



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias  
Experimentales

# TECTÓNICA DE PLACAS Y RIESGOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD SÍSMICA

Autora: Ana Blanca Jiménez

Grado: Ciencias Ambientales

Fecha: 12/05/2025



CREA



Universidad de Jaén



Trabajo Fin De Grado

# **TECTÓNICA DE PLACAS Y RIESGOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD SÍSMICA**

A handwritten signature in black ink that reads 'Ana', enclosed within a large, stylized oval shape.

**Alumna: Ana Blanca Jiménez**

**Jaén, Mayo, 2025**

## ÍNDICE

1	MATERIAL BIBLIOGRÁFICO.....	2
2	INTRODUCCIÓN.....	2
3	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	4
4	FUNDAMENTO GEOLÓGICO.....	5
4.1	Introducción a la Tectónica de Placas.....	5
4.1.1	Las Placas Tectónicas.....	6
4.1.2	Tipos de límites de placa y su dinámica.....	8
5	TERREMOTOS Y RIESGOS ASOCIADOS.....	11
5.1	Sismología.....	11
5.1.1	Tipos de fallas.....	11
5.1.2	Ondas sísmicas.....	12
5.1.3	Medidas de los terremotos: Magnitud e Intensidad.....	13
5.2	Riesgo sísmico y sus efectos.....	14
5.2.1	Concepto de riesgo.....	14
5.2.2	Riesgos primarios.....	15
5.2.3	Riesgos concatenados.....	16
5.3	Predicción y prevención del riesgo sísmico.....	17
5.3.1	Predicción.....	17
5.3.2	Prevención.....	18
6	CASOS DE ESTUDIO.....	18
6.1	Terremoto de Kobe (1995).....	18
6.1.1	Antecedentes y contexto geológico.....	18
6.1.2	Análisis de daños y medidas preventivas adoptadas.....	23
6.2	Terremoto de Haití (2010).....	28
6.2.1	Antecedentes y contexto geológico.....	28
6.2.2	Análisis de daños y medidas preventivas adoptadas.....	33
7	DISCUSIÓN.....	38
8	CONCLUSIÓN.....	41
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

## **RESUMEN.**

La Tectónica de placas es una teoría esencial e integradora para entender la dinámica del interior de la Tierra y los fenómenos asociados, en especial los terremotos. En este trabajo se presenta una introducción a dicha teoría, se analiza como interactúan entre sí las placas tectónicas y se realiza un análisis de los sismos, incluyendo los mecanismos que los generan, los distintos tipos de fallas, además de los riesgos asociados tanto primarios como concatenados.

Para profundizar en estos conceptos, se estudian dos casos concretos: el terremoto de Kobe de 1995 y el de Haití de 2010. Se examinan los antecedentes, el contexto geológico de los sismos y se discuten los factores que influyeron en el impacto de estos eventos.

Finalmente, el estudio subraya la importancia de la investigación científica para poder comprender mejor los terremotos y poder diseñar e implementar medidas para prevenir y minimizar los daños producidos por los terremotos. La comparación de los casos de los terremotos estudiados pone de manifiesto el valor de la prevención.

**Palabras clave:** Placas tectónicas, Terremotos, Haití 2010, Kobe 1995, Riesgos geológicos.

## **ABSTRACT.**

The theory of tectonic plates is an essential theory for understanding the dynamics of the Earth's interior and the associated phenomena, especially earthquakes. This work presents an introduction to this theory and analyses the interaction of the tectonic plates, also analyse earthquakes including the mechanisms that generate the seismic movement, the types of faults and the associated risks.

To understand these concepts are studied two cases: The 1995 Kobe Earthquake and the 2010 Haiti Earthquake. With the analysis, are examined the causes of the earthquakes and factors that influence the impact of this events.

Finally, this study highlights the importance of continue investigating for understand better earthquakes and increase the possibilities to prevent and minimize damage caused. The cases remarks the importance of prevention.

**Key words:** Plates tectonics, Earthquakes, Haiti 2010, Kobe 1995, Geological Risk.

## **1 MATERIAL BIBLIOGRÁFICO.**

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo una selección y un análisis de las fuentes bibliográficas de manera rigurosa, dándole más peso a aquellas fuentes de mayor relevancia en sismología y riesgos geológicos. En la investigación, se han usado libros especializados, artículos científicos y publicaciones de referencia siempre primando la fiabilidad de las fuentes empleadas.

Se han usado bases de datos académicas como ScienceDirect, Scopus o Google Scholar lo que ha permitido acceder a investigaciones recientes y con información contrastada, garantizando la calidad y la validez de la información. Para la búsqueda de información se han usado palabras clave como "Plate Tectonics", "Earthquake", "Kobe 1995", "Haiti 2010", entre otras, combinadas con conectores booleanos como "OR", "AND" y "NOT" lo que ha permitido obtener resultados más específicos y precisos.

Cada fuente elegida se ha empleado de manera adecuada, contribuyendo al desarrollo del trabajo y el cumplimiento de los objetivos planteados.

## **2 INTRODUCCIÓN.**

La teoría de la tectónica de placas ha sido fundamental para entender distintos fenómenos geológicos como pueden ser los terremotos y los volcanes, esta teoría ha permitido a los científicos conocer mejor la dinámica del interior del planeta (Fernández y Alfaro, 2019).

Los terremotos se producen debido a la acumulación de energía en el interior de la Tierra lo que provoca una deformación elástica de las rocas. Una vez superada la capacidad de las rocas para soportar la tensión, la energía se libera de forma súbita, y se fracturan dando lugar a un desplazamiento que ocurre a lo largo de fallas que son estructuras de ruptura en la que los bloques de roca de un lado se desplazan con respecto al otro (Keller and Blodgett, 2007). Las fallas pueden provocar terremotos al desplazarse súbitamente, mientras que otras apenas generan actividad sísmica al experimentar desplazamientos graduales ("reptación"). Algunas fallas se consideran inactivas, mientras que otras siguen activas y pueden originar movimientos sísmicos que pueden afectar a las ciudades y a sus comunidades (Hyndman and Hyndman, 2016).

Es fundamental llevar a cabo un análisis de los riesgos sísmicos en profundidad para entender la naturaleza y los efectos que pueden provocar. Para ello, es útil examinar el comportamiento de estos riesgos a lo largo de la historia ya que se trata de procesos que se repiten en el tiempo. Además de analizar los factores que lo desencadenan o que pueden influir en sus consecuencias, como las estructuras geológicas, o las modificaciones realizadas por los seres humanos (Keller and Blodgett, 2007).

Comprender cómo se comportan las placas tectónicas es clave para prever y mitigar los impactos de un terremoto. Los riesgos son cada vez más frecuentes y de mayor intensidad debido al aumento de la población, así como al asentamiento de las personas en los entornos de riesgo (Keller and Blodgett, 2007). Para poder ver el impacto de los terremotos y los volcanes no solo es importante considerar la magnitud del mismo, sino también el efecto que tiene en la población y los bienes expuestos en la zona afectada, un terremoto en áreas poco pobladas probablemente no suponga un gran peligro, pero otro de iguales características en zonas donde hay mucha población y/o bienes, puede ser devastador (Hyndman and Hyndman, 2016).

La mejor manera de actuar para reducir daños es identificar los procesos que supongan un peligro y delimitar las zonas geográficas donde ocurren, facilitando la creación de mapas de riesgo sísmico que son vitales para la planificación urbana. Hay que intentar evitar la instalación de las personas y propiedades en el lugar de riesgo (Keller and Blodgett, 2007).

Aprender a predecir desastres para minimizar las pérdidas humanas y los daños en las infraestructuras es muy importante. Para ello hay que identificar la localización donde se puede producir el riesgo, determinar la probabilidad de que ocurra un fenómeno de determinada magnitud e intentar identificar fenómenos precursores que predigan el evento. Esto puede llevar a las autoridades a establecer sistemas de alarma y que permitan la evacuación de las personas de las zonas de mayor riesgo (Keller and Blodgett, 2007).

El conocimiento de la tectónica de placas y de la sismología también es importante para adecuar el diseño de estructuras capaces de resistir movimientos sísmicos y la planificación del uso del suelo en áreas de riesgo. Si no se puede evitar que la población habite en zonas susceptibles a terremotos se debe tener en cuenta la ubicación segura de las instalaciones, protección estructural de los edificios para evitar daños por derrumbe, educación de la ciudadanía, conexión con sistemas de alerta

temprana y con las autoridades encargadas de prestar ayuda (Keller and Blodgett, 2007).

Las entidades gubernamentales desempeñan un papel fundamental en la mitigación de desastres, involucrándose en la investigación, monitoreo y prevención de eventos peligrosos. Sin embargo, algunas políticas pueden no ser tan efectivas como se esperaba, por ello la colaboración internacional y los avances tecnológicos pueden permitir a las autoridades tomar dediciones rápidas y eficaces en situaciones de emergencia (Hyndman and Hyndman, 2016).

Este trabajo parte de la hipótesis de que la comprensión de la tectónica de placas y más específicamente la sismología, no solo puede ayudar a comprender mejor los terremotos, sino que también puede ofrecer herramientas para la prevención y mitigación, reduciendo los impactos en las infraestructuras y la población.

### **3 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.**

Desde el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas en la década de 1960, ha sido posible comprender mejor los procesos geológicos que llevan ocurriendo en la Tierra a lo largo de los años. Este avance permitió un gran progreso en la Geología y las Ciencias de la Tierra dando respuesta a cuestiones que van planteándose continuamente por la comunidad científica (Alfaro et al., 2013).

El desarrollo de distintas técnicas y del mayor conocimiento de las características geológicas está permitiendo cuantificar los procesos geológicos con mayor precisión. No obstante, a pesar de los avances esta teoría sigue en desarrollo y procesos como los asociados a la actividad sísmica siguen siendo objeto de estudio (Alfaro et al., 2013).

Este estudio se centra en los terremotos de Kobe en 1995 y de Haití en 2010, los cuales tuvieron un gran impacto, afectando a las poblaciones y a la economía de estos lugares, aunque de manera claramente diferente. Ambos casos evidencian la necesidad de avanzar en el conocimiento y el desarrollo tecnológico, con el fin de mejorar la preparación y las medidas de mitigación ante estos eventos.

El terremoto de Haití de 2010, tuvo una magnitud devastadora, dejando gran cantidad de muertos y heridos debido a las infraestructuras deficientes y la falta de preparación. (Abbott, 2016). En contraste, el terremoto de Kobe de 1995 con una magnitud también importante produjo graves daños, aunque comparativamente mucho menores porque

las medidas tomadas para reducir daños y facilitar la posterior recuperación fueron mucho más importantes (Keller and Blodgett, 2007).

#### Objetivos:

1. Entender la relación entre la tectónica de placas y los riesgos sísmicos.
2. Analizar y comprender los mecanismos que generan los terremotos y sus riesgos asociados.
3. Seleccionar dos casos de estudio y analizar el contexto geológico y los daños producidos: el terremoto de Kobe de 1995 y el terremoto de Haití de 2010.
4. Discutir las similitudes y diferencias que presentan ambos terremotos y obtener conclusiones a partir de las lecciones aprendidas en cada caso.

## **4 FUNDAMENTO GEOLÓGICO.**

### **4.1 Introducción a la Tectónica de Placas.**

La tectónica de placas es una teoría integradora que establece un marco general que explica la dinámica de la litosfera terrestre. Esta teoría describe cómo la superficie de la Tierra está dividida en grandes placas que se mueven e interactúan entre sí, siendo estos movimientos las principales causas de la mayoría de los volcanes y terremotos, así como en el último término la formación de montañas (Abbott, 2016).

Para comprender cómo y por qué la Tierra cambia como lo hace han sido necesarias las contribuciones y colaboraciones de muchos científicos a lo largo de los siglos. A principios del siglo XVII, Francis Bacon observó una similitud entre las costas atlánticas de América del Sur y África sugiriendo que alguna vez estuvieron unidas. Después, Eduard Suess en 1885 propuso que Gondwana que era un antiguo supercontinente se dividió, conociéndose este proceso de separación, movimiento y recombinación de los continentes como deriva continental. En 1915, Alfred Wegener recopiló información a favor de la deriva continental, pero su teoría fue rechazada por muchos científicos ya que no consiguió proponer un modelo que explicara satisfactoriamente los movimientos descritos. El avance clave llegó tras los importantes avances científicos derivados del estudio de los fondos oceánicos durante la segunda mitad del siglo XX, que llevaron a entender que la litosfera se desacopla

de la astenosfera y se mueve lateralmente, lo que explica cómo los continentes pueden desplazarse sobre el manto (Abbott, 2016).

En la década de 1960, la aceptación generalizada de la teoría de la tectónica de placas significó en cierta manera la recuperación de la teoría de Wegener de la deriva continental (Abbott, 2016). Gracias a esta teoría podemos saber qué hace millones de años había un supercontinente denominado Pangea que comenzó a fragmentarse y las placas tectónicas movieron los continentes hasta sus posiciones actuales (Hyndman and Hyndman, 2016).

#### *4.1.1 Las Placas Tectónicas.*

Las placas tectónicas son los fragmentos en los que se divide la litosfera terrestre, con un comportamiento rígido. Estas se desplazan sobre la astenosfera que es la capa más externa del manto terrestre, y tiene un comportamiento plástico. El material de la astenosfera asciende en forma de magma y solidifica dando lugar a un nuevo fondo oceánico o litosfera que se desplaza sobre la astenosfera (Abbott, 2016).

