acercamiento suele comenzar con el deslizamiento (subducción) de la placa más densa y pesada (oceánica) bajo la placa más ligera (continental u oceánica más joven). En dicho proceso, parte de la litosfera oceánica que subduce se funde en el manto (a unos 100 km de profundidad), generando un flujo de magma menos denso que asciende hasta la superficie, dando lugar a vulcanismo. Hay tres tipos de bordes convergentes entre placas (Tarbuk y Lutgens, 2019):

1. Convergencia oceánica-continental: se produce por la subducción de la litosfera oceánica, más densa, bajo la litosfera continental. Suele ir asociada a vulcanismo y a la formación de grandes cordilleras, por deformación de la placa continental suprayacente. Un ejemplo característico es la Cordillera de los Andes.

2. Convergencia oceánica-oceánica: se diferencia de la anterior en la naturaleza de la capa suprayacente, que en este caso es también litosfera oceánica, menos densa que la que subduce. Suele ir acompañado también de vulcanismo, generando islas volcánicas denominadas “arcos insulares”. El ejemplo más característico es el archipiélago de Japón.
3. Convergencia continental-continental: se origina por el choque de dos placas continentales una vez consumida toda la litosfera oceánica durante el proceso de subducción. La fuerza de colisión entre las dos placas da origen a cordilleras de grandes dimensiones (Barnes, 2003), como es el caso de la Cordillera del Himalaya.

3.2.3 Bordes de Fallas transformantes

Los bordes transformantes son aquellos en los que se produce el desplazamiento lateral de una placa respecto a la otra, pero sin que se produzca ni creación ni destrucción de litosfera. Un ejemplo característico es la Falla de San Andrés en California, una de las más importantes conocidas, responsable de terremotos de gran magnitud. Otro ejemplo lo encontramos en las denominadas “zonas de fractura” transversales a las dorsales oceánicas, que desplazan el eje de la dorsal a lo largo de su recorrido (Tarbuk y Lutgens, 2019) (Figura 3.5).

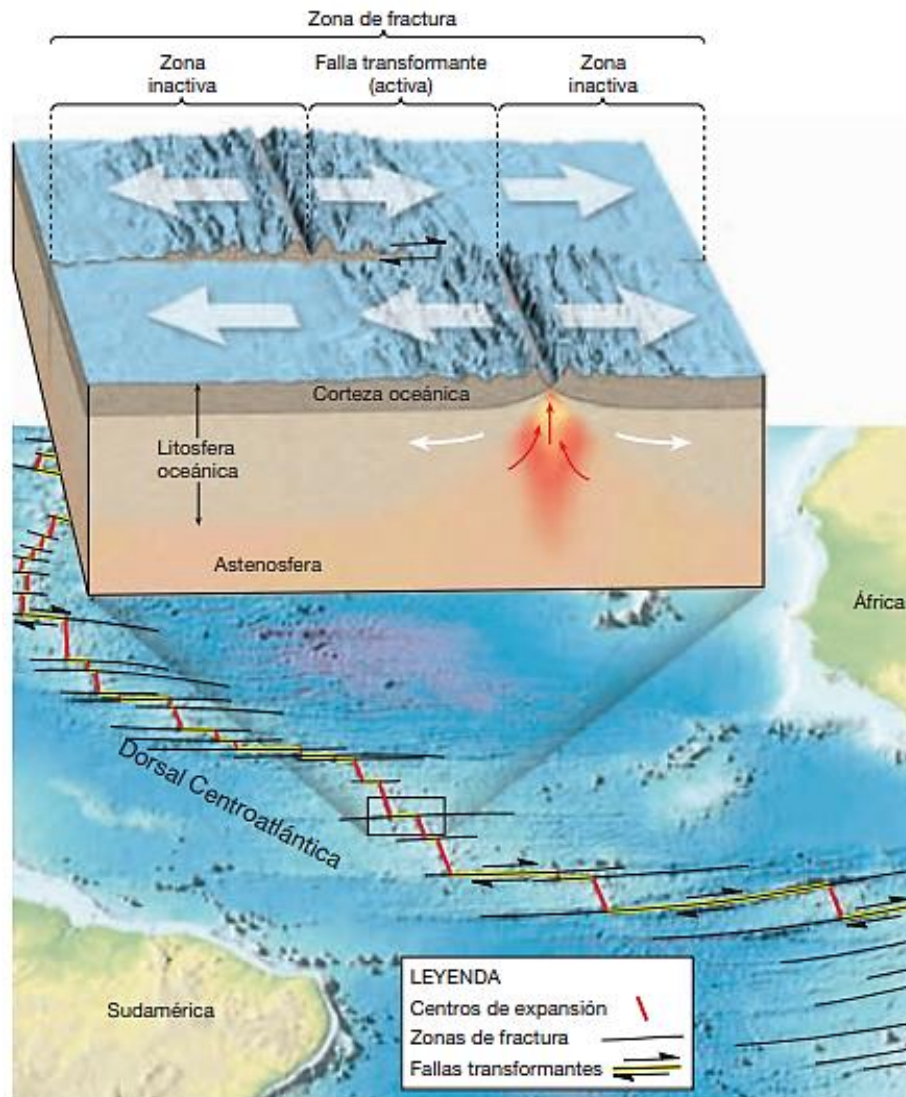


Figura 3.5: Ejemplo de fallas transformantes en el eje de una dorsal oceánica (Tarbuk y Lutgens, 2019)

En este trabajo nos centraremos en dos de los procesos geológicos asociados a los límites de placas convergentes y transformantes, los terremotos y los tsunamis, analizando la magnitud de los daños que se pueden generar en función de diversos factores, así como la efectividad de las medidas adoptadas para mitigar o evitar esos daños. Para ello, se ha escogido como caso de estudio el tsunami acontecido en el año 2011 que afectó gravemente las costas de Japón, asociado al terremoto que se originó en este límite de placa convergente. El archipiélago de Japón se enmarca dentro del ya mencionado “Anillo de Fuego del Pacífico”, una región de nuestro planeta con un elevado riesgo geológico.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 Anillo de fuego del Pacífico

Japón forma parte del tan famoso “Anillo de Fuego del Pacífico”, que se extiende a lo largo de 40.000 kilómetros bordeando el océano Pacífico (Figura 4.1). En él se ubican 452 volcanes, razón por la cual recibe dicho nombre. De hecho, del total de volcanes que se conocen en la superficie terrestre, el “Anillo de Fuego” representa el 75%, siendo además el lugar en el que se producen el 90% de los seísmos en el mundo. (Rosenberg, 2018).

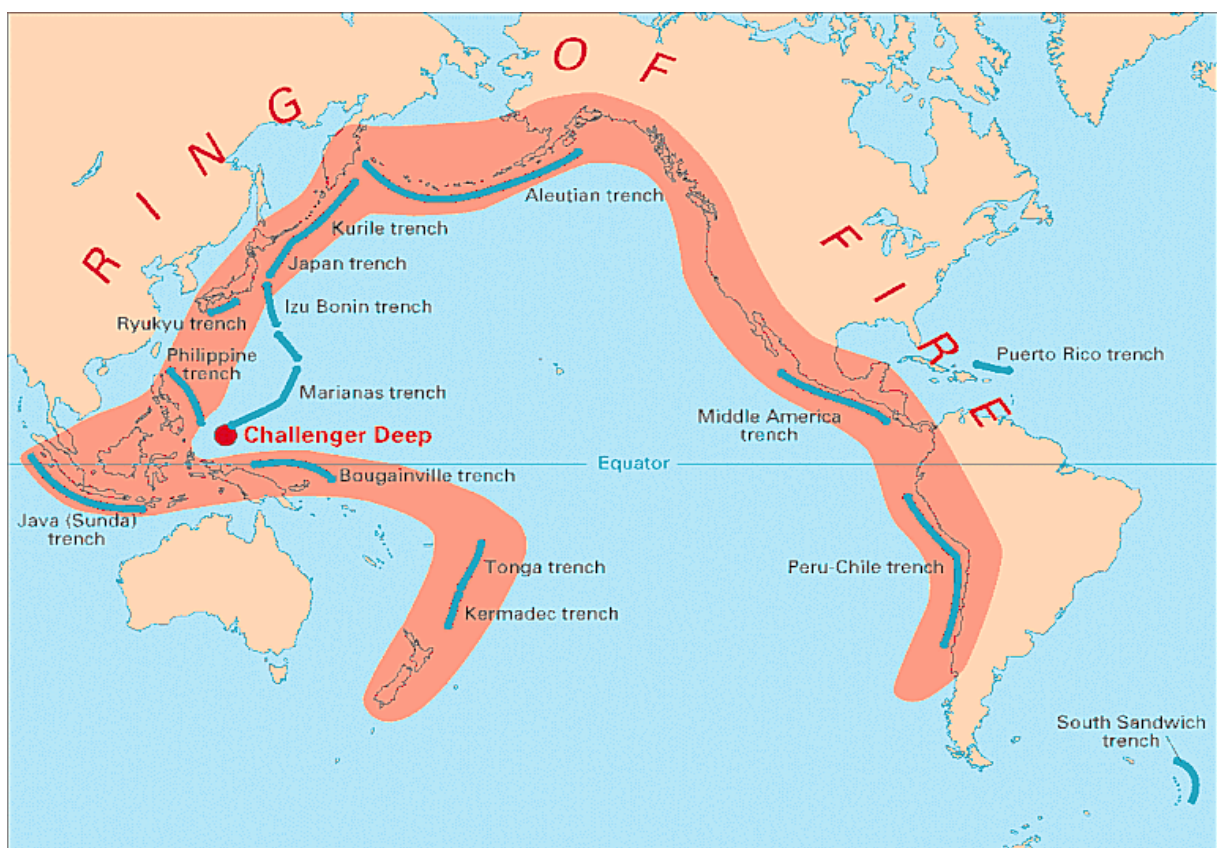


Figura 4.1: “Anillo de Fuego” del Pacífico. Las interacciones entre la placa del Pacífico y las placas tectónicas circundantes generan procesos de subducción que provocan el ascenso de material procedente del manto a la superficie, generando en algunos casos arcos insulares, como es el caso del archipiélago de Japón. (Tomada de: <https://www.thoughtco.com/ring-of-fire-1433460>)