#### **¿Qué mueve las placas tectónicas?**

Durante un tiempo se pensó que las placas tectónicas se movían pasivamente sobre las celdas de convección en el manto debido a los movimientos ascendentes, horizontales y descendentes generados por el calor del interior de la Tierra, arrastrando así las placas (Fernández et al., 2019).

Investigaciones posteriores demostraron que las placas intervienen activamente en el proceso, que el movimiento de las placas se debe a la acción de un conjunto de fuerzas que ofrecen resistencia al movimiento y de fuerzas gravitacionales. La fuerza más relevante es el “tirón de placa” que ocurre en la zona de subducción, y que es resultado del engrosamiento y consiguiente aumento de peso de las placas, que las hace hundirse en la astenosfera por su propio peso; además, existen otras como la fuerza de empuje de dorsal y la fuerza de arrastre que tienen menor influencia (Fernández et al., 2019).

## Distribución de las placas tectónicas

El mapa de las placas tectónicas ha cambiado a lo largo de la historia geológica, cambia actualmente y cambiará continuamente a lo largo del tiempo. A gran escala se considera que existen actualmente 14 placas tectónicas, descritas por Seiya Uyeda en su libro "The new view of Earth" en 1978 (Alfaro y Fernández, 2019). Destacan siete grandes placas: la Africana, Norteamericana, Euroasiática, Indoaustraliana, Pacífica, Antártica y Sudamericana. Además, con un tamaño medio se reconocen las placas Caribeña, Coco, Arábica, Nazca, Scotia, Juan de Fuca y Filipina (Fig. 4.1) (Alfaro et al., 2013).

Sin embargo, gracias a los avances científicos se han identificado más placas a lo largo de los años por lo que a las catorce placas clásicas se le suman unas decenas más de un tamaño menor (Alfaro et al., 2013). Destaca el modelo MORVEL-56 que identifica el movimiento de 56 placas tectónicas, aunque muy probablemente, con los resultados de nuevas investigaciones, a este modelo se le agregarán otras (Alfaro y Fernández, 2019).



Figura 4.1. Mapa de las principales placas tectónicas, las flechas indican las direcciones de movimiento. Las tasas de movimiento se muestran en centímetros por año (Abbott, 2016).

#### 4.1.2 Tipos de límites de placa y su dinámica.

En el planeta la actividad sísmica se concentra cerca o a lo largo de los límites de las placas tectónicas (Fig. 4.2), aunque también se pueden producir terremotos en el interior de las placas, aunque son menos comunes (Hyndman and Hyndman, 2016).

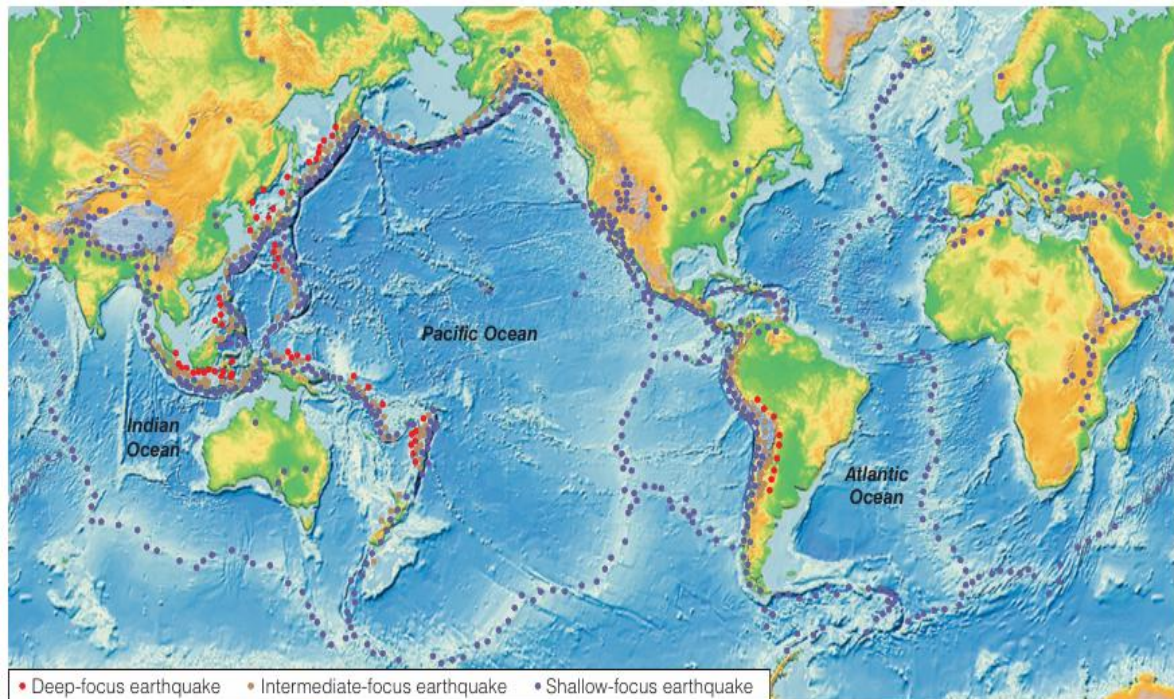


Figura 4.2. Terremotos en los límites de las placas. La profundidad (foco) del terremoto se muestra con diferentes colores. (Hyndman and Hyndman, 2016).

En los bordes de las placas se evidencia su movimiento, pueden comportarse de diversa manera dependiendo del tipo de límite que compartan. Las placas pueden colisionar incluso deslizarse una debajo de la otra, alejarse entre sí o deslizarse lateralmente (Hyndman and Hyndman, 2016).

Las placas se separan en los límites denominados divergentes, se acercan en los límites convergentes y en los límites transformantes las dos placas se deslizan lateralmente una respecto a la otra (fig. 4.3) (Hyndman and Hyndman, 2016).

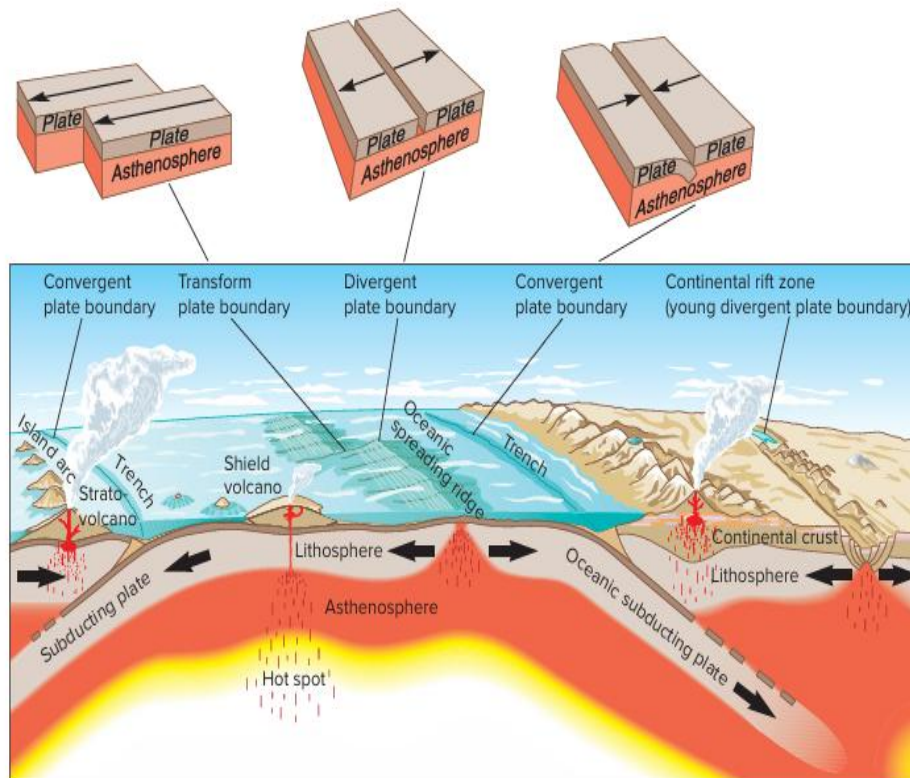


Figura 4.3. Vista esquemática de los límites divergentes (cresta de expansión), convergentes (zona de subducción) y transformantes (Abbott, 2016).

## Límites divergentes

Los límites divergentes (fig. 4.3), donde las placas se separan, el magma de la astenosfera asciende formando una cresta con un valle de rift central, que es una depresión hundida que se crea en zonas donde las placas se están separando, es decir, en límites divergentes. Un sistema de crestas se extiende a través de las cuencas oceánicas en la que se produce actividad volcánica con flujos de lava basáltica y también terremotos (Hyndman and Hyndman, 2016).

La lava basáltica cubre el fondo oceánico. El magma asciende a la superficie donde se enfría al entrar en contacto con el agua creando una corteza sólida de bloques de lava que envuelve al magma fundido. A medida que las placas se alejan de los centros de expansión (las dorsales oceánicas) a lo largo de millones de años, se enfrían, se engrosan por la parte inferior y se cubren de sedimentos, lo que aumenta su densidad, provoca que las dorsales oceánicas se eleven y la parte de la placa más alejada de la dorsal se hunde por su propio peso, acabando en un proceso de subducción. El nuevo

fondo oceánico se desplaza continuamente desde la cresta conforme se ensanchan los océanos (Hyndman and Hyndman, 2016).

## **Límites convergentes**

Los límites convergentes (fig. 4.3), son regiones donde las placas se acercan. Estos incluyen tanto las zonas de subducción como las zonas de colisión continental. En ambas situaciones ocurren terremotos, pero los volcanes son más frecuentes en las zonas de subducción (Hyndman and Hyndman, 2016).

Existen tres tipos principales de colisiones: (1) el choque de una placa de corteza oceánica con otra placa oceánica, (2) una colisión de una placa oceánica con otra de corteza continental y (3) entre dos placas de corteza continental. Estos límites de placa dan lugar a subducción o a colisión con levantamiento continental (Abbott, 2016).

### Zonas de subducción

Conforme se genera nueva corteza oceánica en las zonas de extensión, en otros bordes de la placa se debe destruir corteza antigua para mantener la superficie terrestre. Esto sucede en las zonas de subducción, en la que una placa se hunde bajo otra y se introduce hacia el interior de la Tierra, dando lugar este proceso a una intensa actividad sísmica y volcánica (Hyndman and Hyndman, 2016).

Los terremotos generados en las zonas de subducción suelen ser los de mayor intensidad y por tanto causar grandes desastres. También pueden generar tsunamis en los que la placa continental se puede desplazar bruscamente sobre la placa oceánica durante un terremoto, dando lugar a olas que pueden propagarse por el océano y alcanzar gran altura en las zonas costeras generando importantes daños (Hyndman and Hyndman, 2016).

### Zonas de colisión

En estos casos dos placas continentales chocan y ninguna se hunde, dando lugar a orogenias, generando grandes montañas como el Himalaya que es una colisión entre India y Asia. Los terremotos ocurren con frecuencia causando graves daños ya que afectan a una área extensa debido a la corteza rígida y gruesa de las cadenas montañosas (Hyndman and Hyndman, 2016).

## **Límites transformantes**

Están asociados a las dorsales oceánicas y rompen la continuidad de estas. Los límites transformantes o fallas transformantes (Fig 4.3) ocurren cuando una placa se desliza lateralmente con respecto a la otra. Algunas de estas fallas desplazan segmentos de las crestas oceánicas, y la parte de la falla situada entre los extremos desplazados de la cresta experimenta un movimiento una junto a la otra en direcciones opuestas generando numerosos y grandes terremotos. Aunque estos terremotos no causan daños a las personas al ocurrir en el fondo del mar, si suceden en los continentes, pueden ser devastadores al pasar por zonas muy pobladas (Hyndman and Hyndman, 2016).

## **5 TERREMOTOS Y RIESGOS ASOCIADOS.**

### **5.1 Sismología.**

Debido a los terremotos el planeta tiembla y podemos sentir las vibraciones que provoca. Los terremotos pueden ser causados entre otros por impactos de meteoritos o por actividad volcánica, pero lo más frecuente es que se produzcan por movimientos del terreno a lo largo de fallas que desplazan bloques de rocas una vez superada la tensión elástica, liberando súbitamente energía que se manifiesta en forma de sacudidas (Abbott, 2016).

A lo largo de un año tiene lugar miles de terremotos, muchos de ellos sentidos por la población. Para comprender el efecto que tienen hay que conocer cómo se miden y las formas de comparación unos con otros. Estos fenómenos se evalúan a través de dos parámetros que son la magnitud y la intensidad (Keller and Blodgett, 2007).

#### *5.1.1 Tipos de fallas.*

Las fallas se clasifican según el movimiento que tengan las rocas a ambos lados de la fractura. Hay dos tipos principales de fallas, por un lado, tenemos las fallas con desplazamiento vertical (de hundimiento) que tienen un movimiento vertical, dentro de las cuales se distinguen las fallas normales e inversas y por otra parte tenemos las fallas de salto en dirección con un movimiento en la horizontal (Fig.

5.1) (Keller and Blodgett, 2007). Aunque se usa esta clasificación simplificada, existen movimientos en fallas que implican tanto desplazamientos verticales como horizontales.