El océano Pacífico se asienta sobre las denominadas placa Pacífica, de Cocos y de Nazca, de carácter oceánico, cuyos bordes de placa, al oeste, al norte y al este, son bordes de subducción, donde la litosfera oceánica subduce bajo las placas australiana, filipina, euroasiática, norteamericana y sudamericana (ver Figura 3.2)

4.2 Geología del archipiélago de Japón

El archipiélago de Japón se asienta en la confluencia de cuatro placas tectónicas: las placas del Pacífico, de América del Norte, de Eurasia y del mar de Filipinas (Figura 4.2).

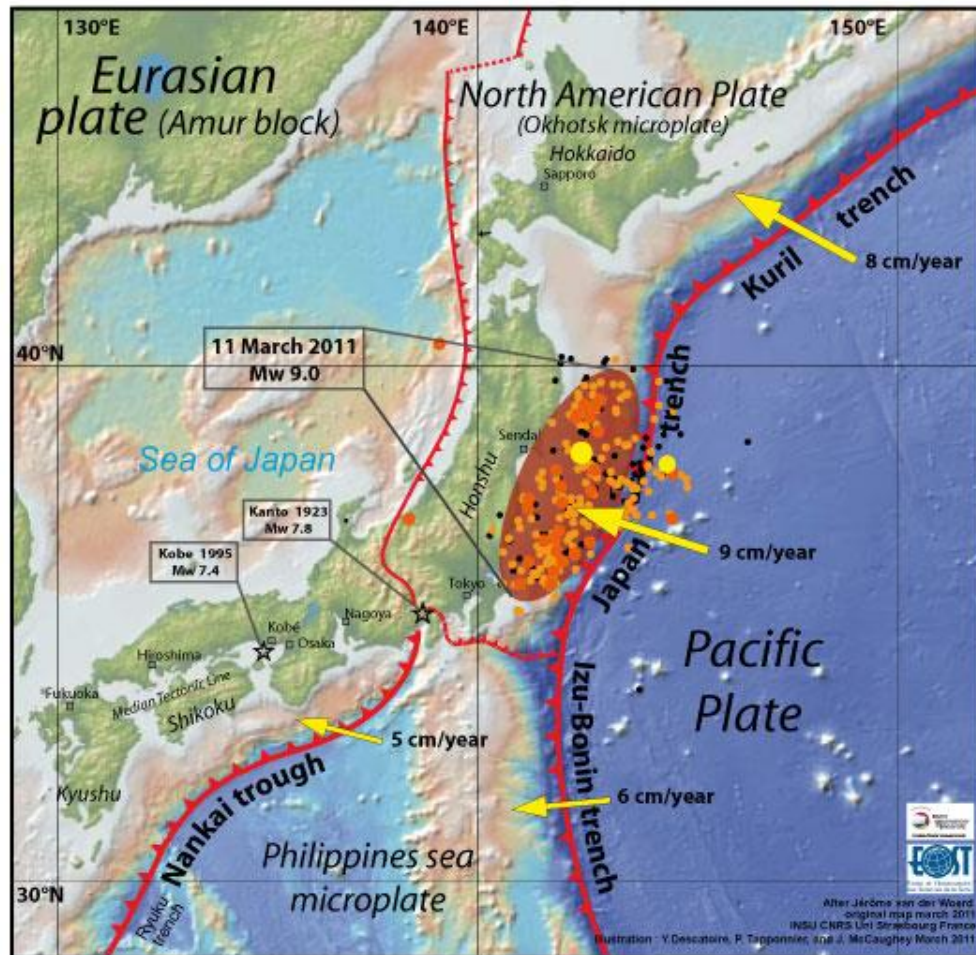


Figura 4.2: Confluencia de placas tectónicas en torno a las islas de Japón. (Tomada de: Yves Descatoire, Science Illustrator at Singapore Earth Observatory NTU)

Los procesos de subducción que ocurren en esta área se resumen, por un lado, en que dos de esas placas, la del Pacífico y la del mar Filipinas, subducen bajo las placas de América del Norte y la placa de Eurasia; y por otro, en que la placa del Pacífico subduce bajo la placa del mar de Filipinas. Estos procesos de subducción son los que han originado el archipiélago de Japón, siendo un caso típico de formación de arcos de islas (Figura 4.3) (Barnes, 2003).

Al subducir una placa debajo de otra, se inicia la actividad volcánica por fusión parcial de la placa que subduce (Figura 4.3). Si continúa el vulcanismo asociado a este proceso de subducción, se forman cadenas de estructuras volcánicas que acaban emergiendo del agua generando islas, a las que se les denomina “arcos de islas”. Cuando estos arcos de isla son jóvenes son estructuras simples, ubicados en la corteza oceánica deformada con espesores menores a 20 kilómetros. Los arcos de islas más antiguos, en cambio, tienen corteza con espesores de 20 a 35 kilómetros, como es el caso del arco de Japón (Tarbuk y Lutgens, 2019).



Figura 4.3: Esquema representativo de la formación de las islas de Japón en relación a la actividad volcánica generada por la subducción de la placa del Pacífico (Tomada de: <https://sites.google.com/site/biodiversidadygeodiversidad/>)

El archipiélago de Japón se considera por tanto un arco insular maduro, resultado de varias fases de subducción. Aproximadamente 15.000 km de suelo oceánico han pasado por debajo del área japonesa en los últimos 450 millones de años, y la mayoría ha sido subducida por completo.

Como resultado de estos procesos de subducción, Japón se caracteriza por estar constituido principalmente por rocas ígneas. La mayoría de los sedimentos son productos erosivos de antiguas rocas ígneas. Una parte importante del material sedimentario que conforma el archipiélago de Japón se concentra en el denominado “prisma de acreción”, una cuña de sedimentos oceánicos deformados que se

acumulan en la fosa ligada a la zona de subducción, como resultado de la “raspadora” de material de corteza oceánica que se produce durante el proceso de subducción. Dichos materiales se adhieren a la placa superior, formando parte de la masa continental del archipiélago japonés (Barnes, 2003; Van der Pluijm y Marshak, 2004).

4.3 Registro de terremotos y tsunamis en Japón

El entorno en el que se origina el archipiélago de Japón se caracteriza por procesos de subducción muy activos desde el punto de vista geológico, ya que se enmarca en el ya mencionado “Anillo de Fuego del Pacífico”, destacado por su gran actividad sísmica y volcánica (ver Figura 4.1). Al noreste de Japón, la placa subduce con una tasa de convergencia rápida de 8-10 cm/año, formando la Fosa de Japón, donde se vienen registrando grandes terremotos con una frecuencia de en torno a 30 años (por ejemplo, el terremoto de Miyagi-Oki en 1978 o el de Tohoku-Oki en 2011). Frente a la costa del sudoeste de Japón, la placa del mar de Filipinas subduce a razón de 4 cm al año, formando la Fosa de Nankai, donde se registran terremotos importantes cada 100 años (por ejemplo, los terremotos de Ansei y de Nankai en 1857 y 1946, respectivamente).

Respecto al registro de tsunamis, uno de los descubrimientos sorprendentes tuvo relación con el hallazgo de un registro potente de sedimento marino muchos kilómetros tierra adentro, que se interpretó como material arrastrado por tsunamis. La datación por radiocarbono de los depósitos mostró un periodo de recurrencia de estos grandes tsunamis de aproximadamente cada mil años, pudiendo sólo ser generados por terremotos de gran magnitud en la zona de subducción (Lefevre, 2011).

4.3.1 Procesos sísmicos en Japón

Como se ha mencionado anteriormente, los terremotos ocurren cuando se libera de golpe toda la energía acumulada lentamente en una zona de la corteza al ejercer una fuerte presión sobre ésta (como ocurre en las zonas de subducción), en forma de ondas sísmicas (Murata, 2014). Es importante tener en cuenta, no obstante, que en algunos casos la energía se libera de forma gradual, lo que evita la generación de grandes terremotos (Tarbuck y Lutgens, 2019).

En Japón, los seísmos pueden estar asociados a diferentes procesos relacionados con el movimiento de las placas:

- **Subducción**

Durante el proceso de subducción, en la zona de contacto entre ambas placas en la parte más superficial de la corteza se genera una respuesta de plegamiento y fracturación, y en esta zona se producen los llamados “terremotos de foco superficial” (Figuras 4.4 y 4.5). A medida que la placa litosférica que subduce desciende en el manto, se van produciendo terremotos más profundos mediante otros mecanismos. Muchas pruebas sugieren que estos se producen en la capa rígida y fría de dicha placa y no tanto en el manto (Figura 4.5). Por debajo de los 700 km se han registrado pocos terremotos, posiblemente debido a que la placa que subduce se ha calentado lo suficiente para perder la rigidez. Estos terremotos profundos e intermedios son generados en la denominada “zona de Wadati-Benioff” (Figura 4.4) (Barnes, 2003).

El seísmo en el que se centra este trabajo, sucedido en Japón en marzo de 2011, fue originado en el contexto de una zona de subducción, al igual que casi la mayoría de terremotos producidos en esta zona. El hipocentro del seísmo del 11 de marzo de 2011 se localizó a una profundidad de unos 30 km (Figura 4.5)

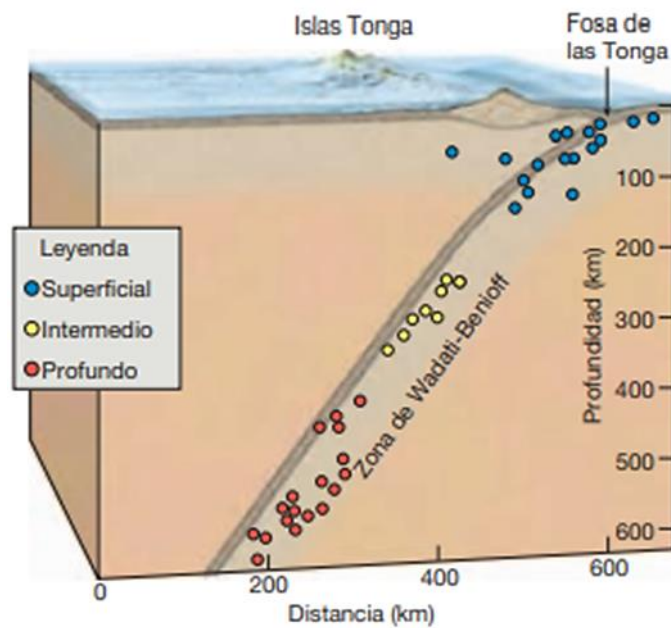


Figura 4.4: Ejemplo aplicable a los tipos de terremotos que se producen por subducción en el archipiélago de Japón. Podemos observar las diferentes profundidades en las que se originan los seísmos en una zona de subducción (hipocentros), desde una zona más superficial hasta los producidos en zonas intermedias o profundas en la zona de Wadati-Benioff (Tarbuk y Lutgens, 2019)

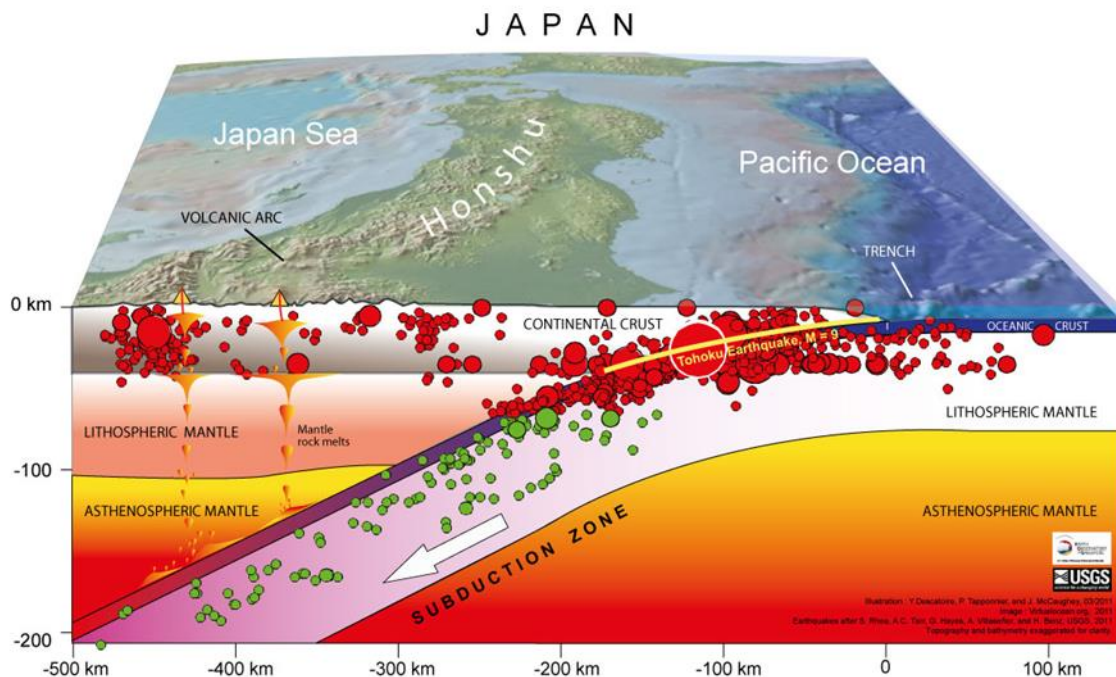


Figura 4.4: El terremoto del 11 de marzo de 2011 en Japón (Tohoku) y su escenario tectónico con más detalle. Los hipocentros (puntos de origen) de terremotos que se muestran incluyen terremotos

de magnitud (M) superior a 5.0 en el período 1964-2007, y el terremoto y sus réplicas de M 9.0 de Tohoku (Japón) del 11 de marzo de 2011 (Tomada de: <https://earthobservatory.sg/news/mw-69-earthquake-strikes-coast-fukushima-japan>)

- **Zonas de falla superficiales**

En Japón también es común que se generen terremotos en zonas de falla de la corteza más superficial. Al contrario que los terremotos "profundos" generados en la zona de Wadati-Benioff, los terremotos de la zona de falla son "poco profundos", con sus hipocentros generalmente ubicados a sólo 10-15 km de profundidad, o como máximo a 30 km en la base de la corteza continental. Estos terremotos poco profundos a menudo originan la propagación, a través de la fracturación de roca en la corteza, de grietas o "fallas" hasta la superficie terrestre, generando desplazamientos de unos bloques de roca respecto a otros. Estas zonas de falla son susceptibles de generar terremotos, considerándose "fallas activas". En Japón, se ha constatado recientemente la existencia de cientos de fallas activas en todo el archipiélago, resultado de la interacción entre las placas tectónicas que convergen (Barnes, 2003).

- **Volcanes**

Los terremotos en Japón también pueden generarse en relación con la actividad volcánica, asociada al ascenso del magma por fusión de la litosfera que subduce y posteriormente a la erupción volcánica. Dado que el origen del archipiélago de Japón está relacionado con dicha actividad volcánica (arco insular), es de esperar que la actividad volcánica aquí sea un factor a considerar y, por tanto, los terremotos asociados a ellos. No obstante, este tipo de terremotos no son los más importantes en Japón, siendo de mayor magnitud los asociados al proceso de subducción (Barnes, 2003).

4.3.2 Tsunamis en Japón

La mayoría de los tsunamis son causados por un terremoto (tsunamis tectónicos; ver apartado 2.2), generando el desplazamiento de una gran masa de agua. En zonas de subducción, este desplazamiento ocurre por la liberación brusca de energía en un plano de falla, generada por el deslizamiento de una placa por debajo de la otra. Japón, por su contexto geológico, es por tanto susceptible a sufrir los efectos de grandes tsunamis.

Como se ha explicado anteriormente, Japón es una región de alta peligrosidad sísmica, con el añadido de sufrir los efectos de grandes tsunamis. De hecho, dado que se encuentra en uno de los principales focos de actividad sísmica del planeta (el Anillo de Fuego del Pacífico), la recurrencia de las catástrofes asociadas a estos procesos geológicos es considerablemente elevada, alcanzando además los terremotos grandes magnitudes. Estos terremotos pueden llegar a producir desde olas de unos pocos metros, hasta olas incluso de 90 metros de altura, en función de su intensidad, pero también de la morfología de la costa en la que impactan (Keller, 2012)

A continuación, en la Tabla 4.1 se recogen los principales terremotos, y los tsunamis asociados en el archipiélago Japonés en los últimos siglos (NOOA, 2012). Por su parte, en la Figura 4.6 se muestran las zonas de Japón afectadas por tsunamis en los últimos 1300 años.