- Fallas normales: se dan cuando el bloque de techo se desliza hacia abajo con respecto al bloque de muro. La fuerza que domina en estas fallas es la extensión (Abbott, 2016).
- Fallas inversas o de cabalgamiento: el bloque techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque de muro. La fuerza que domina en este tipo de fallas es la compresión (Abbott, 2016).
- Fallas de salto en dirección o de desplazamiento horizontal: este tipo de fallas se caracteriza por un movimiento horizontal de los bloques uno respecto al otro (Abbott, 2016).

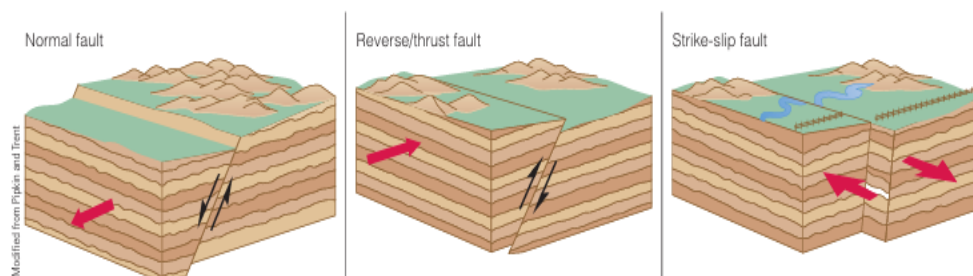


Figura 5.1. Representación de una falla normal, una falla inversa y una falla de desplazamiento horizontal (Abbott, 2016).

### 5.1.2 Ondas sísmicas

La liberación de energía en un terremoto se produce en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones desde el hipocentro. Hay distintos tipos de ondas sísmicas, aquellas profundas que viajan en el interior de la Tierra y las que se propagan en superficie (Keller and Blodgett, 2007).

Dentro de las ondas profundas encontramos las ondas P o primarias que son muy rápidas, pueden viajar a través de un sólido, líquido o gas y son las primeras que se detectan. Después siguen las ondas S o secundarias, que son más lentas que las ondas P y sólo se transmiten por materiales sólidos. Las ondas P y S se registran mediante sismógrafos y el registro se plasma en sismogramas. La diferencia de tiempo entre ondas P y S, se utiliza para calcular la distancia del sismógrafo al epicentro (Keller and Blodgett, 2007).

Cuando las ondas alcanzan la superficie, generan las ondas superficiales, entre las cuales destacan las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (L). Estas se desplazan más despacio, pero son las causantes de gran parte del daño cerca del epicentro debido a que provocan movimientos verticales y horizontales en la superficie del terreno (Keller and Blodgett, 2007).

### 5.1.3 Medidas de los terremotos: Magnitud e Intensidad.

El punto donde se origina el terremoto, es decir, donde se produce la rotura de las rocas se encuentra en el interior de la Tierra y se conoce como hipocentro o foco. El epicentro es el lugar en la superficie por encima del foco donde se manifiesta inicialmente el terremoto (Fig. 5.2) (Keller and Blodgett, 2007)

Para entender la dimensión e importancia de los terremotos y poder comparar unos terremotos con otros, se utilizan dos unidades de medida: La magnitud y la intensidad. La magnitud es la cantidad de energía liberada por las ondas sísmicas durante un terremoto. Este no es el único factor que determina el impacto del terremoto, ya que factores como la profundidad y las características del terreno pueden influir en cómo se percibe los temblores en la superficie (Keller and Blodgett, 2007).

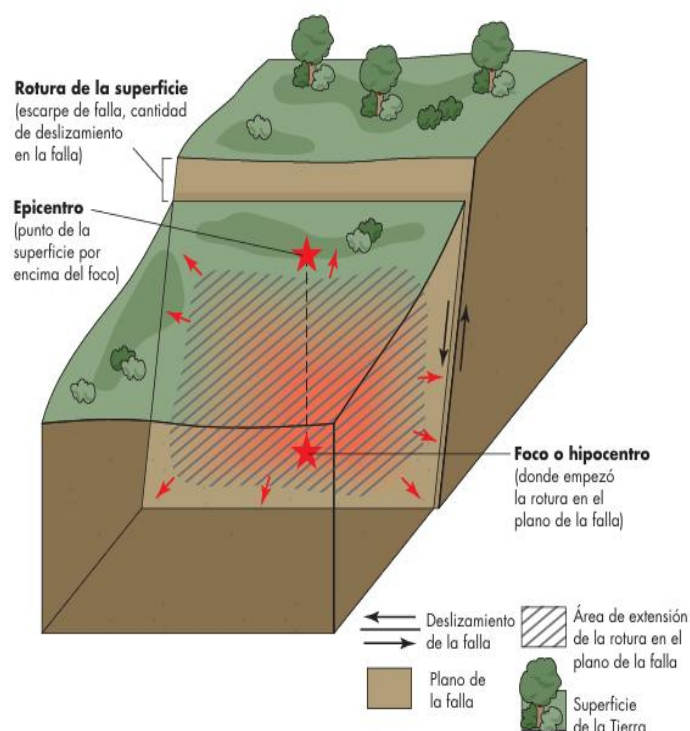


Figura 5.2. Características básicas de un terremoto. El foco se representa con una estrella roja más baja y el epicentro la estrella roja más alta. Las flechas rojan indican la propagación (Keller and Blodgett, 2007).

Para determinar la magnitud del terremoto, hoy día, se utiliza el concepto de magnitud de momento sísmico que se expresa con un número decimal (Tabla 5.1) y se deduce a partir de la estimación del área que se rompe en la superficie de la falla, de la cantidad de movimiento en la falla, y del comportamiento o rigidez de las rocas cerca del foco (Keller and Blodgett, 2007).

Tabla 5.1. Magnitud y frecuencia mundiales de los terremotos (Keller and Blodgett, 2007).

Descriptor	Magnitud	Número de sucesos anuales promedio
Muy grave	8 y mayor	1
Grave	7–7.9	17
Fuerte	6–6.9	134
Moderado	5–5.9	1319
Leve	4–4.9	13 000 (estimado)
Menor	3–3.9	130 000 ( estimado)
Poco importante	2–2.9	1 300 000 ( estimado) (approx. 150 por hora)

Por otro lado, está la medida de la intensidad, una medida cualitativa que se basa en estimar el efecto que tiene el movimiento del suelo en edificaciones y personas, se conoce como la Escala Mercalli Modificada y permite determinar la intensidad del terremoto. Cuenta con doce categorías en las que se describe la extensión del daño causado por el terremoto y como la población percibe el temblor (Keller and Blodgett, 2007).

## 5.2 Riesgo sísmico y sus efectos.

### 5.2.1 Concepto de riesgo

Un riesgo natural se refiere a cualquier proceso natural que representa una amenaza para la vida o para la propiedad (Keller and Blodgett, 2007).

Para que se produzca un riesgo tiene que darse una combinación de tres factores: (1) la probabilidad de que ocurra un evento, conocido como peligrosidad, (2) exposición de las personas o bienes materiales y (3) vulnerabilidad ante los daños (Biología y Geología, s.f).

El riesgo sísmico es un tipo de riesgo natural asociado a los terremotos (Keller and Blodgett, 2007).

La vibración o la ruptura del terreno que produce un terremoto no es lo único que puede causar daños a las personas e infraestructuras, sino que también se pueden desencadenar otros riesgos naturales. Estos se dividen en riesgos o efectos primarios entre los que se encuentran la ruptura del suelo y la vibración, y los riesgos o efectos concatenados o secundarios que son los derivados de los riesgos primarios y resultado de las sacudidas como son la licuefacción, deslizamientos o tsunamis, entre otros (Keller and Blodgett, 2007).

### 5.2.2 Riesgos primarios.

#### Vibración y ruptura del suelo

Los efectos inmediatos de un terremoto son la vibración y ruptura del suelo que se produce cuando el plano de falla alcanza la superficie del terreno o cuando se originan grietas, pudiendo producir sacudidas, rotura y desplazamiento de la superficie. Esto puede causar daños cuando hay población de riesgo cerca y las sacudidas violentas pueden ser perjudiciales para los edificios (Keller and Blodgett, 2007).

Los daños dependen de varios factores, como la aceleración del suelo, la intensidad de la vibración, la duración del terremoto y del tipo de sustrato que puede favorecer la amplificación de la vibración, por ejemplo, un suelo formado por roca ígnea dura amplificará menos las ondas que un suelo de limo (Fig. 5.3). Además, la frecuencia de vibración puede provocar resonancia, que puede afectar a edificios alejados del epicentro: las frecuencias altas afectan más a edificios bajos y las frecuencias bajas afectan más a los altos (Keller and Blodgett, 2007).

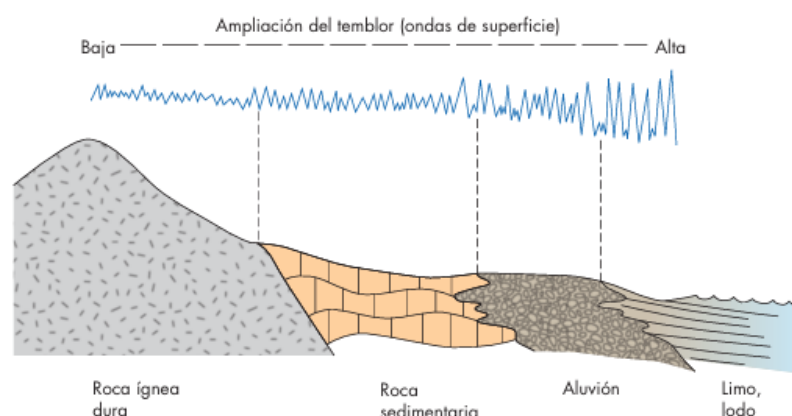


Figura 5.3. Amplificación de la vibración dependiendo del tipo de sustrato (Keller and Blodgett, 2007).

### 5.2.3 Riesgos concatenados.

- **Licuefacción:** Debido a la vibración del suelo producida por un terremoto puede ocurrir que los sedimentos saturados en agua cambien de un estado sólido a líquido debido al aumento de la presión del agua que hay entre las partículas y las mantiene en suspensión permitiéndolas fluir. Cuando la sacudida cesa vuelven a recuperar su estado sólido (Hyndman and Hyndman, 2016). La licuefacción en suelos pocos consolidados puede generar graves daños en diversas estructuras como edificios y carreteras (Keller and Blodgett, 2007).
- **Cambios en la topografía:** La deformación del terreno causada por un terremoto puede provocar la elevación o el hundimiento de la superficie. También puede afectar al nivel de base de los ríos, provocar cambios en las líneas de costa y modificar el nivel de las aguas subterráneas (Keller and Blodgett, 2007).
- **Deslizamientos y desprendimientos de tierra:** estos riesgos están muy conectados con los terremotos, suelen ser los efectos más comunes. Pueden ser muy dañinos, causar un gran número de muertes y sepultar edificios o barrios enteros o dar lugar a inundaciones por la acumulación de rocas en los cauces de ríos (Keller and Blodgett, 2007).
- **Incendios:** la sacudida del suelo durante el terremoto puede ocasionar ruptura de conducciones eléctricas y de gas que pueden generar incendios, siendo el fuego el causante de muchos daños. Esto ocurrió en el terremoto de San Francisco de 1906, donde el 80% de los daños fueron causados por incendios (Keller and Blodgett, 2007).
- **Tsunamis:** cuando ocurre un terremoto se puede producir un desplazamiento del lecho marino, el agua se mueve a través del océano a gran velocidad y cuando se acerca a la costa disminuye su velocidad, pero aumenta la altura generando una ola gigante que impacta en la costa y causa graves daños (Keller and Blodgett, 2007).
- **Enfermedades:** los terremotos pueden causar enfermedades debido a la ruptura de tuberías de saneamiento y abastecimiento de agua de las ciudades pudiendo provocar la contaminación del agua potable, pérdida de higiene,

destrucción de viviendas y colapso de los servicios públicos de salud (Keller and Blodgett, 2007).

### **5.3 Predicción y prevención del riesgo sísmico.**

#### *5.3.1 Predicción.*

Hoy en día, no se puede predecir con precisión cuándo ocurrirá un terremoto, aunque si se conocen las zonas más propensas a sufrirlas y los factores locales que pueden intensificar sus efectos. Por ello uno de los objetivos principales en el estudio sísmico es poder alertar a las personas sobre un peligro inminente (Hyndman and Hyndman, 2016).

Para hacer una posible predicción sobre los terremotos se han estudiado distintos fenómenos precursoros que se producen antes del sismo principal y que podrían estar relacionados. Entre los fenómenos precursoros para la predicción de un terremoto caben destacar las deformaciones del terreno o cambios geoquímicos y geofísicos, entre otros (Keller and Blodgett, 2007).

Los sistemas de alerta temprana (EEW) son herramientas valiosas capaces de advertir a la población y ayudar a reducir los riesgos derivados de los terremotos. Para lograr esto, se utilizan distintos tipos de instrumentos como los acelerómetros que miden el movimiento y son capaces de predecir cómo van a responder las estructuras ante un sismo (Kuna et al., 2024).

Un buen ejemplo son los acelerómetros MEMS (Microelectromechanical Systems). Estos sensores son capaces de registrar movimientos sísmicos sin llegar a saturarse (Kuna et al., 2024).

Aún no existen métodos fiables de predicción de terremotos, sin embargo, debido al avance científico se podrán hacer predicciones a largo, medio y corto plazo, lo que evitará muchas pérdidas de vidas y daños en infraestructuras (Keller and Blodgett, 2007).