Fecha	Lugar	Magnitud del terremoto	Altura de las olas (m)	Muertes provocadas por el tsunami
20/09/1498	Enshunada Sea	8.3	10	31,201
30/12/1703	Off Sw Boso Peninsula	8.2	11.70	1,497
28/10/1707	Enshunada	8.4	11	1,000
28/10/1707	Nankaido	8.4	25.70	2,787
29/08/1741	W. Hokkaido Island	6.9	90	1,607
20/05/1751	Nw. Honshu Island	6.6	2	2,100
24/04/1771	Ryukyu Islands	7.4	85.40	25,427
21/05/1792	Shimabara Bay, Kyushu Island	6.4	55	5,343
24/12/1854	Nankaido	8.4	28	1,724
15/06/1896	Sanriku	8.3	38.20	18,802
02/03/1933	Sanriku	8.4	29	3,022
11/03/2011	Honshu Island	9.1	55.88	15,950

Tabla 4.1: Listado de los principales terremotos y los tsunamis asociados en el archipiélago de Japón en los últimos siglos. Se indica además el número de fallecidos por el tsunami en cada evento (Datos tomados de: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>)

De entre los tsunamis recogidos la Tabla 4.1, en este trabajo nos centraremos en particular en analizar los daños ocurridos durante el tsunami del 2011, catalogado como el cuarto más grande ocurrido en toda la historia hasta donde se tienen registros (Figura 4.7) (Daputel *et al.*, 2012)



Figura 4.6: Zonas de Japón afectadas por tsunami en los últimos 1300 años (Tomada de: <https://www.datosmundial.com/asia/japon/tsunamis.php>)



Figura 4.7: Los mayores terremotos de la historia según su magnitud en la escala Richter. El terremoto de Japón del 2011 ocupa la cuarta posición, considerado uno de los peores terremotos jamás registrados. (Recuperada de: <https://www.emo15-Chile-se-ubican-entre-los-25-mas-potentes-de-la-historia.html>)

5. TERREMOTO Y TSUNAMI DE JAPÓN DE 2011: EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS

El viernes 11 de marzo de 2011, un terremoto de magnitud 9.0 con epicentro en la Fosa de Japón sacudió el noreste del país (región de Tohoku), causando daños devastadores. Este terremoto fue seguido por otras docenas de terremotos más pequeños de magnitud 6 o superior.

El terremoto de magnitud 9.0 fue el desencadenante del posterior tsunami que asoló la costa de Japón. Varias olas golpearon la costa noreste de Honshu (Tohoku), alcanzando una altura de hasta casi 10 m y cubriendo más de 800 km de costa (Figura 5.1) (Evgenidis *et al.*, 2021; Sato *et al.*, 2012).

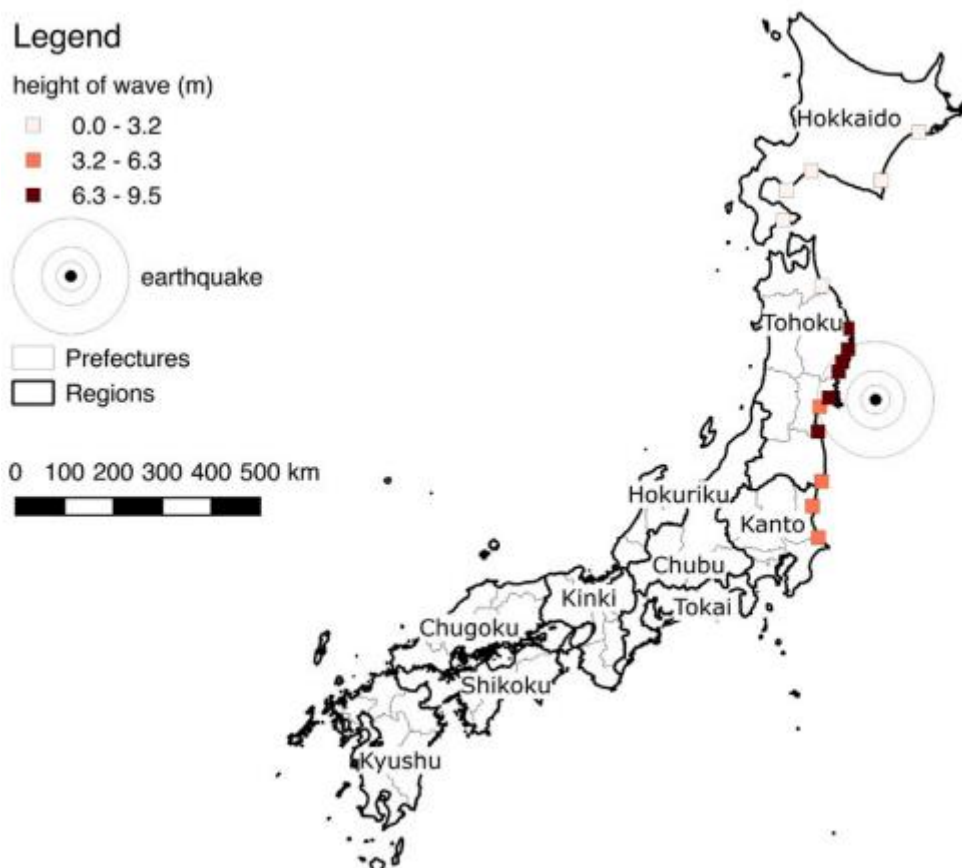


Figura 5.1: Diferentes regiones de Japón azotadas por el tsunami de 2011. Los cuadros de color muestran las diferentes alturas de las olas generadas por el tsunami. El círculo señala la localización del epicentro (punto perpendicular en la superficie de la tierra donde se produjo el hipocentro).

(Tomada de: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php>)

Las consecuencias de dicho tsunami fueron 15.859 fallecidos, 6.152 heridos y 2.556 desaparecidos (JNPA, 2017), además de innumerables daños en infraestructuras, como edificios, presas, aeropuertos, red de telecomunicaciones y a la central nuclear (Suppasri *et al*, 2021)

Antes de analizar los daños provocados por el terremoto y tsunami del 2011 en Japón, es necesario explicar previamente una serie de factores ligados a estos desastres que determinan en gran medida la magnitud del daño, que es lo que se entiende como la “concatenación de procesos”.

5.1 La concatenación de procesos ligados al terremoto de 2011 en Japón.

Los procesos concatenados ligados a cualquier desastre natural deben entenderse dentro de un contexto amplio de interacciones naturales y antrópicas, en el cual un evento cualquiera puede:

- Agravarse con otros eventos que ocurren en el mismo tiempo y espacio
- Formar parte de una red amplia que involucra fenómenos físicos y ambientales, los cuales interactúan entre sí
- Afectar a entornos construidos vulnerables, interrumpir comunicaciones, etc.

Estos tres aspectos deben tenerse en cuenta a la hora de desarrollar medidas de prevención para dichos desastres, como sistemas de alerta temprana o medidas preventivas frente a los daños que se puedan derivar (Pescaroli *et al*, 2018).

Una de las medidas existentes que se han perfeccionado en cuanto a los sistemas de alerta temprana es la denominada “escala de magnitud en cascada”, que propone seis magnitudes (de magnitud 0 (M0) a magnitud 5 (M5)) basadas en la complejidad de la crisis o desastre. A medida que aparecen más puntos de escalada, los efectos son más duraderos, y la magnitud del daño provocado por el desastre es mayor (Pescaroli *et al*, 2018).

Hay tres componentes principales de los desastres en cascada:

1. Causa (primaria, secundaria, etc.),

2. Efecto

3. Punto de escalada, que es una coyuntura crítica cuya ocurrencia / falla causará un impacto mucho mayor que la causa primaria. Éste suele ser de origen antrópico, como fallos en los sistemas de alerta, en las infraestructuras, etc.

Los principales criterios que definen cada escala de magnitud están basados en la combinación de estos tres componentes (Figura 5.2) (Alexander, 2018):

- Magnitud 0 (M0): una simple causa y efecto.
- Magnitud 1 (M1): solo una causa simple y una cadena de efectos.
- Magnitud 2 (M2): solo una causa, pero dos o más cadenas de efectos.
- Magnitud 3 (M3): dos causas, dos o múltiples cadenas de efectos y un punto de escalada.
- Magnitud 4 (M4): dos causas, dos o múltiples cadenas de efectos y dos o más puntos de escalada.
- Magnitud 5 (M5): múltiples causas, múltiples cadenas de efectos y múltiples puntos de escalada.

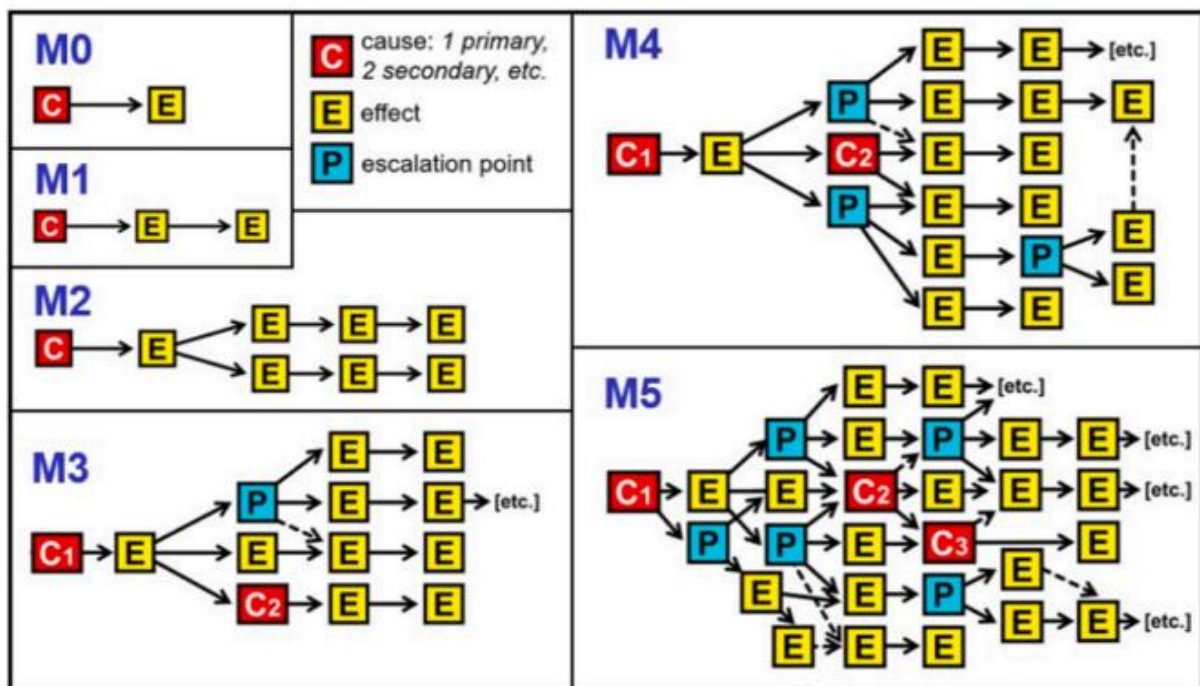


Figura 5.2: Escalas de magnitud de los procesos concatenados (Alexander, 2018)

5.1.1 Puntos de escalada

Los puntos de escalada son componentes críticos que pueden inducir a la concatenación de desastres (Suppasri *et al*, 2021). En relación al terremoto y tsunami de Japón del 2011, se pueden considerar como puntos de escalada los siguientes:

Fallos de avisos de tsunamis

Fallos en los sistemas de alerta de tsunami con el resultado de incremento de víctimas tanto a nivel local como regional. En algunos casos, los tsunamis distantes (o de campo lejano) también pueden causar daños en áreas alejadas de la fuente del tsunami. (Suppasri *et al*, 2021).

Fallos en centrales nucleares

Los daños que se pueden producir en una planta de energía nuclear no solo causarán la liberación de radiación alrededor de ésta, sino también la contaminación de las áreas cercanas (Suppasri *et al*, 2021). El impacto que puede provocar el daño a centrales nucleares incluye:

- Accidentes a corto plazo
- Evacuaciones a largo plazo
- Retrasos en las actividades de recuperación y reconstrucción
- Pérdida de terreno agrícola
- Daños en los productos marinos y el turismo
- Problemas ambientales

Los daños ocurridos en otras plantas de energías eléctricas o petroquímicas, también pueden causar graves impactos en la población.

Fallos de infraestructuras

Puertos, aeropuertos, malecones o carreteras son algunos ejemplos de infraestructuras importantes. Los puertos o aeropuertos dañados limitan o interrumpen las redes de transporte marítimo nacional e internacional, y cualquier actividad relacionada con el transporte de pasajeros.

Los daños en malecones y carreteras pueden retrasar las actividades de recuperación y reconstrucción, lo que a su vez también afectará a las instalaciones médicas, educativas y otros servicios (Suppasri *et al*, 2021).

Fallos en infraestructuras médicas y educativas

Los hospitales, centros médicos y otras instalaciones relacionadas son importantes para la salud de una comunidad. El daño en estas instalaciones produce una disminución de las tasas de supervivencia y un impacto en la calidad de la salud a corto y largo plazo.

Por otra parte, las escuelas u otras instalaciones educativas a menudo se designan como refugios de evacuación. Inundaciones u otros daños en estas instalaciones implican una alta probabilidad de que aumenten las víctimas (Suppasri *et al*, 2021).

5.2. Evaluación de daños durante el terremoto y tsunami de Japón en 2011

El mayor terremoto registrado en la historia de Japón ocurrió el 11 de marzo de 2011, generando un tsunami que causó la devastación de la costa este de Japón. Este evento se considera un desastre de magnitud 5 (Suppasri *et al*, 2021).

La concatenación de procesos que se dieron lugar después del terremoto aumentó considerablemente la cuantía de los daños (Figura 5.3). En primer lugar, por la localización del epicentro del terremoto, que hizo que a los daños derivados por el propio temblor de tierra se les sumase los provocados por el tsunami que éste provocó. Uno de los efectos negativos que más relevancia tuvo en relación al tsunami fue el daño que pudiera causar en la planta de energía nuclear ubicada en Fukushima, temiendo una posible explosión del reactor nuclear y la liberación de enormes cantidades de radiación. Este hecho puede considerarse como un punto de escalada importante, derivado de los dos procesos anteriormente descritos. Otro punto de escalada fue un fallo en el sistema de alertas de tsunamis (Suppasri *et al*, 2021), ya que se subestimó la altura y la fuerza con la que este tsunami impactaría en la costa, lo que provocó un gran número de muertes.

Los daños directos provocados por el tsunami también se derivaron del arrastre de escombros flotantes (embarcaciones, trozos de edificios, vehículos, etc), y de los

incendios que el impacto que dichos escombros provocaron, retrasando a su vez las actividades de rescate, recuperación y reconstrucción (Suppasri *et al*, 2021). Otro efecto que generó el terremoto fue un fenómeno conocido como “licuefacción”, que es un proceso por el cual un terreno pierde consistencia y se comporta como un fluido debido a una sacudida externa (Liangcai *et al*, 2009), en este caso el terremoto, provocando la caída de edificios.

El temblor del suelo, el tsunami, la licuefacción, los incendios y el impacto en la central nuclear causaron daños importantes en diversos tipos de infraestructuras (plantas de tratamiento de aguas residuales, tuberías de desagüe, plantas de electricidad y gasolineras), en sistemas de transporte (malecones, puertos, aeropuertos, carreteras, puentes y ferrocarriles) y en las tierras agrícolas. Estos daños pueden considerarse puntos de escalada que causaron varios efectos adicionales:

1. Retrasos de actividades de rescate y de recuperación
2. Pérdidas en los negocios relacionados con el turismo
3. Impacto económico regional en la distribución de bienes
4. Reducción de la producción de productos agrícolas y pesqueros

Los hospitales y diversas instalaciones médicas resultaron también gravemente dañados, entorpeciendo el correcto tratamiento de las víctimas a corto y largo plazo (Suppasri *et al*, 2021).

La planta de energía nuclear de Onagawa también fue golpeada por el tsunami, pero a diferencia de la planta de Fukushima, ésta se construyó a una altura de 14,8 m sobre el nivel del mar, tras considerar tsunamis históricos como el tsunami el de Keicho Sanriku de 1611, o el de Showa Sanriku de 1933. Gracias a ello, el daño en la central nuclear de Onagawa fue limitado y solo afectó a la bomba submarina y las instalaciones limítrofes. Por el contrario, la central de Fukushima, que se había construido a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar, sufrió un mayor impacto por el alcance del tsunami, generando daños importantes en su infraestructura que derivaron, entre otros, en un fallo en el sistema de generación de electricidad de emergencia. Los reactores experimentaron una fusión descontrolada, provocando

una explosión y liberación de material altamente radioactivo en la atmósfera y al agua (Evgenidis *et al*, 2021), lo que provocó la evacuación de diversas regiones afectadas.

Este desastre tuvo también un efecto negativo inmediato en los sistemas de producción principalmente en Tohoku, pero con repercusiones económicas en el resto del país. El terremoto afectó directamente a las empresas del noreste de Japón y, a través de los vínculos de suministro de productos entre las empresas, se extendió por todo el país (Carvahlo *et al*, 2016).

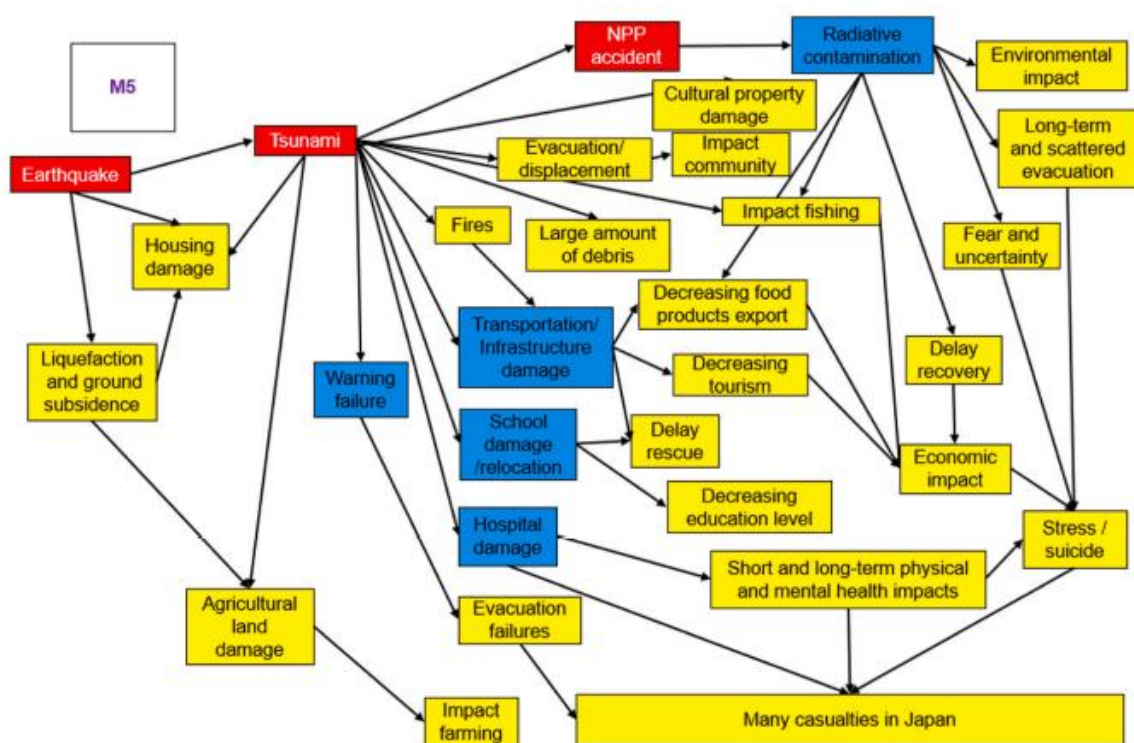


Figura 5.3: Procesos concatenados del terremoto de Japón del 2011 (Suppasri *et al*, 2021)

6. MEDIDAS DE PREDICCIÓN Y PREVENCIÓN TOMADAS ANTES Y DESPUÉS DEL DESASTRE: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DE DESASTRES.