### 5.3.2 *Prevención.*

La prevención ante los terremotos es esencial para hacer frente a estos eventos, dentro de las medidas de prevención podemos destacar las medidas no estructurales y las medidas estructurales.

Dentro de las medidas no estructurales se encuentran los sistemas de alerta temprana que permita avisar a la población sobre la llegada de un terremoto. Los mapas de riesgos y vulnerabilidad sísmica son importantes para poder determinar aquellas zonas que tengan más riesgos de sufrir terremotos (Hyndman and Hyndman, 2016). Como medidas estructurales, hay que las normativas de construcción y el diseño antisísmico, que tienen como objetivos salvar la vida de personas, evitar que las construcciones colapsen y disminuir los daños económicos (Perepérez, 2014). En áreas donde exista un mayor riesgo de terremotos, es fundamental que las infraestructuras, como tuberías, puentes y edificaciones sean diseñadas y construidas para resistir al menos un sismo de magnitud media.

En el caso de tuberías y puentes se deben diseñar para permitir una cierta deformación plástica, mientras que los edificios no deben estar directamente en contacto con el suelo para que las estructuras no entren en resonancia con la vibración del terremoto (Keller and Blodgett, 2007).

Por último, las acciones individuales que toma cada persona antes, durante y después del terremoto pueden ayudar a salvar vidas. Por ejemplo, un control de las condiciones de la vivienda puede evitar la caída de objetos que podrían causar daños, prepararse y enseñar cómo se debe de actuar ante un terremoto de grandes proporciones, contribuyen a que haya una mayor seguridad (Keller and Blodgett, 2007).

## **6 CASOS DE ESTUDIO.**

### **6.1 Terremoto de Kobe (1995).**

#### *6.1.1 Antecedentes y contexto geológico.*

El terremoto de Kobe, también conocido como el gran terremoto de Hanshin-Awaji, es uno de los eventos sísmicos más devastadores ocurridos en la historia de Japón y que ha dejado una gran marca en el país. Por ello, para entender las causas y las

consecuencias que tuvo este terremoto es esencial conocer los antecedentes y el contexto geológico que explica porque esta región está vulnerable y ha registrado numerosos terremotos a lo largo del tiempo.

Kobe es una importante ciudad japonesa (Fig 6.1) situada en la prefectura de Hyogo, dentro de la región de Kansai, en la isla de Honshu. Se encuentra en la costa norte de la bahía de Osaka, cerca del Mar Interior de Seto. Además, junto con Kioto y Osaka forman parte del área metropolitana de Keihanshin, convirtiéndose en una importante ciudad para la industria y el comercio de la región.



Figura 6.1. Mapa de Japón. Nota. Dentro del recuadro se representa la ciudad de Kobe y sus alrededores. De *Japan Maps & Facts*, por World Atlas, 2023. [Mapas y datos de Japón - Atlas Mundial](#)

Japón se encuentra en el llamado Cinturón de Fuego del Pacífico. Esta región se caracteriza por una elevada actividad tectónica y volcánica debido a la interacción constante de cuatro placas. Se sitúa en la zona de contacto entre el extremo oriental de la placa Euroasiática y la placa de América del Norte, limita al sur con la placa del Mar de Filipinas y al este con la placa del Pacífico (Fig 6.2A), por lo que es una zona con una alta complejidad tectónica, situándose Kobe en una zona de subducción (Toda et al., 1997).

En la llanura de Osaka, se pueden identificar tres sistemas fallas. Por un lado, tenemos la línea tectónica Arima-Takatsuki (ATTL), luego se encuentra la línea tectónica media (MTL) y también la línea de falla Hanaore-Kongo (HKFL) que es un sistema de fallas que conecta la falla Hanaore con las fallas Ikoma y Kongo (Fig 6.2B) (Kanaori and Kawakami, 1997).

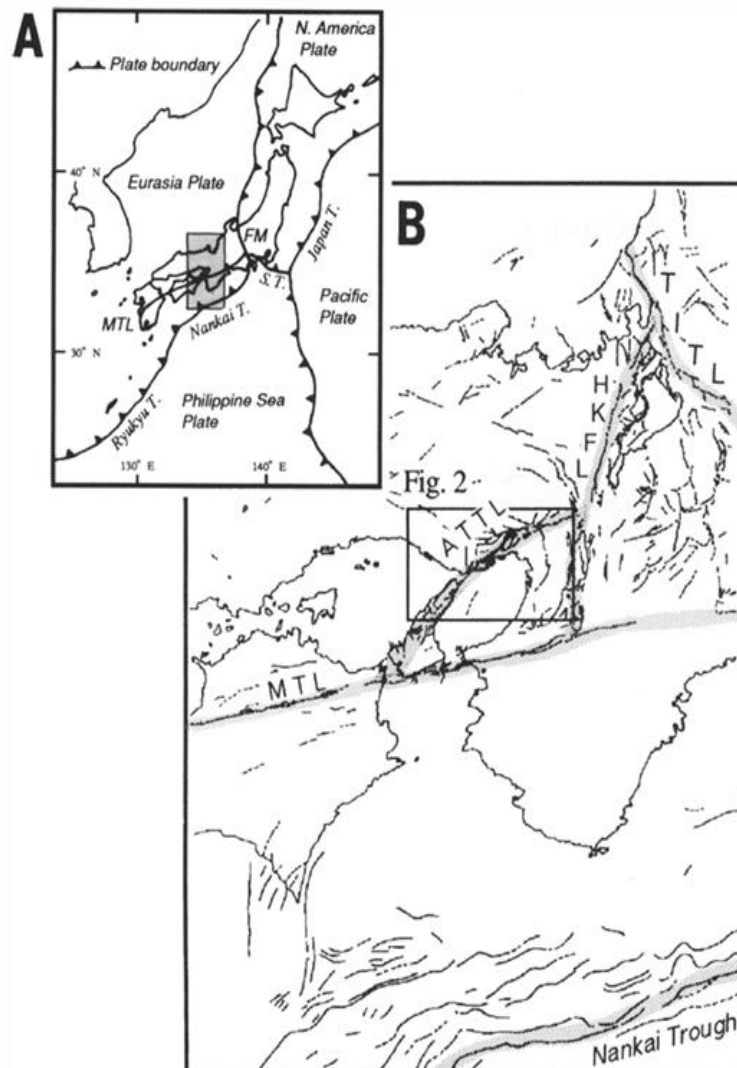


Figura 6.2. En la imagen (A) Distribución de las placas que forman parte de Japón. En la imagen (B) se representan las fallas activas alrededor del área de Kobe mostrando la complejidad de la región (Toda et al., 1997).

Japón es una zona sísmica muy activa donde se localizan una gran cantidad de fallas activas que van acumulando la energía del movimiento de las placas y a lo largo del tiempo han generado terremotos importantes que han causado graves daños (Kanaori and Kawakami, 1997).

La Isla Awaji y las montañas Rokko tienen una serie de fallas activas con un desplazamiento lateral dextroso y forman parte de la línea tectónica Arima Takatsuki (ATTL), que está compuesta por materiales graníticos del Mesozoico y por materiales sedimentarios del Neógeno, va desde Kioto pasando por Kobe y la Isla Awaji hasta llegar a la línea tectónica media. (Kanaori and Kawakami, 1997).

Estos eventos sísmicos se pueden dividir en dos tipos, por un lado, los terremotos que ocurren en fallas ubicadas en los límites de las placas tectónicas y que al generarse la mayoría en el fondo marino en algunos casos van acompañados de tsunamis y, por otro lado, encontramos los terremotos que se generan debido al desplazamiento de fallas dentro de las placas tectónicas (Kanaori and Kawakami, 1997).

El terremoto de Kobe fue precedido 47 años antes por otro terremoto de magnitud 7.1 y en 1891 por un terremoto de magnitud 8, aunque son numerosos los terremotos de magnitud inferior a 7 ocurridos en la zona (Kanaori and Kawakami, 1997).

El día 17 enero de 1995 se produjo el terremoto de Kobe con una magnitud de 7.2, en el punto medio de la línea tectónica Arima Takatsuki (ATTL). El área afectada se extendió desde Hanshin, formada por las ciudades de Kobe y Osaka hasta el norte de la Isla Awaji, produciéndose una ruptura superficial de unos 9 kilómetros a lo largo de la falla Nojima en el norte de la Isla Awaji y que tiene un desplazamiento lateral derecho. Además, fue acompañado de réplicas (Fig 6.3) que se extendieron a lo largo de 40 kilómetros llegando a afectar a las Montañas Rokko donde se originaron grietas a lo largo de algunas fallas (Kanaori and Kawakami, 1997).

El hipocentro del terremoto se localizó a unos 15 kilómetros de profundidad, por tanto, se considera muy superficial. El epicentro se localizó aproximadamente a 20 kilómetros del centro de Kobe, cerca de la Isla de Awaji.

La aceleración del suelo alcanzó un valor máximo de 833 centímetros por segundo al cuadrado, con una duración de la sacudida intensa de unos 15 segundos en muchos lugares. Además, las réplicas ocurrieron a menos de 20 kilómetros de profundidad. Todo esto contribuyó a que el terremoto causase gran destrucción y pérdida de vidas (Kanaori and Kawakami, 1997).

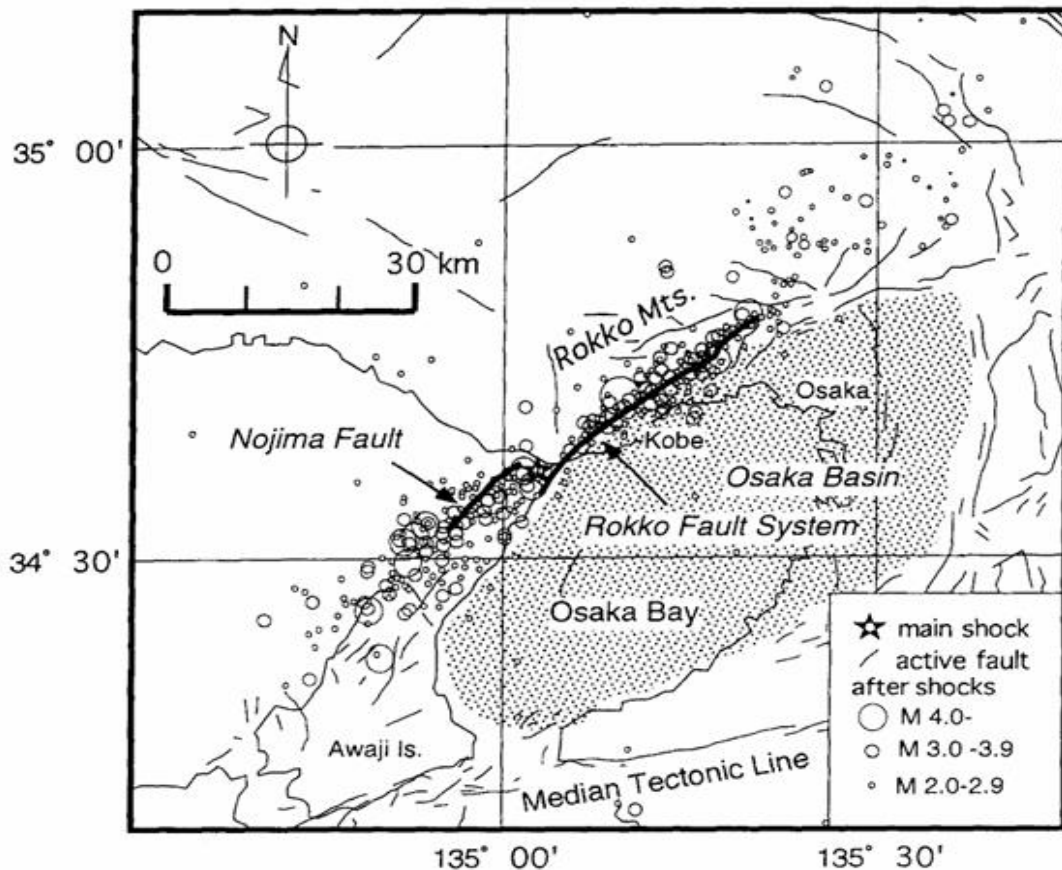


Figura 6.3. Mapa de los epicentros de las réplicas del terremoto de Kobe de 1995 (Sato et al., 1998).

Según los estudios realizados el evento sísmico se dividió en tres, por un lado, el evento inicial tuvo una magnitud superior y se corresponde con el movimiento de la falla de Nojima y los otros dos eventos de menor magnitud que pudieron ocurrir en Kobe, pero no produjeron fallas en la superficie (Toda et al., 1997).

Aunque la mayoría de los daños ocurrieron en Kobe, la Isla Awaji juega un papel crucial para comprender la estructura de las fallas que generaron el terremoto. Más tarde, se hicieron estudios que evidencian que en la isla está atravesada por dos fallas principales: por un lado, la falla de Nojima y, por el otro, la falla de Kariya. Ambas tienen un desplazamiento lateral derecho y se unen a una profundidad de 7 kilómetros, lo que sugiere que estas dos fallas podrían haber sido las responsables del terremoto (Sato et al., 1998).

Los suelos poco consolidados amplificaron las ondas sísmicas, esto se notó más en aquellas zonas cercanas a la falla. Además, se produjo licuefacción que comenzó a los 8 segundos después de que se iniciase el sismo. Esto evidencia que suelos poco consolidados y saturados pueden amplificar las ondas y dar lugar a licuefacción por lo que los daños estructurales aumentan (Oka et al., 1997).