Antes del Gran Terremoto y Tsunami del Este de Japón de 2011, este país era conocido como líder mundial en la prevención de desastres causados por tsunamis. Sin embargo, el tsunami de 2011 tuvo un grave impacto a nivel nacional (Mori *et al*, 2012). Ante el desastre de tal magnitud que se generó, el gobierno adoptó una serie de medidas para intentar evitar o mitigar los daños provocados por desastres

naturales en el futuro, especialmente por tsunamis. A continuación, se recogen algunas de las medidas de estudio, previsión y prevención que se adoptaron principalmente para mitigar el impacto de tsunamis, ya que fue el evento que más daños causó en la población.

6.1 Medidas de predicción

6.1.1 Simulaciones numéricas

Una de las técnicas aplicadas para la evaluación del riesgo de tsunamis es el desarrollo de “simulaciones numéricas de tsunamis. Después del tsunami del 2011, se han propuesto muchos modelos numéricos para simular la propagación de las olas de un tsunami e investigar los posibles daños inducidos, verificándose con datos observados del impacto del tsunami del 2011 en las costas.

Además, otro de los aspectos a investigar en relación a un tsunami es el efecto que pueda generar en zonas más lejanas (tsunami de campo lejano). Para ello, se ha propuesto el “modelado numérico del efecto dispersivo”, que simula la propagación de la onda de un tsunami de este tipo en largas distancias, incluyendo en el modelo los efectos de la fuerza de Coriolis en el desplazamiento del tsunami (Suppasri, *et al.* 2016).

Se destacan a continuación dos de las técnicas utilizadas para mejorar estas simulaciones numéricas: *la técnica HPC*, para mejorar los sistemas de alerta temprana, y *la simulación de zonas de inundación* mediante datos topográficos de alta resolución.

Técnica HPC y predicción a tiempo real

La técnica HPC (*High-Performance Computing*) permite realizar simulaciones numéricas de tsunamis con cálculos de alta velocidad, para contribuir a los sistemas de alerta temprana de tsunamis. Hay dos formas de utilizar esta técnica:

- simular miles de escenarios de peligro de tsunami
- realizar simulaciones de inundaciones por tsunamis para predecir éstas en tiempo real utilizando datos de observación

Antes del tsunami de 2011, existía un sistema de predicción de tsunamis que usaba datos de batimetría (Gidra *et al.*, 2011). Con la técnica HPC, se espera que en un futuro la predicción con simulaciones de inundaciones por tsunamis, sea lo suficientemente rápida para informar a las personas sobre las evacuaciones (en 10 minutos o menos).

Datos topográficos para zonas de inundación

Después del desastre del tsunami de 2011 en Japón, uno de los sistemas que se mejoraron fue la simulación de zonas de inundación mediante datos topográficos utilizando el radar LIDAR, comparando los resultados de la simulaciones con diferentes cuadrículas a espaciados de 5 a 40 m (Murashima *et al.*, 2008).

Antes del tsunami del 2011, los datos eran analizados generalmente con una cuadrícula de 50 m de espaciado. Usando datos topográficos a una mayor resolución, las simulaciones de inundaciones por tsunamis resultaron ser más fiables, mejorando así los sistemas de alerta temprana y las evacuaciones de las zonas en riesgo (Suppasri, *et al.* 2016).

6.2 Medidas de prevención

6.2.1 Daños producidos en las infraestructuras

Los desastres en las infraestructuras ocasionados por el tsunami de 2011 en Japón obligaron a las autoridades competentes a diseñar sistemas de prevención o mitigación de daños más eficientes, reubicando los edificios más vulnerables y reforzando estructuras.

Edificios comunes

Las edificaciones se vieron gravemente afectadas especialmente tras el impacto del tsunami. Una de las medidas adoptadas para evaluar daños futuros y mejorar la planificación de desastres costeros fue el diseño de un método estadístico denominado “función de fragilidad de tsunami”, que expresa la probabilidad de que un edificio alcance o supere un estado de daño predefinido para una intensidad de tsunami dada.

Los estudios de fragilidad de edificaciones realizados antes del tsunami de 2011 se basaban sólo en dos niveles de clasificación: edificios supervivientes o destruidos. Después del tsunami de 2011, se aplicó un método estadístico mejorado (análisis de regresión de mínimos cuadrados) para catalogar los daños a edificios. Este método tiene en cuenta diferentes propiedades físicas de los edificios, como el tipo de material con el que se construyeron, tipo de suelo, condiciones topográficas y su resistencia frente a impacto de escombros (Charvet *et al.*, 2015).

Edificios de evacuación

Durante el tsunami de 2011, edificios como hospitales, escuelas, apartamentos y hoteles sirvieron como refugios de evacuación temporales para las personas que vivían en zonas afectadas por el tsunami. En el plan de evacuación de una ciudad, la mayoría de los edificios altos se designan como refugios de evacuación. No obstante, hay que considerar también la fuerza de flujo del tsunami al establecer una altura de construcción para futuros edificios designados a ese fin.

Después de evaluar los daños que sufrieron los edificios de evacuación durante el terremoto y el tsunami de 2011, proponer nuevos diseños para edificios de evacuación es esencial para garantizar la seguridad de las personas evacuadas ante futuros desastres (Chock *et al.*, 2013). Para los edificios de evacuación ya existentes, una de las medidas a desarrollar es implementar planes de refuerzo para que los edificios cumplan con los criterios establecidos ante riesgo de tsunami.

6.2.2 Estructuras de defensa costera

Otra de las medidas adoptadas para mitigar los daños ocasionados por el impacto de un tsunami en zonas de riesgo como Japón es la construcción de estructuras de defensa costera, como terraplenes y muros rompeolas. Aunque dichas estructuras existieran previamente al tsunami del 2011, la fuerza con la que el agua penetró en la costa de Japón sobrepasó la capacidad de resistencia de dichas estructuras, obligando a las autoridades competentes a replantearse nuevos diseños de construcción (Suppasri, *et al.* 2016).

Terraplenes

Durante el Gran Tsunami de Japón, la mayoría de los fallos en los terraplenes costeros se debieron al desbordamiento, seguido de la erosión del talón no blindado del terraplén y hundimiento del mismo (Kato *et al.*, 2012) (Figura 6.1). Después del tsunami de 2011, los terraplenes dañados se han ido reconstruyendo a lo largo de toda la costa de Tohoku, con una serie de mejoras de diseño destinadas a prevenir, o al menos retrasar, el impacto del tsunami (Suppasri, *et al.* 2016).

Los terraplenes costeros que son lo suficientemente altos para evitar el desbordamiento son poco prácticos, además de generar un gran impacto visual.

Los nuevos terraplenes diseñados tienen tres diferencias principales:

- Construcción de talón reforzado
- Armadura reforzada en cresta y talud lateral
- Juntas reforzadas entre secciones de armadura

La construcción de talón reforzado está destinada a prevenir, o retrasar, los fallos que pudiera presentar la estructura, debido a la socavación de tierra en el talón del terraplén cuando impacta el tsunami, seguido por el hundimiento del mismo (Figura 6.1).

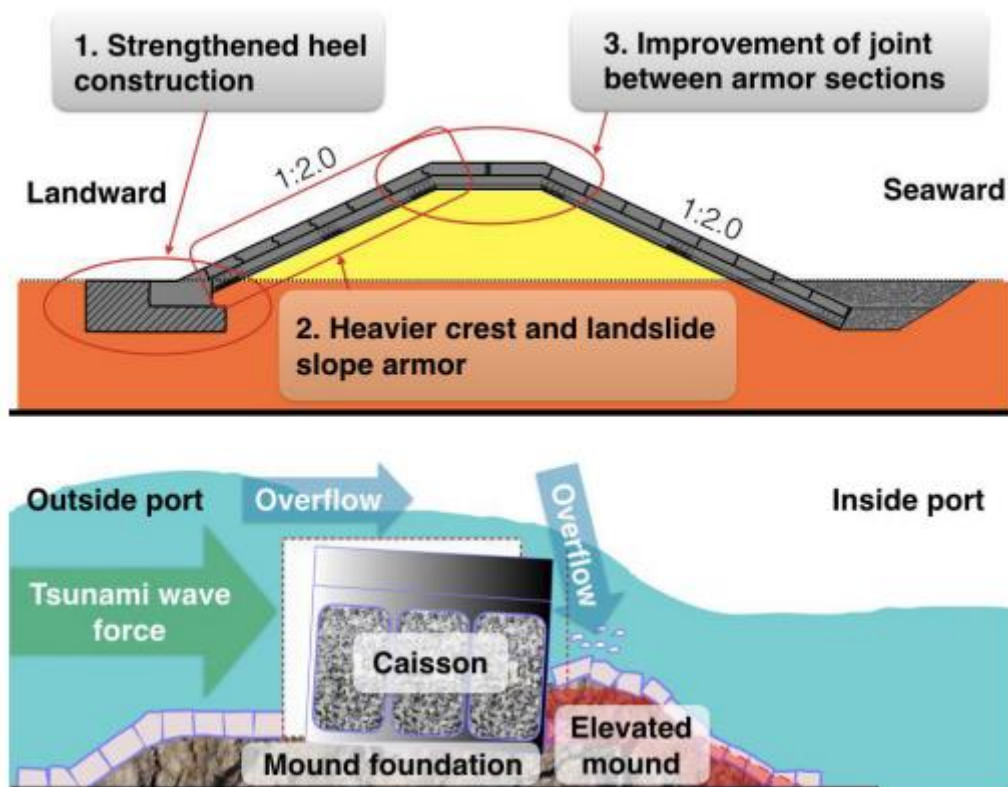


Figura 6.1: Visualización de las diferencias en el diseño de los terraplenes costeros antes (abajo) y después (arriba) del tsunami de 2011, intentando subsanar los problemas debidos al hundimiento del terraplén (Suppasri, *et al.* 2016)

Muros rompeolas

Los muros rompeolas son estructuras que se colocan en la línea de costa para proteger contra el impacto de olas de tsunami o generadas por el viento. En este caso, los rompeolas que se habían construido en la zona afectada no fueron capaces de soportar el impacto del tsunami, ya que dichas estructuras no estaban preparadas para un tsunami de tal envergadura (Arikawa, 2012) (Figura 20). De hecho, en algunas regiones fueron destruidos por completo tras el impacto de la ola. Los fallos que sufrieron los rompeolas durante el tsunami de 2011 se debieron principalmente a (Takayama, 2015):

- Socavación de los cimientos del montículo de escombros cuando fue golpeado en el talón del cajón por el tsunami
- Deslizamiento del cajón

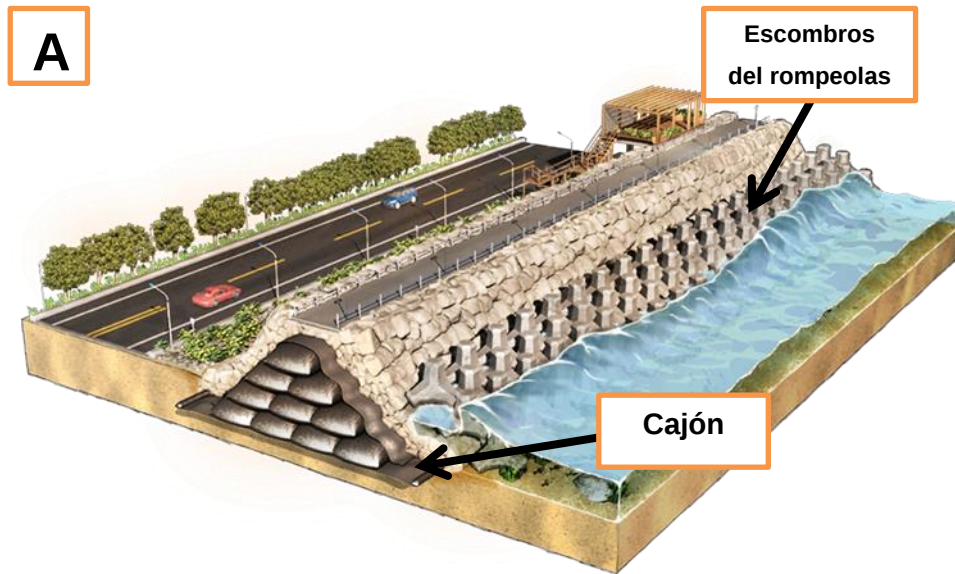


Figura 6.2: A) Muro rompeolas como estructura de defensa contra el impacto de olas de gran tamaño (oleaje o tsunami) (Fuente: <https://www.geoace.com/es/app/Construcci%C3%B3n-de-Estructuras-Marinas-y-Costeras/Rompeolas>). B) Muro rompeolas en la costa de Japón sobrepasado por la ola del tsunami de 2011 (Fuente: <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/septiembre2014/ingenieria.pdf>)

A partir del tsunami de 2011, las medidas adoptadas para reforzar estas estructuras consistieron en elevar el nivel de los cimientos del montículo de escombros en el lado del puerto del rompeolas (Iwate, 2013). Esta porción elevada actuaría como contrafuerte para resistir el deslizamiento del cajón cuando el nivel del agua se eleve durante un tsunami. Además, el montículo de escombros elevado del lado del puerto se cubriría con bloques blindados de hormigón para evitar la socavación durante el desbordamiento.

6.2.3 Otras medidas de defensa naturales: bosques costeros

Los bosques costeros mostraron cierto efecto de mitigación frente al impacto del tsunami, como captura de flujo, reducción de la altura de la inundación y un menor daño a las viviendas más alejadas de la costa (Sakamoto, 2012; Sato *et al.*, 2012; Maekawa *et al.*, 2013).

No obstante, estos bosques costeros sufrieron importantes daños por el tsunami que hay que tener en cuenta para futuros desastres, como el debilitamiento de las raíces de los árboles por: 1) el hundimiento del terreno y licuefacción provocados por el terremoto previo al tsunami; y 2) el incremento del nivel de agua subterránea, que da lugar a raíces poco profundas (Tamura, 2012).

Una de las medidas tomadas para reducir el daño en los bosques costeros fue aumentar la cota del terreno sobre el que se asientan estos bosques mediante la construcción de un terraplén artificial (Figura 6.3).



Figura 6.3. Medidas para mitigar el impacto de un tsunami mediante la construcción de un terreno elevado artificial (*coastal dike*) sobre el que se asienta el bosque costero (Miyagi, 2014).

6.2.4 Sistemas de alerta temprana

El 11 de marzo de 2011, se pudo emitir una advertencia de tsunami inicial dentro de los tres minutos posteriores al terremoto, pero la advertencia fue subestimada. Los fallos que hubo en relación al sistema de alerta de tsunami fueron las siguientes:

1. Se estimó una magnitud del terremoto de 7,9, inferior a la que se conoce que alcanzó, que fue de 9,0. Este error de cálculo se debió a una saturación de los datos sísmicos que recibían.
2. Por consiguiente, la altura pronosticada del tsunami también fue subestimada.

3. Esta subestimación de los efectos del tsunami provocó una falsa sensación de relativa tranquilidad entre la población, lo que causó retrasos e interrupciones en la evacuación.

A partir de entonces, las medidas que se tomaron a este respecto fueron, en primer lugar, desarrollar un sistema mejor de medición de magnitudes de terremotos, y en segundo lugar, mejorar las instalaciones de observación y los sistemas de alerta de tsunamis, preferiblemente avisando dentro de los tres primeros minutos, y que la primera advertencia emitida bajo tales circunstancias deba hacerse en base al peor escenario posible (Suppasri, *et al.* 2016).

6.2.5 Medidas de evacuación

Un aspecto importante a tener en cuenta durante una evacuación por alerta de tsunami es que los residentes deben viajar largas distancias hasta los refugios. Muchos utilizaban sus automóviles particulares para desplazarse, ocasionando graves atascos y retenciones, y dificultando así las labores de evacuación.

Sin embargo, la evacuación vehicular sigue siendo efectiva, especialmente para los evacuados de edad avanzada y para los evacuados con discapacidades que tienen dificultades para realizar rutas de larga distancia. La evacuación en automóvil en caso de desastres causados por tsunamis estaba prohibida en Japón antes de 2011 (Fire and Disaster Management Agency, 2002). Sin embargo, después del evento, el uso de automóviles en la evacuación por tsunami se ha aceptado para personas vulnerables que no pueden ser evacuadas, siempre que dichos automóviles no supongan una obstaculización para el desplazamiento de los demás ciudadanos (National Public Safety Commission, 2014). Otra forma de evacuación que se implantó fue la denominada “evacuación vertical”, donde se establecen puntos altos de edificios por encima de la incertidumbre de la altura del tsunami.

Los investigadores están intentando desarrollar modelos de simulacros de evacuación para que las personas puedan planificar fácilmente nuevas estrategias de evacuación. Hay que tener en cuenta que no toda la población dispone de los medios necesarios para efectuar una salida rápida en caso de alerta de tsunami. De hecho, el tiempo de llegada más corto del tsunami de 2011 a la costa fue de 30

minutos, un tiempo que puede llegar a ser muy insuficiente sobre todo en regiones muy pobladas. Mejorar los sistemas de alerta y los planes de evacuación es, por tanto, de vital importancia en este tipo de situaciones para reducir al máximo el número de víctimas en estas catástrofes naturales. (Suppasri, *et al.* 2016)

7. CONCLUSIONES

Los terremotos y tsunamis son dos de los desastres naturales que mayor transcendencia tienen, ya sea por los daños materiales ocasionados, o por el número de víctimas que dejan atrás. Un ejemplo de ello es el terremoto y tsunami de Japón de 2011, una de las mayores catástrofes naturales que se han registrado en la historia reciente, dejando a su paso más de 15.000 fallecidos e importantes daños en infraestructuras.