Hay que entender que las fallas no siempre aparecen en la superficie. En el caso de la falla de Nojima, como se mencionó anteriormente, la ruptura en la superficie solo tuvo una longitud de 9 kilómetros, pero la ruptura real se extendió más de 50 kilómetros. Por lo que, si sólo se hubiese considerado la ruptura superficial, la magnitud esperada hubiese sido menor, lo que podría haber ocasionado una subestimación la magnitud del terremoto (Kanaori and Kawakami, 1997).

### 6.1.2 *Análisis de daños y medidas preventivas adoptadas.*

El terremoto de Kobe causó daños devastadores en la ciudad y sus alrededores (Fig 6.4). Con una población de aproximadamente 1.5 millones de personas, en la catástrofe murieron unas 5 500 personas. Una gran cantidad de carreteras e infraestructuras fueron destruidas, se produjeron numerosos incendios, lo que causó daños valorados en más de 100 000 millones de dólares (Kanaori and Kawakami, 1997).

En Kobe no se esperaba un terremoto de tal magnitud, ya que no había registros de grandes sismos en esta región. Así pues, la preocupación porque ocurriera un suceso de gran magnitud no estaba en las mentes de las autoridades, lo que condujo a una menor preparación y un descuido de las medidas de alerta (Tierney and Goltz, 1997).

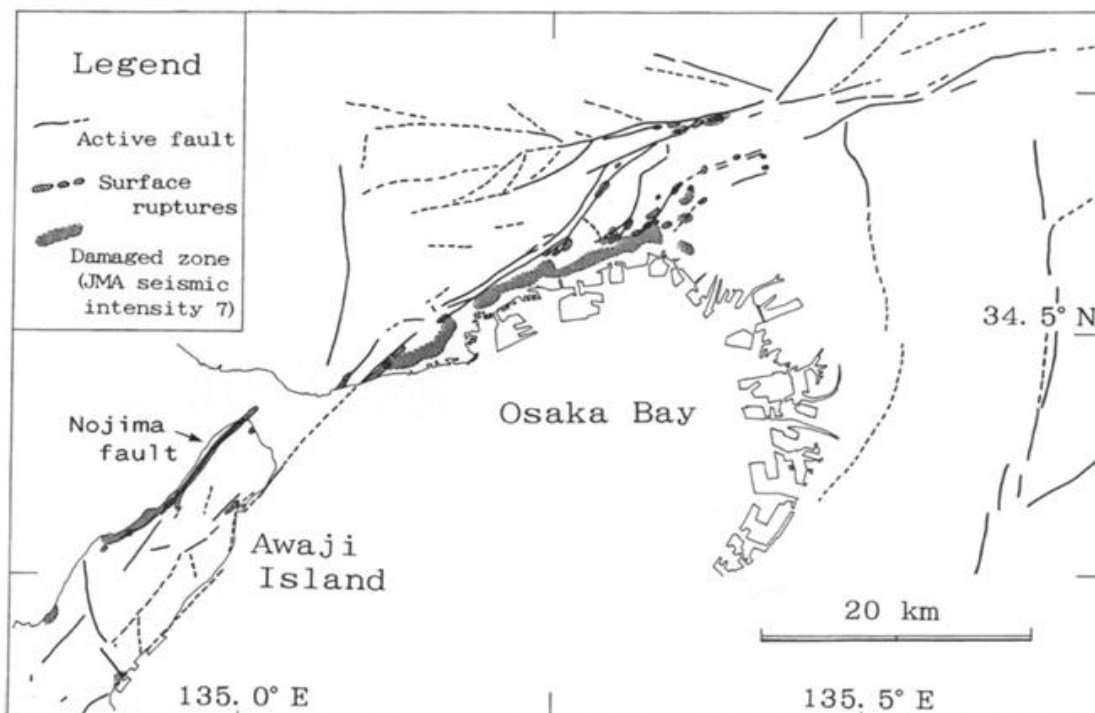


Figura 6.4. Zonas afectadas por daños y rupturas debido al terremoto de Kobe (Kanaori and Kawakami, 1997).

De las personas que murieron en este evento sísmico, muchas de las muertes se produjeron debido al colapso de los edificios y a los incendios. La mayor pérdida de vidas se produjo en la ciudad de Kobe, entorno a unas 35 000 personas resultaron heridas. En cuanto a daños en infraestructuras se estima que más de 136 000 viviendas se destruyeron durante el terremoto y más de 300 000 personas se quedaron sin hogar. En los primeros días después del sismo muchas personas buscaron refugios en albergues. Además, este terremoto hizo que la población de Kobe se redujese debido al temor de que volviese a suceder algo parecido (Tierney and Goltz, 1997).

Algunas industrias quedaron devastadas por el fuego, el puerto de carga de Kobe que es uno de los más grandes del mundo se quedó paralizado. Millones de hogares se quedaron sin electricidad, agua, gas natural e incomunicadas (Tierney and Goltz, 1997).

A pesar de que Kobe era uno de los sitios mejor preparados ante eventos sísmicos la ayuda a la población no llegó hasta 10 horas después de que se produjese la sacudida (Keller y Blodgett, 2007). Los daños en las carreteras, así como a los escombros en las calles generados por el derrumbe impidieron el paso de vehículos de emergencias (Fig 6.5). Cerca de 300 incendios hicieron que la extinción se dificultase por la gran cantidad que se estaban produciendo, por la falta de agua derivada de las averías y por el bloqueo de las carreteras (Tierney and Goltz, 1997).



Figura 6.5. Autopista elevada de Kobe colapsada tras el terremoto. Nota. De *Have we learned enough from the 1995 Kobe quake?*, por The Japan Times, 2020. [Have we learned enough from the 1995 Kobe quake? - The Japan Times](#)

A lo largo de los años, los diversos eventos ocurridos en Japón han ayudado a formar una población que sabe cómo afrontar de manera eficaz las catástrofes. Por ello, después del terremoto muchas personas supieron adaptarse rápido a la nueva situación (Tierney and Goltz, 1997).

La mayoría de los rescates fueron llevados a cabo por los propios ciudadanos, que colaboraron activamente con los medios de rescate, de hecho, los bomberos y otros cuerpos de seguridad rescataron a menos población. Las personas que vivían en las zonas afectadas proporcionaban de forma voluntaria materiales y productos a aquellas personas que se vieron afectadas, además de las personas que llegaron de otros lugares del mundo para ofrecer su ayuda (Fig 6.6) (Tierney and Goltz, 1997).



Figura 6.6. Personas caminando entre los escombros dejados por el terremoto y los incendios. Nota. De *Kobe Earthquake 20th Anniversary*, por *International Business Times UK*, 2015. [Kobe earthquake 20th anniversary: Facts about the devastating 1995 Great Hanshin Earthquake | IBTimes UK](#)

Los daños directos supusieron una pérdida económica de alrededor de 9,93 billones de yenes. La gran mayoría de los daños se debió a la destrucción de edificios, carreteras, instalaciones en el puerto y puentes. Las pérdidas en las industrias supusieron un gasto de unos 5,93 billones de yenes (Fig 6.7) (Toyoda, 2008).

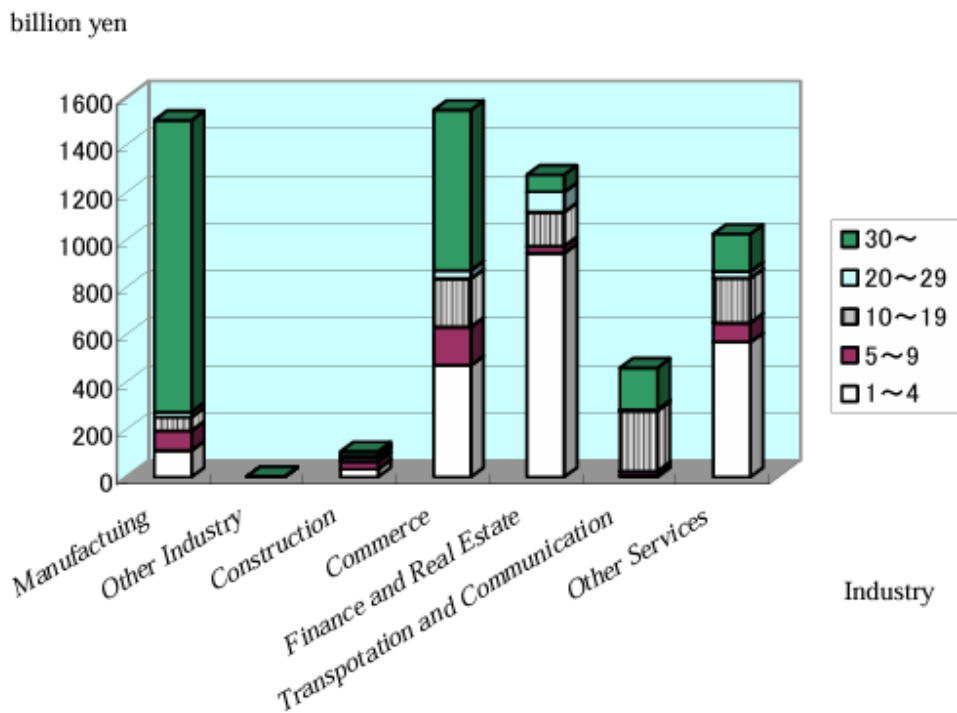


Figura 6.7. La figura muestra las pérdidas directas clasificadas por industria y el tamaño de la empresa según el número de empleados. Las más afectadas son las industrias de fabricación y comercio. Las empresas pequeñas y grandes fueron las más afectadas por el sismo (Toyoda, 2008)

Los daños en las infraestructuras sufridos durante este terremoto evidenciaron la necesidad de aplicar medidas antisísmicas más estrictas y además se hizo evidente la obligatoriedad de cumplir con la normativa de construcción ante terremotos para proteger los edificios más vulnerables (Watanabe et al., 1998).

Muchos de los edificios, sobre todo aquellos más antiguos o con estructuras más vulnerables, necesitaron refuerzos. En algunos casos la magnitud del daño fue tan grande que se precisó la reconstrucción para poder volver ser utilizarlos de manera segura (Watanabe et al., 1998).

Los edificios de hormigón sufrieron distintos niveles de daño. Los edificios más nuevos construidos con la normativa antisísmica vigente resistieron mejor el movimiento del terreno y tuvieron un menor impacto (Watanabe et al., 1998).

En contraste, aquellos edificios viejos construidos con una normativa de construcción antisísmica antigua experimentaron más daños lo que contribuyó a su vulnerabilidad (Fig 6.8) (Watanabe et al., 1998).



Figura 6.8. Destrucción en Kobe tras el terremoto. Nota. De *Kobe Earthquake (1995)*, por Japan Nakama, 2021. [Japan Nakama | The Kobe Earthquake: January 17th 1995](#)

Tras el impacto generado por el terremoto, los organismos gubernamentales de Japón tomaron medidas para mejorar la resistencia de las edificaciones. Se desarrollaron metodologías para evaluar la capacidad antisísmica de las estructuras y se desarrollaron técnicas para reforzar las construcciones ya existentes. En estas tareas participaron especialistas en rehabilitación sísmica para optimizar la seguridad de los edificios (Watanabe et al., 1998).

Además, se pueden destacar algunas iniciativas en respuesta al terremoto como la creación del Comité de Red para la Promoción de la Rehabilitación Sísmica de Edificios en la que participaron 76 organizaciones capacitados para hacer evaluar la capacidad sísmica de los edificios y los diseños. Además, se redactó, una ley para la rehabilitación de los edificios (Watanabe et al., 1998).

Los procesos de licuefacción del suelo también fueron importantes durante el terremoto, causando daños severos en las infraestructuras. Este fenómeno fue notable sobre todo en áreas de la costa de Kobe, donde el suelo al perder estabilidad favoreció el colapso de estructuras y deformación del terreno (Tokimatsu and Asaka, 1998).

En definitiva, la región de Kobe, que socioeconómicamente estaba muy desarrollada y contaba con muchos recursos técnicos y tecnológicos, no estaba suficiente preparada para este gran terremoto. La intensidad del movimiento y la falta de

estructuras sismorresistentes, entre otros factores, hizo que se maximizaran los daños dificultando así las respuestas de emergencia (Tierney and Goltz, 1997).

## 6.2 Terremoto de Haití (2010).

### 6.2.1 Antecedentes y contexto geológico.

El terremoto de Haití de 2010 causó un desastre devastador que evidenció la vulnerabilidad del país. Para comprender el impacto que tuvo, es esencial analizar los antecedentes y el contexto geológico que desencadenaron este evento ya que esta isla se encuentra en una región con elevada sismicidad, lo que lo convierte en un lugar propenso a sufrir terremotos (DesRoches et al., 2011).

Haití, conocida oficialmente como la República de Haití, es una nación que se ubica en la región noroeste del Caribe, más concretamente en la parte occidental de la isla de La Española, la cual comparte con la República Dominicana.

Haití se encuentra limitado al sur con el Mar Caribe, al norte con el Océano Atlántico, al este con la República Dominicana y al oeste con el canal de los Vientos que lo separa de Cuba. La capital de Haití es Puerto Príncipe, tiene aproximadamente 11 millones de habitantes, siendo uno de los países más pobres de América y más poblados del Caribe (Fig. 6.9).



Figura 6.9. Mapa de Haití. Nota. De *Haiti Maps & Facts*, por World Atlas, 2023. [Haiti Maps & Facts - World Atlas](#)

La isla de La Española se originó tras la fragmentación del supercontinente Pangea y apertura del océano Atlántico, dando lugar a la formación de la placa de Caribe, en cuyos márgenes se desarrollan zonas de subducción. La isla, incluido Haití, está compuesta en parte por rocas ígneas y sedimentarias (DesRoches et al., 2011).

La Española se sitúa a lo largo del límite que separa las placas tectónicas Norteamericana y del Caribe, su estructura geológica es muy compleja debido a que está formada por diversas unidades tectónicas con diferentes tipos de interacciones entre estas unidades, incluidas zonas de colisión y subducción en los límites convergentes, zonas de separación en los límites divergentes y desplazamiento lateral (Fig 6.10) (Granja Bruña et al., 2011).

La placa del Caribe se mueve con dirección este-noreste unos 20 mm/año en relación con la placa Norteamericana. Este movimiento provoca la deformación de la superficie terrestre y la generación de fallas. Con el tiempo la acumulación de energía debida al movimiento puede producir grandes terremotos (Granja Bruña et al., 2011).

Este movimiento de la placa del Caribe se concentra en dos fallas principales de desgarre laterales izquierdas, que son la falla Septentrional-Oriente con un desplazamiento lateral de aproximadamente 9 mm/año y la falla de Enriquillo-Plantain Garden con un desplazamiento lateral de unos 7 mm/año.

La falla de Enriquillo-Plantain Garden es la causante de muchos eventos sísmicos. Se trata de una falla activa ya que se puede ver como corta materiales del cuaternario, lo que evidencia actividad sísmica reciente (Granja Bruña et al., 2011).

Además, del desplazamiento lateral, presenta con una componente compresiva que se origina en la zona de subducción. Esta presión no sólo actúa en el borde de las placas, sino que también se transmite hacia el interior de la isla de La Española. La falla Septentrional-Oriente no absorbe esta compresión, pero la falla de Enriquillo-Plantain Garden absorbe unos 3 mm al año a través de un sistema de fallas inversas (Benito Oterino et al., 2012).

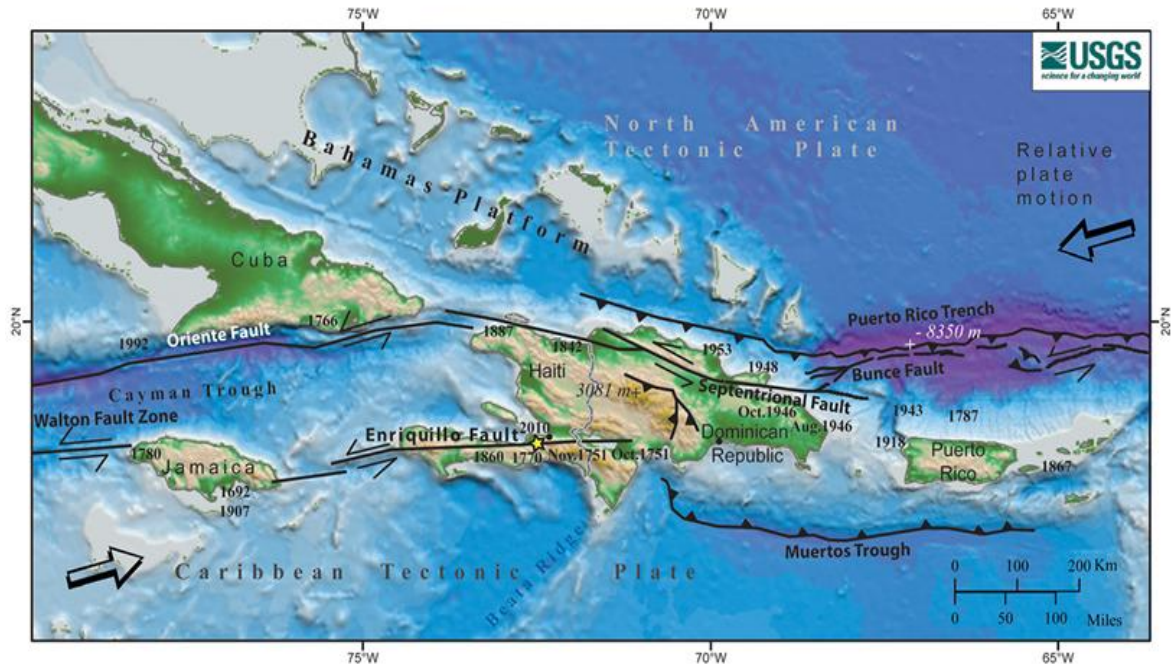


Figura 6.10. Entorno geográfica y tectónico de la isla de La Española (DesRoches et al., 2011).

Previamente al terremoto de 2010 no hubo grandes terremotos en Haití desde los ocurridos en 1701, pero estudios de la actividad sísmica establecieron que terremotos de elevada magnitud han ocurrido en el pasado en la capital Puerto Príncipe, asociados estos movimientos con la falla Enriquillo-Plantain Garden, como los ocurridos en 1751, 1770 y 1860 que causaron gran destrucción (DesRoches et al., 2011).

El ubicación geológica de Haití y la escasa preparación ante desastres naturales hace que sea un país muy vulnerable. Las características geográficas, geológicas y climáticas hacen que la población esté expuesta a muchos riesgos naturales como terremotos, tsunamis, huracanes y sequías, entre otros.

El día 12 de enero del año 2010, a las 16:53 ocurrió en la República de Haití, un potente terremoto que hizo temblar el suelo con una magnitud de 7.0 Mw y fue seguido de más de 50 réplicas de una magnitud superior a 4.5 Mw durante los meses posteriores. Este terremoto afectó de manera muy importante a la capital, Puerto Príncipe. El evento se originó a lo largo de la falla transformante Enriquillo-Plantain Garden en la que se produjo un movimiento izquierdo-lateral con compresión (Fig 6.11) (Abbott, 2016).

El foco del terremoto se situó a 10-13 kilómetros de profundidad lo que se considera muy superficial y con un epicentro a 25 kilómetros de la capital habitada por millones de personas. Esta poca profundidad contribuyó a la intensidad del temblor y a la magnitud que tuvo la destrucción (Granja Bruña et al., 2011).

El terremoto tuvo entre sus consecuencias distintas deformaciones como elevación de zonas de costa, fracturas, rupturas, deslizamientos de tierra, licuefacción, superficies fracturadas en bloques e incluso desvío de cauces de ríos (Benito Oterino et al., 2012).

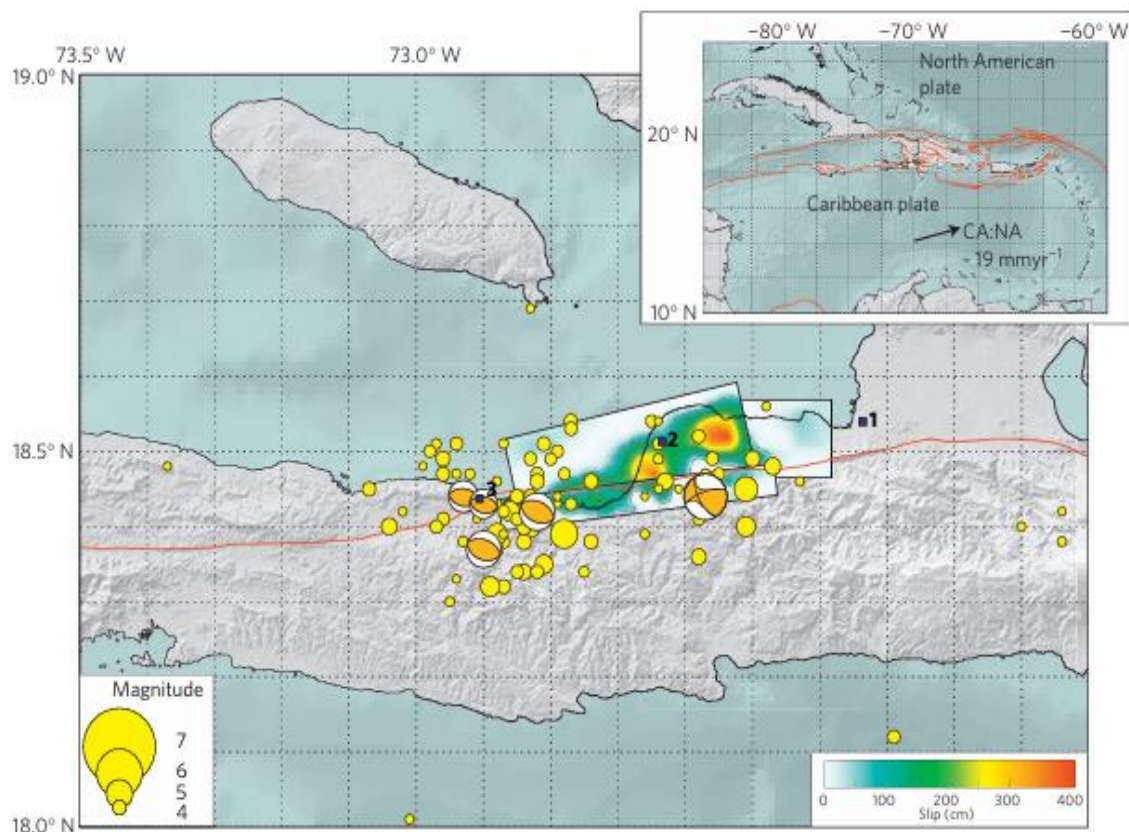


Figura 6.11. El recuadro superior muestra la disposición del límite entre las placas Caribe y Norteamericana. La flecha indica el sentido y la velocidad del movimiento entre ambas placas. El panel principal muestra la zona del epicentro del terremoto, los círculos amarillos son las réplicas y su tamaño indica la magnitud. La línea roja representa la falla de Enriquillo, el deslizamiento de la falla se muestra con una escala de colores y los cuadros azules representa las principales ciudades afectadas: Puerto Príncipe (1), Léogâne (2), Puerto Real (3) (Hayes et al., 2010).

Las investigaciones realizadas pusieron de manifiesto que el terremoto no solo se produjo a lo largo de la falla de Enriquillo-Plantain Garden como se pensó al principio. Los estudios indicaron que también estuvo involucrada en el sismo una falla inversa

al norte de la anterior y de la que no había datos de actividad sísmica hasta el momento (DesRoches et al., 2011).

Un modelo publicado por Hayes et al. (2010) mostró que la ruptura del terremoto de Haití involucró realmente tres fallas principales. La falla de Enriquillo-Plantain Garden donde comienza la ruptura con un movimiento lateral izquierdo y donde se encuentra el hipocentro que fue la que se pensó que era la causante del sismo. En investigaciones posteriores se sugirió que la ruptura principal ocurrió en una falla ciega de cabalgamiento que causó el 80 % del movimiento, conocida como la falla de Léogâne. Además, se identificó una falla inclinada con características similares a la falla de Enriquillo que produjo movimiento lateral profundo (Fig 6.12).

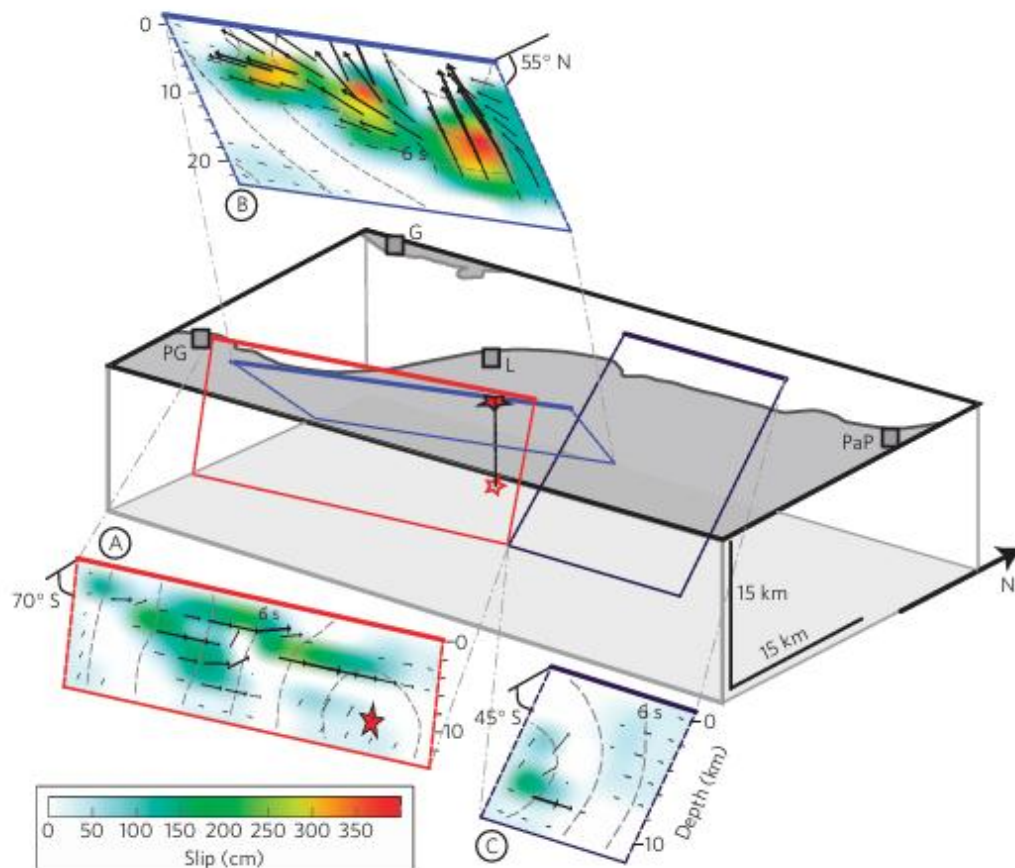


Figura 6.12. Geometría de la ruptura del terremoto de Haití de 2010. El plano rojo representa la falla de Enriquillo-Plantain Garden, el plano azul la falla de Léogâne y el plano negro la falla inclinada. En cada plano de falla las líneas negras discontinuas que muestran la distribución de la ruptura del terremoto y las líneas negras gruesas indican el desplazamiento. PaP: Puerto Príncipe, L: Léogâne, PG: Petit Goâve, G: Isla de la Gonave (Hayes et al., 2010).

El área afectada por el terremoto presenta una gran diversidad fisiográfica y una historia geológica compleja. Cuenta con cadenas montañosas, montañas empinadas,

arroyos encajonados, valles fluviales estrechos entre las montañas, amplios abanicos aluviales y valles deltaicos costeros (DesRoches et al., 2011).

La devastación ocurrida en Puerto Príncipe tiene mucho que ver con que la ciudad está construida sobre de suelos aluviales, formados por sedimentos sueltos y pocos consolidados. Este tipo de suelo produce la amplificación de las ondas sísmicas ya que las partículas tienen un cierto grado de libertad para vibrar lo que aumenta la intensidad del temblor en la superficie y aumenta el riesgo de colapso de las estructuras. En estas zonas las ondas sísmicas llegaron a alcanzar velocidades de hasta 350 m/s, provocando los mayores daños (DesRoches et al., 2011).

Además, la vulnerabilidad sísmica de Haití era muy elevada, por la baja calidad de las construcciones y por las malas condiciones socioeconómicas de las personas lo que provocó que los daños fueran mayores (DesRoches et al., 2011).

#### *6.2.2 Análisis de daños y medidas preventivas adoptadas.*

El terremoto de Haití causó daños devastadores tanto en las personas como en la infraestructura y economía del país. Debido a las fragilidades existentes en la República de Haití antes del sismo, el país era muy vulnerable. Haití se ha enfrentado a numerosos desastres naturales a lo largo del tiempo, convirtiéndose el terremoto de 2010 en uno de los más devastadores (Canavire-Bacarreza et al., 2024).

La vulnerabilidad socioeconómica de Haití está ligada a un contexto político e institucional frágil e inestable, lo cual provoca que el Estado tenga poca capacidad para proveer de los servicios básicos a la población y de regular y hacer cumplir las normativas de construcción. Esto hace que la planificación urbanística y las construcciones sean inseguras. Muy poca población tiene acceso a agua potable y electricidad, muchas personas no tienen acceso a atención sanitaria sobre todo aquellas con menos recursos (De Ville de Goyet et al., 2012). Además, Haití tiene un bajo desarrollo económico y mucha degradación ambiental. Las diferencias socioeconómicas, los recursos limitados, las elevadas tasas de violencia y delincuencia, entre otros factores, reducen la capacidad de preparación y recuperación ante eventos catastróficos. Además, estos eventos disminuyen la capacidad económica de los hogares aumentando la vulnerabilidad ante otras catástrofes que puedan manifestarse en el futuro (Canavire-Bacarreza et al., 2024).

Por otra parte, debido a que el país no había sufrido terremotos de esta magnitud desde hace varios siglos, contaba con pocos expertos en sismología y no había una red sísmica. Existía un mapa de riesgo sísmico antiguo que carecía de información actualizada y útil. Un sistema de alerta temprana podría haber salvado muchas vidas, pero el país carecía de lo necesario para implementarlo (Canavire-Bacarreza et al., 2024).

Este terremoto causó la muerte de alrededor de 230 000 personas, más de 300 000 heridas y dejó sin hogar a 1.1 millones de personas (Abbott, 2016). La causa principal de las muertes fue el colapso de los edificios mal construidos ya que las normativas de construcción estaban desactualizadas, no se utilizaba en la mayoría de los casos o rara vez se cumplía con lo que decían (DesRoches et al., 2011).

Además, se utilizaban materiales de pobre calidad y se llevaba a cabo malas prácticas de construcción. Más de 300 000 edificios se derrumbaron o sufrieron graves daños. En la ciudad de Léogâne alrededor del 85% de los edificios colapsaron o se vieron muy afectados, además Puerto Príncipe fue gravemente afectada (DesRoches et al., 2011).

Las pérdidas y daños supusieron entre 7 000 y 14 000 millones de dólares. Se calcula que cerca del 80% de los centros educativos y hospitales fueron destruidos o sufrieron daños. También aproximadamente el 60% de la infraestructura económica y administrativa se perdió (DesRoches et al., 2011).

Colapsaron unos 180 edificios gubernamentales como el Parlamento, el Palacio Presidencial, los Ministerios de Justicia y también el aeropuerto. El puerto de Puerto Príncipe sufrió daños considerables, lo que unido al colapso de las carreteras dificultó las labores de respuesta y recuperación en los meses posteriores al desastre (DesRoches et al., 2011).

Para la construcción de edificios en las áreas urbanas los materiales usados eran bloques de hormigón en su mayoría. Estas estructuras presentaban deficiencias ya que se construían columnas o pilares delgados y con poco refuerzo, lo que provocó que muchas de estas colapsasen durante el terremoto, como ocurrió con el hospital Turgeau (Fig 6.13) (DesRoches et al., 2011).

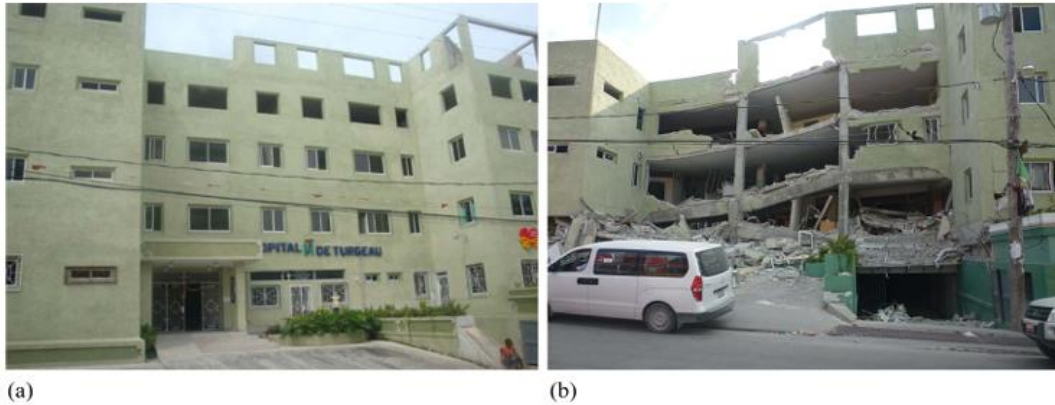


Figura 6.13. Hospital Turgeau de Puerto Príncipe antes del terremoto (a) y después del terremoto (b) (DesRoches et al., 2011).

Por el contrario, algunos edificios con materiales más apropiados aguantaron mejor la sacudida, como por ejemplo un edificio construido con madera y una iglesia con techo de metal (Fig 6.14). Esto evidencia la importancia de construir atendiendo a las normas sismorresistentes ya que aquellas con refuerzos y más flexibles soportaron mejor el terremoto que las que no seguían las normas (DesRoches et al., 2011).



Figura 6.14. Estructuras más ligeras que resistieron al derrumbe (DesRoches et al., 2011).

También se observaron daños en aquellos edificios situados al sur de Puerto Príncipe que estaban sobre depósitos de cemento (DesRoches et al., 2011).

La zona del puerto, sufrió daños principalmente debido a fenómenos de expansión lateral y licuefacción. El Muelle Norte fue uno de los que colapsó viéndose afectadas distintas instalaciones, contenedores de almacenamiento y las grúas que cargan la mercancía (Fig 6.15) (Pierre, 2023).

El uso de arenas calcáreas como material de relleno en la construcción de las infraestructuras de la costa favoreció los procesos de licuefacción, ya que esta arena es más fácil de compactar y se comporta como un sedimento licuado con capacidad de fluir y hundirse (Pierre, 2023).



Figura 6.15. Colapso del Muelle Norte (DesRoches et al., 2011).

Las carreteras a lo largo de la zona costera sufrieron daños en aquellos tramos que cruzaban terrenos pantanosos. En estas áreas, se produjeron desprendimientos por el deslizamiento de los sedimentos sobre los que se asentaba la vía. También el área donde se localizaba el epicentro del terremoto sufrió caída de rocas y deslizamientos (DesRoches et al., 2011).

Otra consecuencia de este terremoto es que causó tsunamis locales que afectaron a la costa, provocando daños y pérdida de vidas. Estudios posteriores constataron un deslizamiento submarino a 30 km del epicentro, como posible origen de las olas de tsunami que afectaron a la costa. También, se observaron que los deltas costeros cercanos al epicentro mostraban derrumbes y deslizamientos submarinos que pudieron ser el origen de esos tsunamis locales (Poupardin et al., 2020).

Tras el terremoto la capacidad de respuesta de emergencia y la atención primaria estuvieron muy limitadas, principalmente debido a la magnitud del sismo y al colapso de infraestructuras dificultó el acceso a distintas zonas dañadas. Además, de la falta de coordinación y experiencia de las personas que ofrecieron ayuda dificultó la respuesta inmediata (DesRoches et al., 2011).

Las Naciones Unidas (ONU) y otras organizaciones también sufrieron pérdidas humanas encargadas de ofrecer ayuda médica y otros servicios. Como consecuencia, no se pudo gestionar la ayuda necesaria ya que la mayoría de los recursos sanitarios se situaba en la zona afectada (DesRoches et al., 2011).

Durante un tiempo llegó mucha ayuda, la respuesta más rápida fue llevada a cabo por los ciudadanos y las organizaciones del país, los cuales se dedicaron a salvar vidas y atender de urgencia a aquellas personas que lo necesitasen. En cuanto a las ayudas externas, muchas instituciones médicas prestaron su ayuda como Cruz Roja o Médicos Sin Fronteras, las fuerzas armadas de Estados Unidos y representantes de la ONU fueron clave a la hora de proporcionar atención médica, aportando alimento, refugio y recopilando datos para la posterior recuperación (DesRoches et al., 2011).

Muchas personas antes las sucesivas réplicas se asentaron en lugares abiertos ya que para muchas la calle era su única opción. Se hicieron refugios provisionales mediante los escombros, además organizaciones internacionales ofrecieron tiendas de campaña y viviendas de emergencia (Fig 6.16). Esto fue esencial para prevenir el aumento de víctimas y propagación de enfermedades. El plan principal era que las familias volvieran a sus hogares, pero debido al miedo preferían vivir en tiendas de campaña (DesRoches et al., 2011).



Figura 6.16. Tiendas de campaña creadas por las víctimas (DesRoches et al., 2011).

La Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), coordinaron un sistema para impedir la propagación de enfermedades transmisibles, las prioridades se centraron principalmente en el tétanos, tos ferina y la difteria. Además, se dio prioridad a la salud mental para aquellas personas con estrés postraumático (De Ville de Goyet et al., 2012).

La recuperación después del sismo no fue la esperada, muchas de las ayudas que se prometieron o llegaron muy tarde o no lo hicieron. Según Versluis (2014) diferentes encuestas realizadas a personas afectadas revelaron que el 32% de ellas no habían recibido ayuda semanas después de la catástrofe. Para aquellas personas que sí recibieron asistencia, esta consistió en algunos casos en una única tienda de campaña o telas para los refugios, por lo que muchas de las necesidades básicas no estaban siendo cubiertas.

Entidades como el Banco Mundial o la Cruz Roja reconstruyeron viviendas, siendo esencial para mejorar la calidad de vida de las personas afectadas. Además, los fondos destinados a la reconstrucción de las viviendas se daban solo cuando se cumplía con las normativas de edificación.

Este terremoto no solo evidenció la fragilidad de las infraestructuras del país, sino también la vulnerabilidad de la población ante este tipo de desastres y la falta de coordinación entre las distintas entidades encargadas de la recuperación, lo que provocó que la efectividad de la ayuda disminuyese y ralentizó la reconstrucción (DesRoches et al., 2011).

En conclusión, para reducir el impacto catástrofes futuras en regiones pobres es esencial la planificación previa adecuada y sistemas de alerta temprana que permitan una respuesta rápida para disminuir el número de daños y la presencia de instituciones sólidas que se hagan cargo de promover y gestionar medidas preventivas.

La educación de la población ante desastres naturales puede impedir que se produzcan menos muertes.

## **7 DISCUSIÓN.**

El análisis comparativo de los terremotos que sacudieron Kobe en 1995 y Haití en 2010, dos de los más devastadores ocurridos recientemente, revelan la influencia que tienen los factores sociales, económicos y políticos en la dimensión del desastre. A pesar de que geológicamente ambos terremotos fueron bastantes similares, sus impactos fueron muy diferentes.

Desde el punto de vista geológico, la naturaleza de las fallas, la localización del hipocentro, el tipo de movimiento sísmico y la naturaleza y respuestas del terreno influyeron notablemente en los efectos que tuvieron los terremotos en cada caso. Ambos se produjeron en una zona de elevada actividad sísmica vinculadas a la

interacción de varias placas tectónicas en contextos de subducción. En el caso del terremoto de Haití interactúan la placa Norteamericana y la del Caribe. En Kobe coinciden la placa Euroasiática, la placa de América del Norte, la placa del Pacífico y, en concreto, donde esta última converge con la placa Euroasiática.

Los dos casos de estudio son ejemplos de terremotos superficiales, con hipocentros situados a una profundidad de 13 km para el terremoto de Haití y 16 km para el terremoto de Kobe. En cuanto a la magnitud del terremoto, ambos tuvieron un valor similar, en el caso de Haití una magnitud de 7 frente a la magnitud de 6,9 de Kobe. Estos terremotos se clasifican como “graves” según la clasificación del United States Geological Survey (USGS, 2000) y se caracterizan por causar daños severos y generalizados. La escasa distancia entre el foco sísmico y la superficie terrestre y la elevada magnitud explica la intensidad del movimiento y la sacudida superficial causando una enorme destrucción en ambos casos, aunque con diferencias significativas.

La naturaleza de los materiales del subsuelo y su respuesta geotécnica influyen notablemente en la cantidad de movimiento del suelo y, por tanto, juegan un papel importante en la amplificación de las ondas sísmicas (Keller and Blodgett, 2007). En Haití y Kobe la mayoría de las zonas urbanas estaban construidas sobre sedimentos blandos y no consolidados, lo que amplificó el movimiento de las ondas sísmicas, aumentando la destrucción. La diferencia en las construcciones en ambos casos fue lo que marcó los diferentes resultados, las infraestructuras que había en Kobe si estaban preparadas para soportar las sacudidas mientras que las que había en Haití no lo estaban.

La diferencia entre ambos países influyó en la magnitud de los efectos del desastre. El terremoto de Haití causó alrededor de 230 000 muertes mientras que en Kobe las víctimas fueron unas 5 500, teniendo un contexto geológico parecido hubo aproximadamente 42 veces más muertos en Haití. La diferencia de fallecidos se debió en gran parte a la calidad de las infraestructuras, a la respuesta de emergencia y a la preparación. En Kobe la capacidad de respuesta y reconstrucción fue más rápida y eficaz que en Haití, uno de los países más pobre del hemisferio norte, que evidenció una vulnerabilidad extrema lo que dificultó una respuesta inmediata y organizada. Kobe situado en uno de los países más desarrollados del mundo, contaba con recursos necesarios para realizar el rescate, reconstrucción y coordinación de la ayuda.

Otro aspecto relevante es el grado de resiliencia. Kobe, al ser una ciudad desarrollada, mostró una capacidad de recuperación alta. Por el contrario, Haití aún se enfrenta a las secuelas del terremoto como el desplazamiento de personas, falta de infraestructura básica, e inestabilidad institucional.

La respuesta de emergencia también mostró claras diferencias, en Haití no había recursos suficientes y el colapso de las estructuras provocó que se dificultase la llegada de ayuda. Llegaron personas de todas partes del mundo, pero la falta de coordinación y experiencia también dificultó la recuperación, aunque esto fue clave para mejorar la situación. En Kobe, aunque la respuesta se demoró contaba con equipos de emergencias mucho más preparados permitiendo una mayor efectividad y una recuperación rápida.

El problema fue que ambos eventos no se esperaban por lo que esto no era algo en lo que centrar la atención de las instituciones y los gobiernos. Sin embargo, la respuesta de los organismos públicos y de los políticos de ambos países, tras las primeras etapas de reconstrucción, fue la de implementar medidas para prevenir los desastres futuros. En el caso de Kobe se reevaluaron sus políticas antisísmicas inmediatamente y cambiaron las normativas de edificación y de planificación de la gestión de los riesgos. Por el contrario, en Haití se promovió la construcción con normativas más restrictivas, pero los problemas económicos que lastran al país impiden que estas medidas antisísmicas se apliquen con normalidad a la hora de construir.

Desde una perspectiva más amplia estos dos casos de estudio evidencian como los riesgos naturales son fenómenos complejos y que no afectan a todos por igual. Los factores geológicos se combinan con el contexto social, económico, político y cultural para determinar el impacto final. Así un terremoto de una magnitud alta en un país vulnerable (ejemplo de Haití) puede tener efectos más catastróficos que uno de magnitud similar, pero en un país desarrollado y preparado (ejemplo de Kobe). De estos dos casos se aprenden numerosas lecciones, ya que para reducir las consecuencias y minimizar los efectos de futuros desastres, no solo resulta imprescindible invertir en tecnología y prevención (aplicación de medidas antisísmicas y defensa civil), sino también en la educación ambiental, en la justicia social y en el fortalecimiento institucional y político.

## 8 CONCLUSIÓN.

Desde el punto de vista geológico los terremotos fuertes y superficiales asociados a fallas localizadas en o cerca de los límites de las placas tectónicas tienden a generar graves daños en las áreas urbanas cercanas. Además, los condicionantes geológicos locales, como suelos blandos y no consolidados, amplifican las ondas sísmicas e incrementan los efectos del desastre.

A pesar de que ambos terremotos tuvieron unas características geológicas parecidas en cuanto a magnitud y profundidad, el impacto fue diferente en cada región debido a la falta de recursos, a la economía del país, a la calidad de las infraestructuras, a las diferencias en la preparación y a la capacidad de respuesta, entre otros factores. La vulnerabilidad socioeconómica y estructural de la región afectada es tan importante o más que la intensidad del propio fenómeno natural. La comparación entre los terremotos de Haití y Kobe no solo ilustra las diferencias entre dos eventos sísmicos, sino que plantea una reflexión sobre la desigualdad en el planeta frente a los desastres naturales.

En definitiva, estos eventos evidencian la necesidad y la utilidad de invertir en medidas preventivas y de alarma, la implantación de normativas antisísmicas estrictas. Todo esto basado en estudios científicos que permitan comprender mejor la dinámica de los terremotos y los efectos sobre la superficie del terreno para reducir el riesgo sísmico y especialmente, la pérdida de vidas humanas. En conclusión, invertir en investigación y técnicas para prevenir los terremotos es una inversión en la seguridad y el bienestar de las comunidades que están sometidas a riesgos geológicos ligados a los terremotos.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, P. L. (2016). *Natural Disasters*. McGraw-Hill Education. 550 pp.

Alfaro, P., & Fernández, C. (2019). ¿Cuántas placas hay en el planeta tierra? *Enseñanzas de Las Ciencias de La Tierra*, 27(3), 246-256.

- Alfaro, P., Alonso Chaves, F. M., Fernández, C., & Gutiérrez Alonso, G. (2013). La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 21(2), 168–180.
- Benito Oterino, B., Cervera Bravo, J., Gaspar Escribano, J., Staller Vázquez, A., Martínez Cuevas, S., Rivas Medina, A., Torres Fernández, Y., García Martínez, R., González-Crende, P., Parovel, M., García Castro, R., Belizaire, D., Haendel Dorfeuille, J. M., Pierristal, G., Martínez Díaz, J. J., Córdoba Barba, D., de las Doblas Lavigne, M., Molina Palacios, S., Navarro Bernal, M., ... Polanco, E. (2012). *Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Haití y aplicación al diseño sismorresistente*. Universidad Politécnica de Madrid y Observatorio Nacional del Medioambiente y Vulnerabilidad. 108 pp.
- Biología y Geología. (s.f). Factores de riesgo. [https://biologia-geologia.com/geologia/711\\_factores\\_de\\_riesgo.html#exposicion](https://biologia-geologia.com/geologia/711_factores_de_riesgo.html#exposicion).
- Canavire-Bacarreza, G., Carrasco, N., Gomez Aliaga, G. A., Nsababera, O., & Cardona Botero, M. (2024). Household vulnerability to and preparedness for disasters in Haiti. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104752>
- DesRoches, R., Comerio, M., Eberhard, M., Mooney, W., & Rix, G. J. (2011). Overview of the 2010 Haiti Earthquake. In *Earthquake Spectra*, 27(S1), S1–S21. <https://doi.org/10.1193/1.3630129>
- Fernández, C., & Alfaro, P. (2019). 50 años de tectónica de placas. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 27(3), 235-237.
- Fernández, C., Alfaro, P., Gutiérrez Alonso, G., & Alonso Chaves, F. M. (2019). ¿Qué mueve las placas tectónicas? *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 27(3), 238–245.
- Granja Bruña, J. L., Carbó Gorosabel, A., Hernaiz-Huerta, P. P., Lianes Estrada, P., Muñoz-Martín, A., & Olaiz Campos, A. (2011). El terremoto de Haití: dos años después continúa la incertidumbre sobre la falla sísmica que ocasionó el desastre. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 19(3), 369–371.

- Hayes, G. P., Briggs, R. W., Sladen, A., Fielding, E. J., Prentice, C., Hudnut, K., Mann, P., Taylor, F. W., Crone, A. J., Gold, R., Ito, T., & Simons, M. (2010). Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Nature Geoscience*, 3, 800–805. <https://doi.org/10.1038/NGEO977>
- Hyndman, D., & Hyndman, D. (2016). *Natural Hazards and Disasters*. Cengage Learning. 578 pp.
- International Business Times UK. (2015). *Kobe Earthquake 20th Anniversary: Facts about the devastating 1995 Great Hanshin earthquake*. [Kobe earthquake 20th anniversary: Facts about the devastating 1995 Great Hanshin Earthquake | IBTimes UK](#)
- Japan Nakama. (2021). *Kobe Earthquake 1995*. [Japan Nakama | The Kobe Earthquake: January 17th 1995](#)
- Kanaori, Y., & Kawakami, S. I. (1997). The 1995 7.2 magnitude Kobe earthquake and the Arima-Takatsuki tectonic line: implications of the seismic risk for central Japan. In *Earthquake Proof Design and Active Faults* (pp. 61–82). Elsevier Science B.V.
- Keller, E. A., & Blodgett, R. H. (2007). *Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Prentice Hall. 450 pp.
- Kuna, V., Ringler, A. T., & Melgar, D. (2025). Evaluation of an Open Earthquake Early Warning System in Mexico, and Laboratory Tests of their Sensors. *Seismological Research Letters*, 96(2), 980–989. <https://doi.org/10.1785/0220230272>
- Oka, F., Sugito, M., Yashima, A., Taguchi, Y., & Sekiguchi, K. (1997). Analysis of strong motion records from the Southern Hyogo earthquake of January 17, 1995. In *Earthquake Proof Design and Active Faults* (pp. 3–26). Elsevier Science B.V.
- Perepérez, B. (2014). La peligrosidad sísmica y el factor de riesgo. *Informes de La Construcción*, 66(534). 8 pp. <https://doi.org/10.3989/ic.13.018>
- Pierre, J. R. (2023). A review of soil liquefaction in the Caribbean Greater and Lesser Antilles in reconsidering the ground motion effect of the M7.0 2010 Haiti

- earthquake in the Port-au-Prince Seaport and Léogâne Plain. *Earthquake Spectra*, 39(4), 2613–2643. <https://doi.org/10.1177/87552930231190902>
- Poupardin, A., Calais, E., Heinrich, P., Hébert, H., Rodriguez, M., Leroy, S., Aochi, H., & Douilly, R. (2020). Deep submarine landslide contribution to the 2010 Haiti earthquake tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 2055–2065. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2055-2020>
- Sato, H., Hirata, H., Ito, T., Tsumura, N., & Ikawa, T. (1998). Seismic reflection profiling across the seismogenic fault of the 1995 Kobe earthquake, southwestern Japan. *Tectonophysics*, 286, 19–30.
- The Japan Times. (2020). *Have we learned enough from the 1995 Kobe quake?* [Have we learned enough from the 1995 Kobe quake? - The Japan Times](#)
- Tierney, K. J., & Goltz, J. D. (1997). *Emergency Response: Lessons Learned from the Kobe Earthquake*. 18 pp.
- Toda, S., Hataya, R., Abe, S., & Miyakoshi, K. (1997). The 1995 Kobe earthquake and problems of evaluation of active faults in Japan. In *Earthquake Proof Design and Active Faults* (pp. 83–04). Elsevier Science B.V.
- Tokimatsu, K., & Asaka, Y. (1998). Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 hyogoken-nambu earthquake. *Soils and Foundations*, 163–177.
- Toyoda, T. (2008). *Economic Impacts of Kobe Earthquake: A Quantitative Evaluation after 13 Years*. Hiroshima Shudo University. 12 pp.
- Versluis, A. (2014). Formal and informal material aid following the 2010 Haiti earthquake as reported by camp dwellers. *Disasters*, 38(S1), S65–S87. <https://doi.org/10.1111/disa.12050>
- Ville de Goyet, C., Sarmiento, J. P., & Grünwald, F. (2012). *La respuesta de salud al terremoto de Haití. Enseñanzas que deben aprenderse para el próximo desastre repentino de gran magnitud*. Organización Panamericana de la Salud. 30 pp.

Watanabe, E., Sugiura, K., Nagata, K., & Kitane, Y. (1998). Performances and damages to steel structures during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *Engineering Structures*, 20(6), 282–290.

World Atlas. (2023). *Haiti Maps & Facts*. [Haiti Maps & Facts - World Atlas](#)

World Atlas. (2023). *Japan Maps & Facts*. [Japan Maps & Facts - World Atlas](#)

Yamamura, E. (2014). Natural disasters and social capital formation: The impact of the Great Hanshin-Awaji earthquake. *Papers in Regional Science*, 95, S143–S164. <https://doi.org/10.1111/pirs.12121>