El archipiélago de Japón es una zona con un alto riesgo geológico, principalmente por los terremotos que se generan en la zona de subducción. De hecho, registros previos de terremotos y tsunamis en esta región alertaban del alto grado de peligrosidad sísmica que sufren estas islas. Gran parte del desastre acontecido en marzo de 2011 en las costas de Japón se debió a una concatenación de procesos de origen natural y antrópico. Por un lado, el agravante del tsunami provocado por el propio terremoto, siendo ya este seísmo de una magnitud muy elevada. Por otro, los fallos en los sistemas de alerta de tsunami, en las evacuaciones y la falta de preparación en edificaciones, sumado al daño en la central nuclear, que incrementaron de manera considerable el grado de vulnerabilidad de la población.

En toda región susceptible de sufrir una catástrofe natural, una correcta evaluación del riesgo geológico es el primer paso en la mitigación o prevención del daño que pueda causar proceso natural. Japón, aun contando con un nivel de desarrollo elevado, sufrió un grave impacto especialmente por el tsunami, lo que ha llevado a replantear mejoras en los sistemas de alerta frente a tsunamis, en la planificación de las evacuaciones y en el diseño de infraestructuras. Casos como el de Japón nos demuestran que la sociedad debe de tomar más conciencia sobre los riesgos geológicos y de cómo actuar en caso de emergencia, aspectos clave para disminuir sobre todo el coste humano en las catástrofes naturales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, D., 2018. A magnitude scale for cascading disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 180-185.
- Arikawa, T., Sato, M., Shimosako, K., Hasegawa, I., Yeom, G. S. & Tomita, T. (2012) "Failure mechanism of Kamaishi breakwaters due to the Great East Japan earthquake tsunami," in Proc. 33rd Int. Conf. Coastal Engineering, Santander, pp. 1–13
- Badoux, A., Andres, N., Techel, F., Hegg, C., 2016. Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2747–2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>.
- Barnes, G. L., 2003. Origins of the Japanese Islands: The New "Big Picture". *Nichibunken Japan Review*, 3-50.
- Brabb, E.E., 1991. The world landslide problem. Episodes. *J. Int. Geosci.* 14, 52–61. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1991/v14i1/008>
- Carvalho, V.M., Nirei, M., Saito, Y.U., Tahbaz-Salehi, A., 2016. Supply chain disruptions: Evidence from the Great East Japan earthquake. *PRI Discussion Paper Series (No.16A-15)*.
- Charvet, I., Suppasri, A., Kimura, H., Sugawara, D., Imamura, F., 2015. Fragility estimations for Kesennuma City following the 2011 Great East Japan tsunami based on maximum flow depths, velocities and debris impact, with evaluation of the ordinal model's predictive accuracy. *Nat. Hazards* 79(3), 2073–2099.
- Chock, G., Carden, L., Robertson, I., Olsen, M., Yu, G., 2013. Tohoku tsunami-induced building failure analysis with implication for U.S. tsunami and seismic design codes. *Earthq. Spectra* 29(S1), S99–S126.
- Duputel, Z., Rivera, L., Kanamori, H., & Hayes, G. (2012). Inversión de fuente de fase W para terremotos de moderados a grandes (1990–2010). *Revista geofísica internacional*, 189(2), 1125-1147
- Evgenidis, A., Hamano, M., Vermeulen, W.N., 2021. Economic consequences of follow-up disasters: lessons from the 2011 Great East Japan Earthquake. *Energy Economics*, 104, 105559.
- Froude, M., Petley, D., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016.

- Gidra, H., Haque, I., Kumar, N. P., Sargurunathan, M., Gaur, M. S., Laxmi, V. & Zwolinski, M., [2011.] "Parallelizing TUNAMI-N1 using GPGPU. En: *2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, New York, US, 845-850.
- Grahn, T., Jaldell, H., 2017. Assessment of data availability for the development of landslide fatality curves. *Landslides* 14, 1113–1126. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0775>.
- Liangcal, H., Elgamal, A., Abdoun, T., Abe, A., Dobry, R., Hamada, M., Menses, J., Sato, M., Shantz, T., Tokimatsu, K., 2009. Liquefaction-induced lateral load on pile in a medium Dr Sand layer. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(7), 916-938. DOI: 10.1080/13632460903038607
- Iwate, P., 2013. Iwate Reconstruction Newsletter. , no. 41.
- Kato, F., Suwa, Y., Watanabe, K., Hatogai, S., 2012. Mechanisms of coastal dike failure induced by the Great East Japan Earthquake tsunami. *Coastal Eng. Proc.* 33, 1–9.
- Keller, E.A. y Blodgett, R.H. (2007). Riesgos Naturales 1º Edición. Pearson Education. 407 pp.
- Lefevre, S., 2011. The great East Japan (Tohoku) 2011 earthquake: Important lessons from old dirt. Earth Observatory of Singapore
- Llorente, M., Laín, L., 2009. Enseñanza de las ciencias de la tierra.: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Vol. 17, Nº. 3. 232-241 pp. ISSN 1132-9157 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3309131>
- Maekawa, T., Nihei, Y. Nakada, H., 2013. Study on tsunami mitigation effect of coastal dune and fill. *J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B1 (Hydr. Eng.)* 69(4), I 1453-I 1458 (in Japanese)
- Mamoru Murata, A., 2014. Science Instruction for the Prevention and Reduction of 2020 Nankai Earthquake Disaster in Tokushima, Southwest Japan. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 143, 404-406. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.503>
- Miyagi, P., 2014. Report on Tenacious coastal embankments.

- Mori, N., Takahashi, T., 2012. 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group. Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250001-1.
- Murashima, Y., Takeuchi, H., Imamura, F., Koshimura, S., Fujiwara, K., Suzuki, T., 2008. Study on topographic model using LiDAR for tsunami simulation. *Proceedings of ISPRS XXXVII (B8)*, 223-228.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C., 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides* 3, 159–173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>
- Oreskes, N., 1999. The rejection of continental drift: Theory and method in American earth science. Oxford University Press.
- Pescaroli, G., y Alexander, D., 2018. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: a holistic framework. *Risk analysis*, 38(11), 2245-2257.
- Rosenberg, M., 2018, Ring of Fire-Home to the Majority of the World's Active Volcanoes.
- Sakamoto, T., 2012. Disaster mitigation effect of coastal forests in capturing floating debris. *Forest Science* 33, 13–16 (in Japanese)
- Sato, H., Torita, H., Masaka, K., Abe, T., Noguchi, H., Kimura, K. Sakamoto, T., 2012. Relationship between treefall damage and forest structure of *Pinus thunbergii* coastal forest by the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster: An example of Misawa City of Aomori Prefecture. *J. Jap. Soc. Coastal Forest* 11(2), 41–45.
- Sato, K., Kobayashi, M., Ishibashi, S., Ueda, S., Suzuki, S., 2012. Chest injuries and the 2011 Great East Japan Earthquake. *Respiratory investigation*, 51(1), 24-27.
- Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S., 2012. Tsunamigenic Ratio of the Pacific Ocean earthquakes and a proposal for a Tsunami Index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(1), 175-185. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-175-2012>
- Suppasri, A., Latcharote, P., Bricker, J. D., Leelawat, N., Hayashi, A., Yamashita, K., Makinoshima, F., Roeber, V., Imamura, F., 2016. Improvement of tsunami countermeasures based on lessons from The 2011 Great East

Japan Earthquake and Tsunami—situation after five years. *Coastal Engineering Journal*, 58(4), 1640011-1.

- Suppasri, A., Maly, E., Kitamura, M., Pescaroli, G., Alexander, D., y Imamura, F., 2021. Cascading disasters triggered by tsunami hazards: A perspective for critical infrastructure resilience and disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102597>
- Takayama, T., 2015. Mechanisms of and countermeasures against damage to facilities. Reconstruction after the Great East Japan tsunami: Current status and future plan. *J. Coastal Develop. Instit. Technol.* 43, 24–26 (in Japanese).
- Tamura, H., 2012. Uprooted damage in the coastal forest of Sendai Plain. *Shinrin Kagaku* 66, 3–6 (in Japanese).
- Tarbuck E.J., Lugens F.K., 2019., Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física, 8ª edición, Pearson Educación S. A., Madrid
- Van der Pluijm, B. A., Marshak, S., 2004. *Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics*. Second edition. ISBN : 9780393117806

Páginas web:

- Fire and Disaster Management Agency [2002] “Report of investigation on tsunami countermeasures promotion manual,” 139 pages. (In Japanese) Available at: [http://www.fdma.go.jp/html/new/tunami1403/tunami index.html](http://www.fdma.go.jp/html/new/tunami1403/tunami%20index.html)
- GLOSARIO DE TSUNAMIS, 2019, Colección Técnica, 85
- Japanese National Police Agency, 2017 <https://web.archive.org/web/20170106143349/http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>
- <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>
- National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical
- Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5PN93H7
- National Public Safety Commission [2014] “Instruction of transportation,” Available at: <https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm> (Accessed 10 October 2015)

- NEIC/ Sistema Mundial de Datos Geofísicos
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2009. 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Technical Report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction