



**SEGURIDAD**  
SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CNPC**  
COORDINACIÓN NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL



**CENAPRED**  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES

# **Estudio de peligro por tsunami en la costa occidental de México.**

## **Evaluación probabilista de peligro por tsunami en las ciudades de Acapulco, Puerto Vallarta y Puerto Escondido**

**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
CENAPRED**

**CORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CNCP**

**SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA**

**Elaboró:**

**Emmanuel Ramírez Álvarez**

**Jefe de Departamento de Investigación Aplicada a Riesgos Sísmicos**

**Subdirección de Riesgos Sísmicos**

**Ciudad de México, Marzo 2021**

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía  
Coyoacán, Ciudad de México. Tel: 5511036000 ext. 72019, [www.gob.mx/cenapred](http://www.gob.mx/cenapred)

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en  
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>  
Página 1 de 20





## ÍNDICE

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 Alcances y objetivo.....	4
<b>2. Distribución de la ocurrencia.....</b>	<b>5</b>
2.1 Caracterización de las fuentes.....	6
2.2 Relación G-R.....	7
2.3 Relación G-R Modificada.....	8
<b>3. Modelo de propagación de tsunamis .....</b>	<b>10</b>
3.1 Generación y modelado de tsunamis.....	10
3.1 EasyWave .....	13
3.2 Resultados de las simulaciones.....	13
<b>4. Resultados .....</b>	<b>15</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>18</b>
<b>Referencias web .....</b>	<b>19</b>





## RESUMEN

El catálogo de tsunamis históricos del CAT-SEMAR, indica que en los últimos 285 años (1537 a 2017), se ha registrado el arribo de más de 60 tsunamis a la costa occidental de México. Aunque se tiene un buen registro histórico sobre este fenómeno en las costas mexicanas existe la posibilidad de ocurrencia de eventos mayores no registrados en intervalos de tiempo mayores. Por tal motivo se realizó un estudio de evaluación probabilista de peligro por tsunami productos de sismos de campo cercano en las ciudades portuarias de Acapulco, Puerto Vallarta y Puerto Escondido ubicadas en las costas del pacífico mexicano, con la finalidad de conocer la probabilidad de exceder alturas de ola en la línea de costa para tres períodos de retorno (100, 475 y 2475 años). Los análisis probabilísticos de peligro de tsunami ofrecen procedimientos clave para comprender el peligro potencial por tsunami. Los modelos numéricos de generación, propagación y altura de ola se combinaron con las probabilidades de generación de tsunamis proporcionan parámetros que sirvan para realizar las estimaciones cuantitativas del peligro y de las zonas propensas a inundación, así como de apoyo en la elaboración de planes de preparación, emergencia y rutas de evacuación por la precia del fenómeno de tsunami.

**PALABRAS CLAVES:** Evaluación probabilista; Altura de olas; Tsunami.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis son un fenómeno natural poco frecuente, sin embargo en los últimos 100 años alrededor del mundo, 58 de ellos han cobrado más de 260,000 vidas, con un promedio de 4,600 por desastre, superando a cualquier otro riesgo natural. El tsunami más mortífero de la historia ocurrió en diciembre de 2004 en el Océano Índico consecuencia de un sismo Mw 9.0 frente a las costas de Sumatra, se estima que este causo el deceso de 227000 personas en 14 países. En marzo de 2011 en frente a las costas de Japón se registró un sismo Mw 8.9, el cual causo el deceso de unas 19000 personas (Pesaresi, M., et al, 2017).

Es conocido que el Pacífico mexicano, se caracteriza por ser la zona donde convergen dos placas, la de Cocos que se desliza por debajo de la Norteamericana generando sismos de gran magnitud con potencial tsunamigénico, los cuales representan un riesgo elevado para la población asentada en el litoral de la costa pacífica mexicana, sin embargo es importante saber que no todos los sismos pueden ocasionar un tsunami, la generación de este tipo de fenómenos depende de distintos factores como la magnitud, profundidad y el tipo de movimiento de la falla (Figura 1).

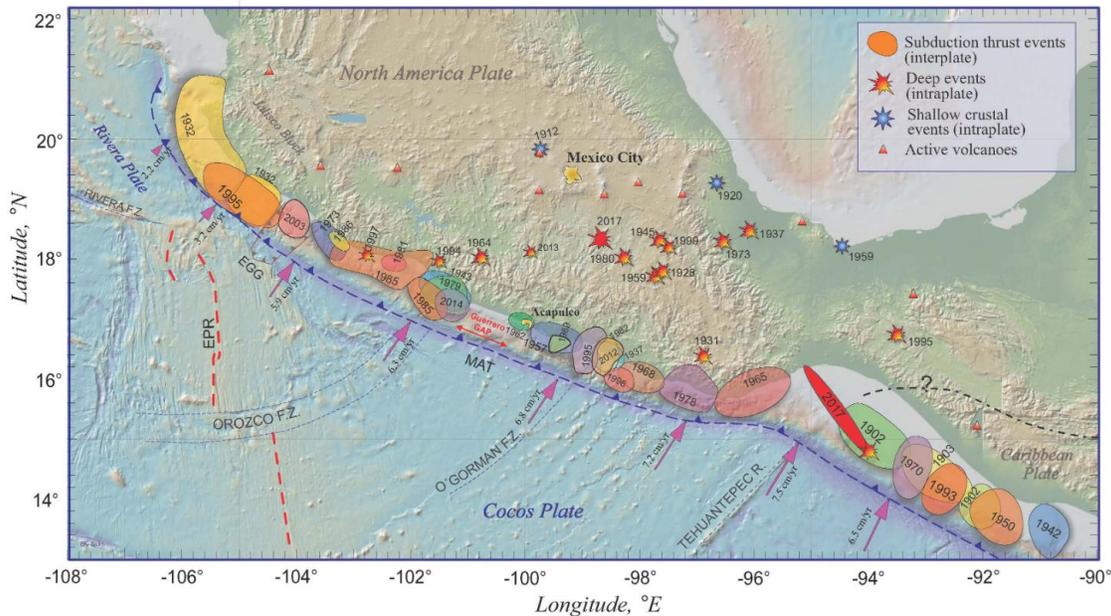
En la práctica existen dos métodos para caracterizar el peligro por tsunamis, el primero de ellos es el cálculo de la amenaza usando el método determinista en al cual se considera el evento máximo creíble (MCE) que puede afectar a una área o zona de interés, y el enfoque probabilista para distintos periodos de retorno.

Este tipo de evaluaciones determinísticas consideran los catálogos de tsunami en una región de estudio para aproximarse de forma certera al evento máximo más probable (MCE), la altura de ola en los puntos de interés, modelos de fuente e hidrodinámicos complejos acorde a los recursos computacionales disponibles. Modelar el escenario máximo creíble es útil para evaluar áreas de



inundación y planificar rutas de evacuación.

Como la gran mayoría de los catálogos históricos de tsunamis son incompletos, la alternativa para subsanar la deficiencia en los catálogos, son los modelos numéricos de generación, propagación e inundación de tsunamis combinados con las probabilidades de origen para proporcionar estimaciones cuantitativas del peligro de tsunami para distintos periodos de retorno.



**Figura 1** Cien Años de Sismicidad en México (Kostoglodov, V. 1999, UNAM)

La evaluación probabilística del peligro de tsunami también conocida como PTHA, se ha desarrollado para cuantificar la amenaza de una región expuesta a este fenómeno para posteriormente incluir esta información en los análisis de riesgo de tsunami para distintos periodos de retorno de interés “Tr” y que pueden extenderse desde alguno cuantos años hasta cientos e incluso miles de años, y donde los catálogos de tsunamis no tienen información.

## 1.1 Alcances y objetivo

El objetivo de este estudio es obtener la probabilidad de exceder umbrales de altura de ola en tres ciudades del Pacífico mexicano, y para tres periodos de retorno distinto. Las ciudades en análisis es Puerto Vallarta, Acapulco y Huatulco.

Dentro de los alcances de este estudio se realizó:

- La recopilación de información libre topográfica y batimétrica de la bahía de del Pacífico mexicano.
- Generación de un catálogo sintético que contemple las características de la fuente.
- El análisis Gutenberg-Richter (G-R), para cada fuente seleccionada con posibilidad de generación de tsunami.



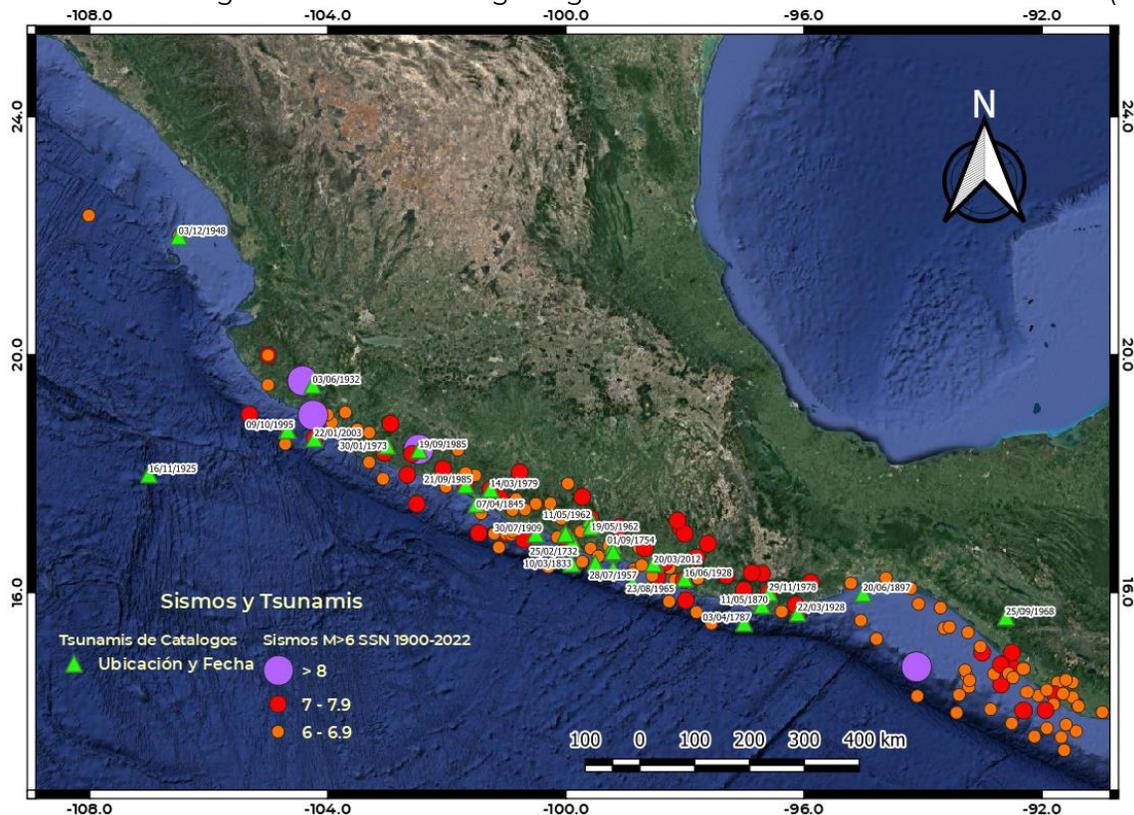
- Se elaboraron mapas probabilidades de exceder umbrales de altura de ola para distintos periodos de retorno (100, 457 y 2475 años).

## 2. Distribución de la ocurrencia

Los análisis probabilísticos de eventos naturales en una región son altamente demandantes debido a la recolección y generación de parámetros que se requieren para caracterizar las amenazas, pero son un componente clave de cualquier evaluación integral de peligros.

Para los análisis de riesgos de tsunamis se han basado en el pasado en modelos de tipo determinista o de escenarios únicos. Sin embargo, los análisis probabilistas deben considerar diversas evaluaciones geofísicas debido a las diferentes causas que generan los tsunamis (terremotos, deslizamientos, actividad volcánica, eventos meteorológicos, impactos de asteroides) con tiempo variable de ocurrencia (Grezio et al., 2017).

En este estudio nos enfocamos solamente en los tsunamis generados por eventos sísmicos. Los terremotos o sismos fuertes en las zonas de subducción, son la causa principal de los tsunamis más grandes. Si bien, no todos los sismos producen tsunamis, en México los principales tsunamis registrados tienen su origen en el fenómeno geológico sísmico de las zonas de subducción (Figura 2).



**Figura 2** Sismos de subducción con  $M > 6$  en México de 1900 a 2022 registrados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN-UNAM), y principales tsunamis de catálogos disponibles (Ferrás et al., 1991, CENAPRED, 2005).





Los análisis probabilísticos de peligro por tsunamis están estrechamente relacionados con el análisis sísmico probabilista (Esteva, 1967 ; Cornell, 1968 ), y se están convirtiendo en una herramienta que se usa con mayor frecuencia, no obstante también involucra retos como, la clasificación de los eventos, los periodos de retorno seleccionados, las fuentes con potencial generador de tsunamis, así como los relacionados con los análisis probabilísticos y las incertidumbres que estos ostentan.

El Análisis Probabilísticos de Peligro por Tsunami PTHA (por sus siglas en inglés) tiene como objetivo evaluar la probabilidad de que una determinada "medida de intensidad" de peligro de tsunami sea superado en un determinado periodo de retorno, las medidas estas medidas pueden ser la altura de ola en la línea de costa o la zonas de inundación.

El PTHA se basa en simulaciones numéricas de tsunamis a partir de un modelo de fuente sísmica probabilística. Debido a las incertidumbres para predecir la ocurrencia de un sismo son muy elevadas se hace uso del análisis probabilístico de peligro sísmico para tomar en cuenta las distintas incertidumbres involucradas.

## 2.1 Caracterización de las fuentes

Un paso fundamental en el estudio del análisis de peligro sísmico probabilista PSHA, es conocer la frecuencia y severidad con la que se podrían presentar los eventos sísmicos dentro de una misma fuente. Para esto, se puede considerar que los sismos tienen las misma probabilidad de ocurrencia dentro de la geometría de la fuente, y si la recurrencia (magnitud vs. frecuencia), observada en los catálogos sísmicos, es suficiente para predecir los eventos en cualquier lapso de tiempo o se empleara un catálogo sintético (Quinde, 2014).

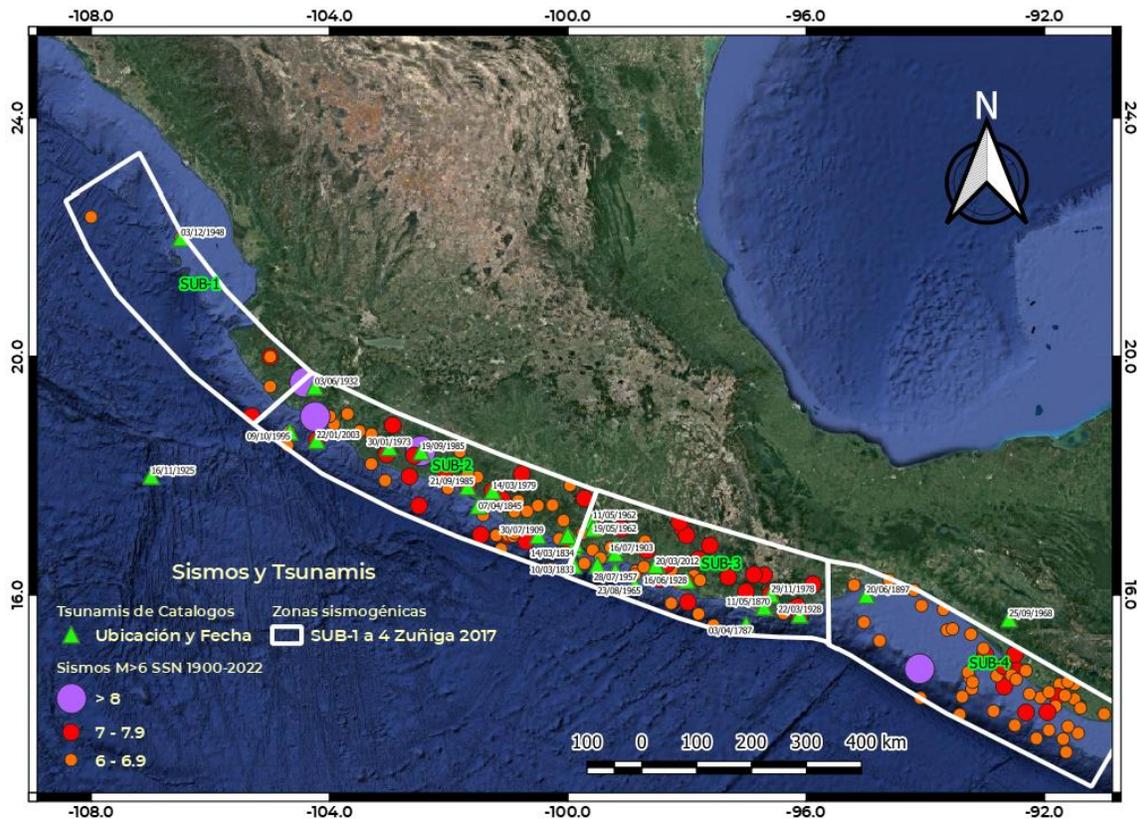
Como primer paso se requiere contar con información de las fuentes sísmicas que contribuyen al peligro sísmico con potencial generador de tsunamis para las zonas de estudio, en términos de su geometría y sismicidad.

Los criterios para determinar los límites de las fuentes sísmicas incluyen revisiones detalladas de información sobre la configuración tectónica, fallas activas, características focales y/o patrones de fallamiento y catálogos de sismos históricos e instrumentales que permitan conocer las características de los eventos que rigen la sismicidad en la zona de estudio (Zúñiga et al., 1997).

En este estudio se utilizó la información de la regionalización sísmica de México y la geometría de cada una de las fuentes seleccionadas en la zona de subducción del Pacífico mexicano identificadas como SUB-1, SUB-2, SUB-3 y SUB-4 propuestas por Zúñiga et al, 2017, y que toman en consideración los catálogos disponibles así como homogenización de magnitudes para la obtención de los coeficientes **a** y **b**.

Para cada fuente sísmica, se generaron se generó un catálogo sintético, que toma en consideración las características antes mencionadas, para generar la frecuencia anual de recurrencia y la tasa de excedencia de magnitudes, utilizando la relación Gutenberg - Richter modificada.





**Figura 3** Sismos de subducción con  $M > 6$  en México (SSN-UNAM), y principales tsunamis (Ferrás et al., 1991, CENAPRED, 2005) y clasificación sísmogénica de la zona de subducción mexicana (Zúñiga et al., 2017).

## 2.2 Relación G-R

Cuando se ha definido la geometría de la fuente, el siguiente paso es evaluar el tamaño de los sismos que la fuente puede generar y su ocurrencia con el paso del tiempo. Para determinar su sismicidad se hace uso de catálogos de registros sísmicos (actuales e históricos) de eventos ocurridos sobre la geometría de la fuente anteriormente definida, y de información sobre neotectónica y paleosismología de la fuente. Una hipótesis importante de la cual parten los estudios para definir la sismicidad de una fuente es que la relación de recurrencia sísmica (magnitud vs frecuencia) obtenida a partir de datos observados en el pasado, es correcta para predecir la sismicidad futura de la fuente. (Leonardo, M., 2013).

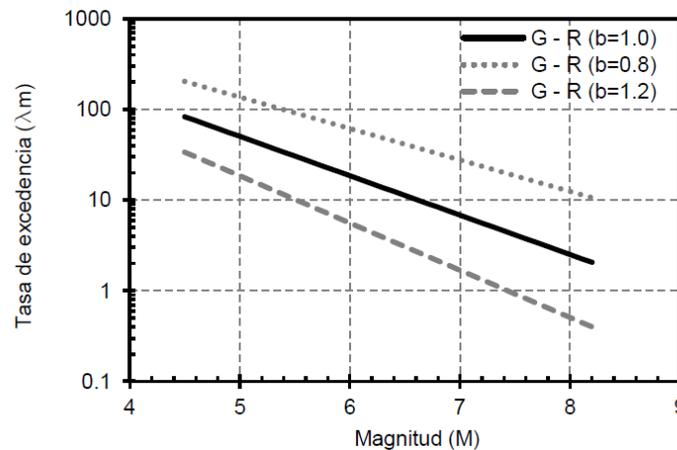
Uno de los modelos de recurrencia sísmica más comúnmente usados, es el modelo propuesto por Gutenberg – Richter (1944), quienes estudiaron datos de sismos ocurridos en el sur de California durante un periodo de tiempo. Ellos organizaron los datos de acuerdo al número de sismos que excedían diferentes magnitudes presentadas durante un determinado intervalo de tiempo y dividieron el número de excedencias de cada magnitud con respecto a dicho intervalo, obteniendo de esta manera una tasa media anual de excedencia  $\lambda_m$ , de un sismo de magnitud. Cuando graficaron el logaritmo de la tasa anual de excedencia de los sismos ocurridos en el sur de California, observaron



una relación lineal. El resultado del modelo de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter se expresa como:

$$\log \lambda_m = a - bm$$

Donde  $\lambda_m$  es la tasa anual de excedencia de la magnitud  $m$ , el coeficiente  $a$  representa el logaritmo del número total de sismos que tienen magnitud mayor o igual a cero, el coeficiente  $b$  es un parámetro que describe la probabilidad relativa de ocurrencia de sismos de magnitudes altas y bajas. Los coeficientes  $a$  y  $b$  se obtienen generalmente mediante la regresión de la base de datos correspondientes a la sismicidad de la fuente de interés. El modelo estándar de Gutenberg – Richter es graficado en la figura 4, donde se observa que a medida que el valor de aumenta o disminuye, varía la pendiente de la línea recta que define la tasa de excedencia de sismos de diferentes magnitudes.



**Figura 4** Modelo de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter

### 2.3 Relación G-R Modificada

Debido a que el modelo de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter fue realizada para una zona en particular, se deben realizar las adaptaciones necesarias para nuestra región de estudio, una de estas modificaciones es la relación G-R Modificada. La regionalización sísmica de la República Mexicana está dividida por la tectónica y por la historia instrumental de los sismos registrados (Zuñiga et al., 1994, 1997, 2010, 2017) Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante por unidad diaria. La actividad de la  $i$ -ésima Fuente sísmica se especifica en términos de tasa de excedencias de las magnitudes  $\lambda_i(M)$ , que ahí se generan. La tasa de excelencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se genera en una fuente los temblores con magnitud superior a una dada (MDOC-2015).

La sismicidad de las fuentes gobernadas por la relación Gutenberg-Richter modificada. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas la función  $\lambda(M)$  es una versión modificada de la relación de G-R. En estos casos la sismicidad queda descrita de la siguiente manera (Cornell et al., 1969):

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}; \quad M_0 \leq m \leq M_u$$



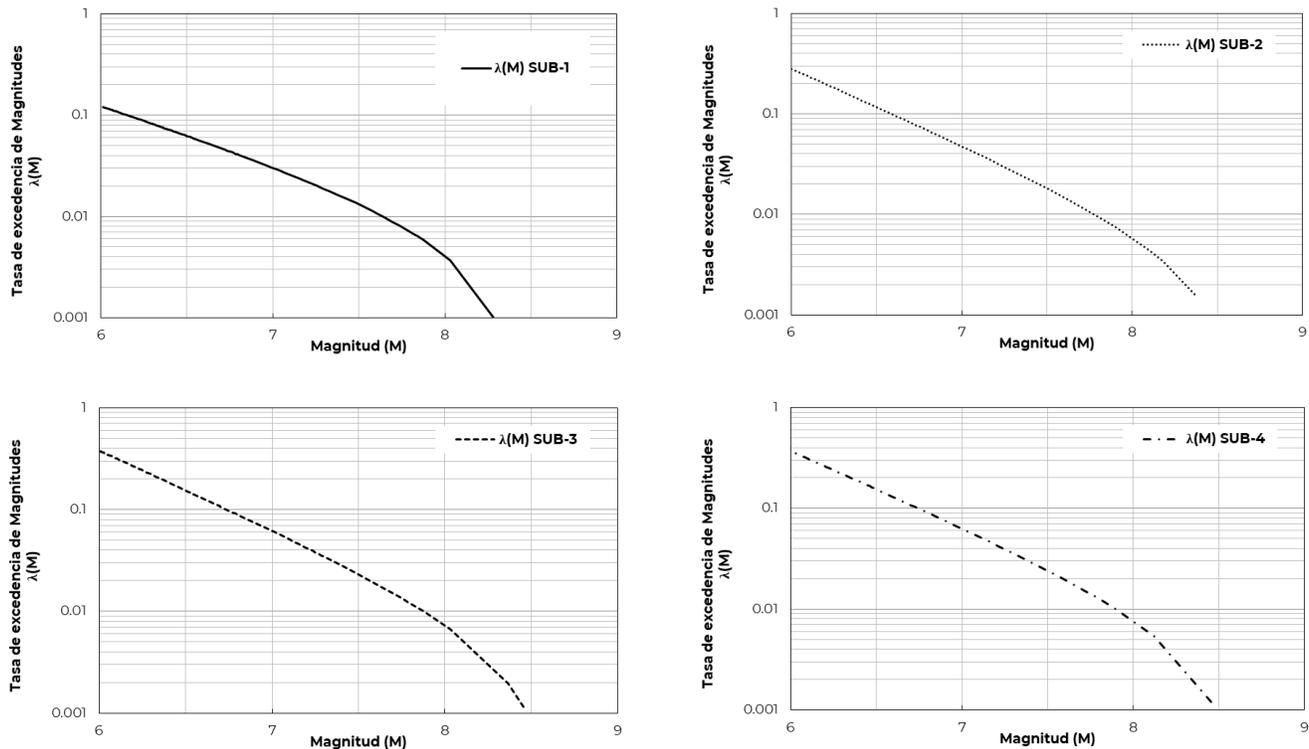
Donde

$M_0$ , es la magnitud mínima relevante

$M_u$ , que es la máxima magnitud que puede generarse en cada fuente

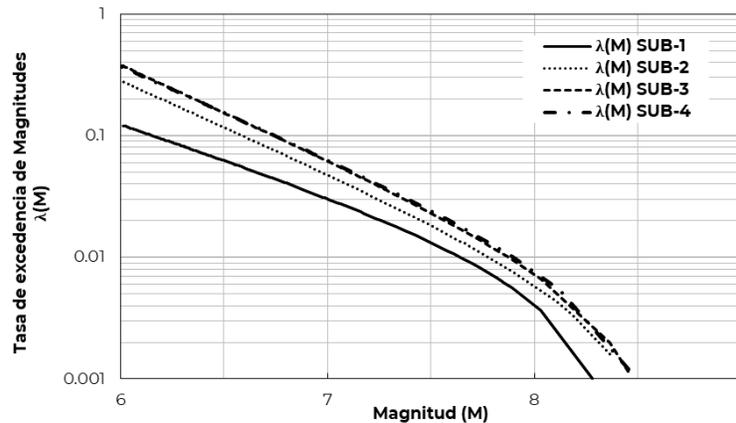
$\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $m$ , son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas.

Para el factor  $M_0$  se tomaran en cuenta sismos con magnitud  $M > 6$ , y para  $M_u = 8.6$ , que es la magnitud estimada del evento histórico del 28 de marzo de 1787 (sismo de San Sixto), en los límites de Oaxaca y Guerrero; el cual es considerado como el terremoto histórico de mayor magnitud en México (CENAPRED, 2005, 2019). Estos parámetros diferentes para cada fuente se estiman por procedimientos estadísticos bayesianos (Rosenblueth *et al.*, 1989, Arboleda *et al.*, 1993) que incluyen información sobre regiones tectónicamente similares a las de nuestro país más información experta especialmente sobre el valor de  $M_u$ . En la figura 5 se muestra de excedencia para cada una de las fuentes seleccionadas y en la figura 6 una comparación entre ellas.



**Figura 5** Tasa de excedencia de magnitudes  $\lambda(M)$  con la relación G-R Modificada para cada una de las fuentes seleccionadas.





**Figura 6** Tasa de excedencia de magnitudes  $\lambda(M)$  para cada una de las fuentes seleccionadas.

### 3. Modelo de propagación de tsunamis

La simulación matemática puede modelar las características más importantes del desarrollo del tsunami y eventualmente los escenarios de inundación plausibles para el caso de poblaciones costeras. Utilizando la información de la sección anterior se generan modelos computacionales de tsunamis de los sismos propuestos con diferentes magnitudes  $> M_0$ .

#### 3.1 Generación y modelado de tsunamis

El modelado de tsunami incluye, al menos, tres diferentes etapas:

- La generación de la dislocación cosísmica.
- Tiempo de viaje de la ola generada por la deformación del fondo oceánico.
- La altura máxima de ola, en la línea de costa de las ciudades seleccionadas, el modelado de la inundación con esta información se revisará en otro proyecto.

De acuerdo con lo anterior la selección de un método numérico para resolver el sistema de ecuaciones de gobierno debe realizarse teniendo en cuenta que éste pueda representar esas características.

La **magnitud de un tsunami** se puede medir de varias maneras: por la altura del runup, por la profundidad de la inundación o por la altura del tsunami en la costa. Para conocer dichos parámetros se debe considerar la condición inicial del evento sísmico que genera un desplazamiento de la superficie marina seguida del desplazamiento vertical (Figura 2.2).

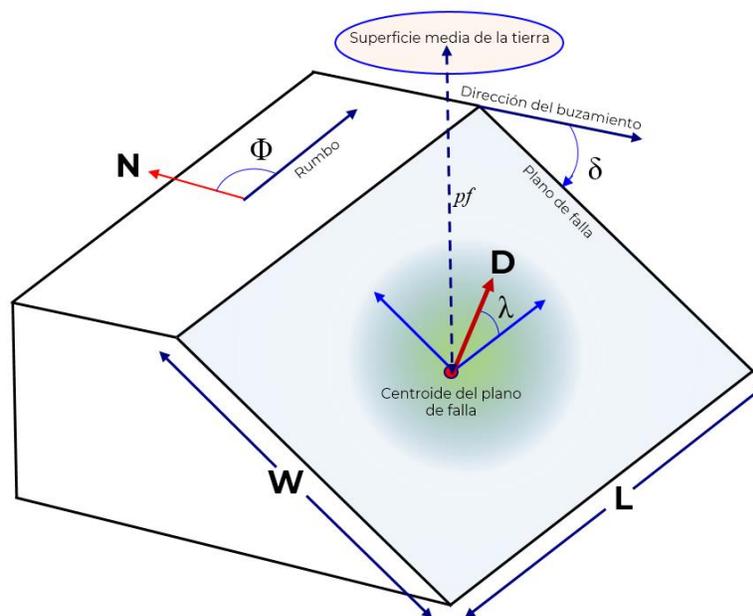
Para determinar el desplazamiento vertical cosísmico, se usa un modelo de deformación elástica de



la fuente generadora, que asume la ruptura de un simple plano de falla rectangular (Okada, 1992). En la figura 2.2 se muestra un modelo esquemático del plano de falla y los parámetros que los componen.

Dónde:

- El **área de ruptura (en azul)** se mide en el plano de falla, y se define la longitud **L** y ancho **W** de ruptura, generalmente en metros o kilómetros.
- El **hipocentro o foco** es la zona en el interior de la Tierra donde inicia la ruptura usualmente al centro del plano de falla.
- **Epicentro**, es el punto situado directamente encima del hipocentro proyectado en la superficie media de la tierra.
- **Profundidad focal  $pf$**  es la distancia entre el hipocentro y el epicentro.
- **Strike o Rumbo  $\Phi$**  es el ángulo de orientación de la falla medido desde el borde superior en un plano horizontal con sentido de las manecillas del reloj y origen en el Norte geográfico, los valores del ángulo se suelen establecer entre 0-360°.
- **Dip o buzamiento  $\delta$** , es el ángulo de inclinación al cual el plano cae hacia abajo desde el borde superior. Angulo positivo entre 0 y 90 grados.
- **Slip o desplazamiento promedio  $D$** : distancia en el que el bloque superior se mueve en relación al bloque inferior, en la dirección especificada por el ángulo rake.
- **Rake o ángulo de deslizamiento  $\lambda$** , y que describe la dirección del movimiento o desplazamiento (slip) relativo del bloque superior, respecto del bloque inferior de la falla, considerado este último como quieto.



**Figura 7** Modelo esquemático del plano de falla de una fuente sísmica y los parámetros que los componen.

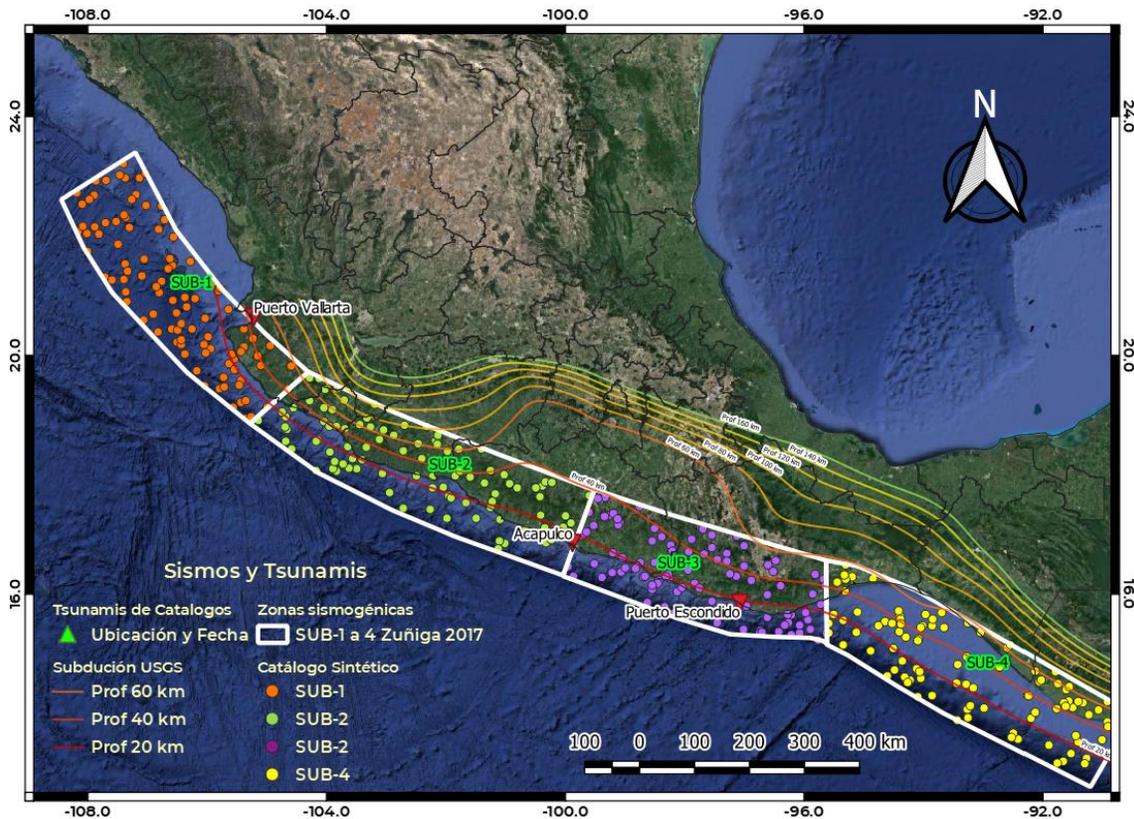
El modelo de Okada genera una geometría de deformación del suelo marino, obteniendo un



desplazamiento uniforme del sólido sobre una superficie finita con los parámetros mencionados anteriormente. Esta deformación es utilizada solo como una aproximación, ya que raramente el suelo marino es plano y muchos de estos parámetros son promedios o datos obtenidos desde observaciones externas.

El desplazamiento medio de los bloques (dislocación) se calcula mediante la expresión propuesta por Allen and Hayes (2017) y que son similares a las de Hanks y Kanamori, 1979. Dicha expresión relaciona la magnitud  $M_w$  con el largo  $L$ , el ancho  $W$ , la dislocación  $d$  y el módulo de rigidez al cortante  $\mu$ , utilizando un coeficiente de ajuste  $A$ . Se determinó las dimensiones de ruptura  $L$  y  $W$  de los sismos utilizados en cada una de las simulaciones realizadas en este proyecto.

Utilizando la caracterización geométrica y parámetros de las fuentes de subducción (Zúñiga et al., 2017) y las tasas de excedencia de magnitudes  $\lambda(M)$  obtenidas de forma estocástica para considerar tiempos de cientos a miles de años con potencial generado de tsunamis, a cada evento se le asignan coordenadas aleatorias, y se verifican que dicha coordenada pueda contener las características de ruptura  $L$  y  $W$  del sismo asignado y su ubicación respecto a las profundidades de la zona de subducción mexicana (Hayes, 2018).



**Figura 8** Catálogo sintético para la asignación de coordenadas del de sismos estocásticos cada una de las fuentes seleccionadas.





### 3.1 EasyWave

Por otra parte, para la generación del modelado de propagación del tsunami originado por una dislocación sísmica en el fondo marino anteriormente descrito, se utilizó la herramienta, denominada EasyWave, la cual fundamenta el modelado a través de los parámetros de la falla sísmica, donde se asume un desplazamiento instantáneo de la superficie del mar. Dicho desplazamiento co-sísmico se modela de acuerdo con el modelo clásico de Okada (1985) para la ruptura rectangular de deslizamientos uniformes en un medio espacio homogéneo. Para lo cual se deberá considerar una regla general fundamental: la falla (de subducción) debe estar suficientemente definida. Por ejemplo, uno puede literalmente especificar todo el conjunto de parámetros de Okada: ubicación (x e y), profundidad (depth), longitud de ruptura L, ancho de ruptura W, deslizamiento (slip), dirección (strike), ángulo de inclinación o buzamiento (dip) y ángulo de desplazamiento (rake) y la magnitud del momento ( $M_w$ ) del sismo. Para obtener la longitud de ruptura L, ancho de ruptura W, se usan las relaciones de escalamiento de Allen and Hayes, 2015, la cantidad de deslizamiento está implícita en la relación.

EasyWave sigue el algoritmo computacional presentado en Kowalik y Whitmore (1991), utilizando las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas se resuelven en una cuadrícula escalonada de diferencia finita en coordenadas esféricas que implican un paso de tiempo explícito. Solo se considera la aproximación lineal, el algoritmo no calcula las inundaciones costeras y las ejecuciones detalladas directamente. En cambio, lleva la ola de tsunami hasta el límite de validez del modelo lineal de aguas poco profundas (generalmente, 20-50 metros de profundidad) y luego estima las acumulaciones con relaciones empíricas (por ejemplo, Chesley y Ward, 2006).

### 3.2 Resultados de las simulaciones

EasyWave produce salidas 1D y 2D. Las series de tiempo de onda se pueden almacenar para cualquier ubicación dada en un formato de tabla de texto simple. Para el presente estudio, se obtuvieron los datos de tiempo estimado de llegada (ETA) y altura estimada de ola (EWH) para varios sismos y 291 puntos del Pacífico Mexicano (Figura 3.1).

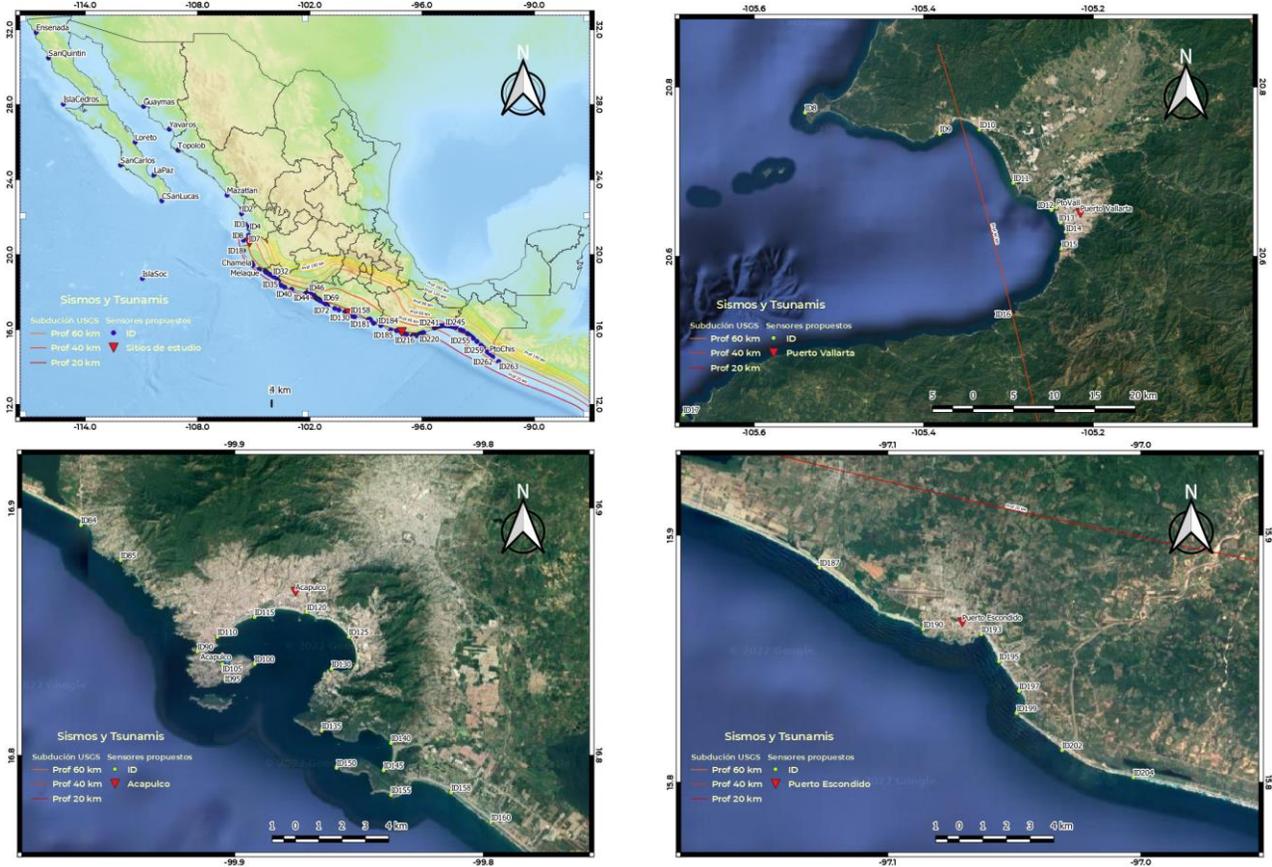
De forma general se obtuvo:

- Modelados de propagación del tsunami para diferentes sismos en tsunamigénicos en México, obtenidos del catálogo del CAT-SEMAR, utilizando una herramienta para simular la generación y propagación de tsunamis, denominada EasyWave.
- Tiempo estimado de llegada (ETA).
- Altura estimada de ola (EWH) para varios puntos del litoral Mexicano.
- Comprobación de alturas de ola con registros históricos de mareógrafos y boyas DART en caso de existir.

De los eventos ya mencionados (aquellos cuya información referente al mecanismo focal es conocida), se seleccionarán algunos para proceder a realizar las simulaciones de propagación de la ola con la ayuda del software Easywave, con el cual se obtiene la altura y tiempo de arribo de la ola.



Para reducir aún más la lista de eventos, primero, se seleccionaron los eventos más significativos, es decir, los de mayor magnitud y que a su vez, estuviesen distribuidos a lo largo de la zona de subducción mexicana, de tal manera que se pudiese abarcar lo más que se pueda de la misma; lo anterior debido a que facilitará la realización de las simulaciones faltantes.



**Figura 9** Los puntos rojos indican la ubicación de 291 sensores hipotéticos propuestos en la República Mexicana, y los correspondientes a las tres ciudades costeras en estudio.

Para esto se necesitó los modelos de elevación digital de la zona de estudio en coordenadas geográficas (Latitud, Longitud), descargados del portal web de INEGI y para la batimetría se utilizó la información del mapa ETOPO-1 del sitio web WorldWide Data (Figura 2), estos modelos permitieron realizar la malla en el área de influencia y así poder asignar las condiciones iniciales del tsunami, finalmente con estos resultados se pueden seguir planteando proyectos en otras áreas de interés en costas mexicanas, ya que pueden ser una herramienta importante en la investigación de los tsunamis y sus comportamientos en zonas costeras.





## 4. Resultados

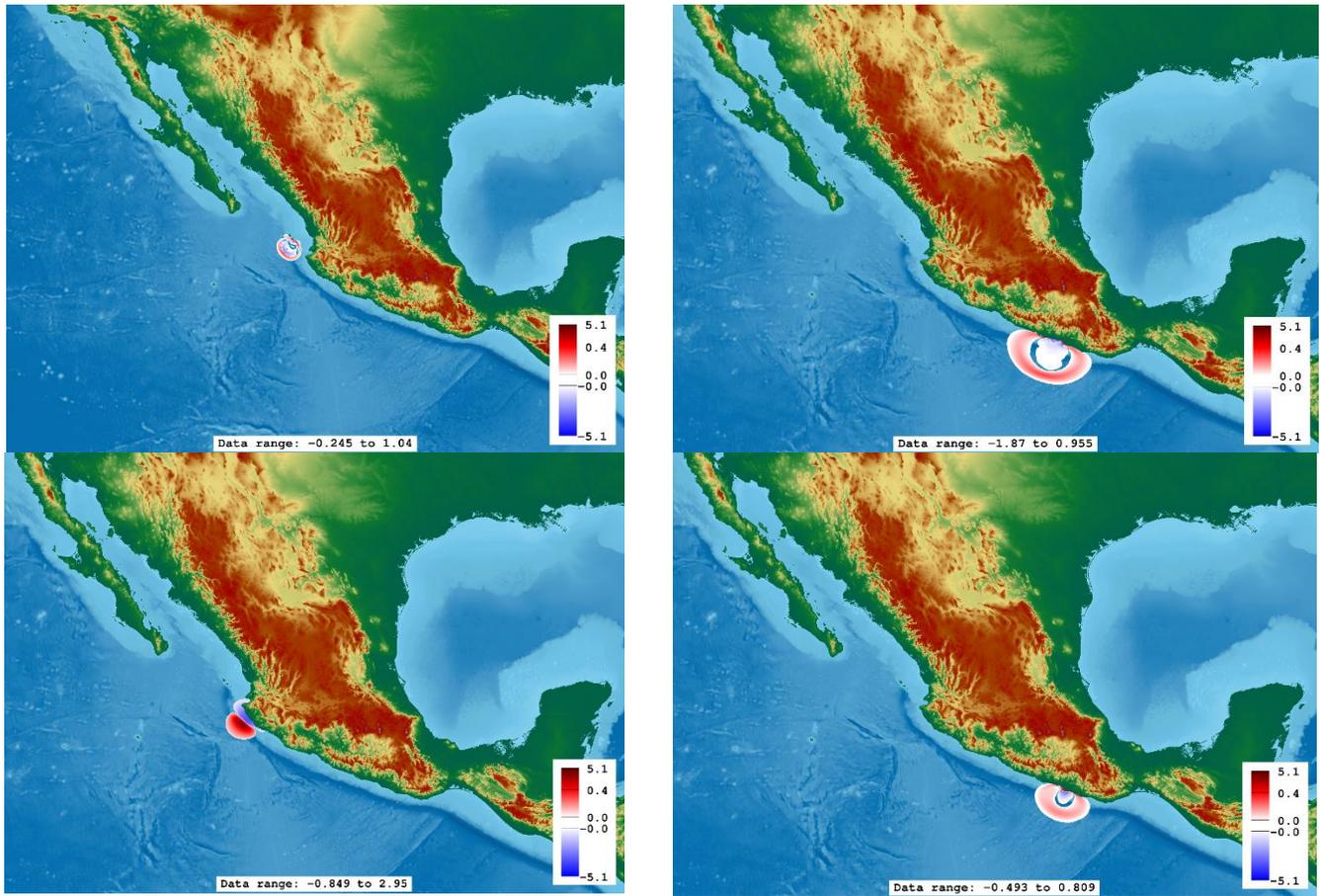
El propósito de un Análisis Probabilísticos de Peligro por Tsunami PTHA es encontrar la probabilidad de que se exceda un nivel de inundación  $l$  o altura de ola  $h$  y se usan para conocer el de peligro de tsunami, expresada como una curva de peligro, que muestra como la intensidad de excedencia del peligro en función de la probabilidad, con la probabilidad a menudo expresada como una tasa de excedencia por año.

Dado que no todos los sismos producen tsunamis se requiere conocer las características en términos de desplazamiento (slip), el área de ruptura ( $L \times W$ ), y de todos los parámetros que afectan la generación de los eventos estocásticos sísmicos tsunamigénicos considerados en la relación G-R.

No	Long	Lat	Mw	L	W	A de rup	Dmax	MoD	MoN
1	-107.06	20.6	6.2	10.38	8.18	109.62	0.88	2.135E+25	2.135E+18
2	-106.17	19.75	7.6	90.45	33.46	3178.12	2.38	3.6949E+27	3.6949E+20
3	-104.59	19.83	7.8	120.73	40.37	4980.44	2.72	7.349E+27	7.349E+20
4	-105.56	19.14	6.7	21.95	13.31	351.31	1.24	1.2694E+26	1.2694E+19
5	-107.89	22.69	6.1	9.51	7.73	95.67	0.84	1.7335E+25	1.7335E+18
6	-107.52	22.25	6.1	9.26	7.59	91.67	0.83	1.624E+25	1.624E+18
7	-107.09	21.34	7.0	38.12	19.07	828.85	1.60	4.7228E+26	4.7228E+19
8	-106.5	20.23	6.3	13.05	9.49	156.44	0.98	3.6801E+25	3.6801E+18
9	-104.64	19.45	6.5	17.65	11.55	250.15	1.12	7.5487E+25	7.5487E+18
10	-108.18	22.73	6.3	12.91	9.42	153.81	0.97	3.5856E+25	3.5856E+18
.									
.									
.									
94	-106.81	22.12	7.0	36.85	18.65	786.20	1.58	4.3559E+26	4.3559E+19
95	-108.08	22.17	6.0	8.62	7.25	82.09	0.81	1.3715E+25	1.3715E+18
96	-106.02	20.05	6.2	11.32	8.65	125.40	0.92	2.6231E+25	2.6231E+18
97	-105.54	19.77	6.2	10.97	8.48	119.45	0.90	2.4351E+25	2.4351E+18
98	-106.56	21.99	6.3	13.40	9.66	163.07	0.99	3.9211E+25	3.9211E+18
99	-107.59	21.27	7.9	125.48	41.40	5288.87	2.77	8.0569E+27	8.0569E+20
100	-106.85	21.16	6.7	24.07	14.14	405.49	1.30	1.5811E+26	1.5811E+19

Las simulaciones de cada uno de los eventos hipotéticos con capacidad para generar tsunamis se llevaron a cabo en el software EASYWAVE para conocer la altura de ola para después correlacionar esos parámetros con una tasa de excedencia de altura de ola  $h$  de los eventos con potencial de generación de tsunamis.





**Figura 10** Ejemplo de resultados obtenidos de simulaciones de sismos hipotéticos usando el software EASYWAVE.

En casos simples y que solo involucran tsunamis de origen cercanos para el PTHA se ignoran casi todas las incertidumbres, el PTHA incluye un conjunto finito de eventos tsunamigénicos hipotéticos, donde cada evento individual se repite aleatoriamente en el tiempo e independientemente de todos los demás eventos (es decir, como un proceso de Poisson), con una tasa anual media conocida  $\lambda$  ( e ) ( eventos/año).

En este estudios se adopta la forma la ecuación modificada por Jaimes et al., 2015, de la expresión propuesta por Cornell (1968) y Esteva (1967), que es una de las muchas formas que puede adoptar el teorema de la probabilidad total, para determinar la tasa de excedencia anual de h.

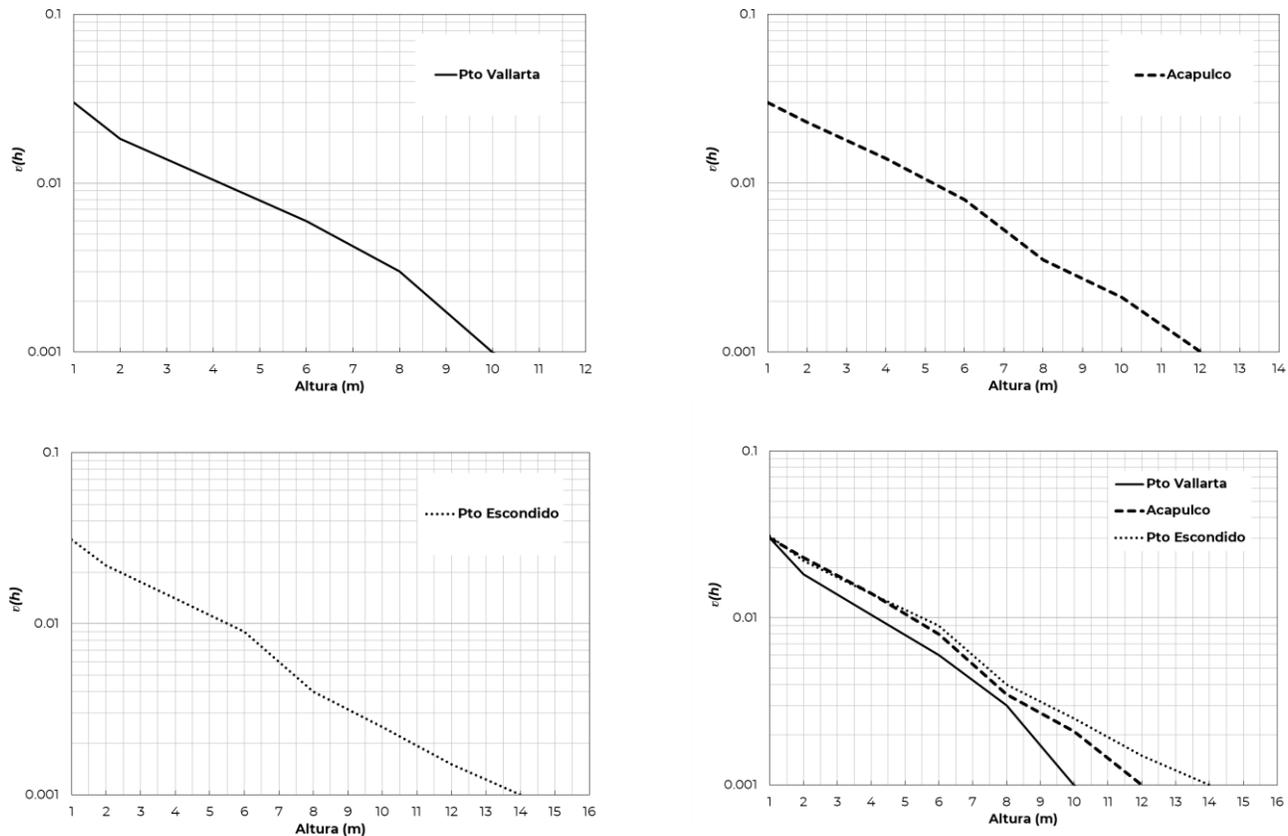
$$v(h) = \sum_{k=1}^{N_{\text{events}}} \Pr(h > h^* | \text{Event}_k) F_A(\text{Event}_k)$$



donde  $v(h)$  es la tasa de excedencia del parámetro de intensidad  $h$ ,  $Pr(h > h^* | Event_k)$  es la probabilidad de que la profundidad de inundación calculada exceda una profundidad de inundación especificada  $h^*$ , dado que el  $k$ -ésimo evento de tsunami ha ocurrido y  $FA(Event_k)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del  $k$ -ésimo evento ;  $N_{events}$  son todos los eventos que potencialmente generan tsunamis en el sitio de interés. El inverso de  $v(h)$  es el período de retorno.

Con estos datos podemos calcular para cada fuente que sigue un proceso de Poisson para todos los terremotos que generan tsunamis, por lo tanto, las tasas de excedencia de intensidad también son un proceso de Poisson. En este sentido, la probabilidad de excedencia de la intensidad  $h$  para todas las fuentes sísmicas durante los próximos  $T$  años estaría dada por (e.g. Annaka et al., 2007);

$$Pr(h > h^* | T) = 1 - \exp\{-v(h)T\}$$



**Figura 11** Curvas de amenaza calculada por la tasa de excedencia  $v(h)$  del parámetro de intensidad  $h$  para Acapulco, Puerto Vallarta y Puerto Escondido.





La evaluación probabilística de los peligros de tsunami utilizando una distribución de tamaño de frecuencia derivada empíricamente depende de qué tan bien restringida esté la distribución por los datos del catálogo. La curva de amenaza calculada por la tasa de excedencia  $\nu(h)$  del parámetro de intensidad  $h$  para un sitio seleccionado, en función de la intensidad  $h$  de los eventos asociados con la amenaza de tsunami, se muestran a continuación, donde  $1/\nu(h)$ , es el periodos de retorno.

Finalmente, se puede hacer una evaluación del peligro de tsunami en cualquier sitio en particular en este estudio se realizó el análisis para las ciudades costeras de Acapulco, Pto Vallarta y Pto Escondidos. La análisis de inundación para los distintos periodos de retorno seleccionados para las ciudades en comento se realizan ene le estudio titulado "Evaluación del peligro por inundación en las ciudades de Acapulco, Puerto Vallarta y Puerto Escondido"

## Referencias

**Allen, T. I., and G. P. Hayes (2015).** Subduction interface fault scaling relationships to facilitate rapid ground-shaking and impact assessments, *Seismol. Res. Lett.* 86, no. 2B, 618.

**Aguilar A., Ordaz M. y Arboleda J., (1999),** "Crisis 99. Sistema de cómputo para el cálculo de peligro sísmico", Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

**Babeyco A., 2012.** "EasyWave: fast tsunami simulation tool for early warning," GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam

**Carrier, G.F., Wu, T.T. and Yeh, H. 2003.** Tsunami run-up and draw-down on a plane beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 475: 79-99.

**CAT-SEMAR. 2016.** HISTORIA DE LOS TSUNAMIS LOCALES OCURRIDOS EN MÉXICO

**CENAPRED. 2005.** Series Fascículos, Tsunamis.

**Cornell A. 1968,** "Engineering Seismic Risk Analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No 5, pp. 1583-1606.

**Esteva L. 1968,** "Criterios para la construcción de espectros de diseño sísmico", Publicación 198, Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Farreras S and Sánchez A 1991** The tsunami threat on the Mexican West coast: a historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*

**Goto C., & Ogawa Y. 1982.** Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. Manuscript, Dept. of Civil Eng., Fac. of Eng., Tohoku Univ., translated by N. Shuto.

**Hayes, G.P. 2018** Slab2 - A Comprehensive Subduction Zone Geometry Model",





**Imamura, F. 1996.** Review of tsunami simulation with a finite difference method. Long Wave Runup Models, World Scientific Publishing Co, 25–42.

**Imamura F., Shuto, N. and Goto C. 1988.** Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunami. Proc. 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Japan, 265-272.

**Jaimes M., Reinoso, E., Ordaz M., 2015** An earthquake-event-based method for mapping tsunami hazards. Maritime Engineering

**Kanamori, H. 1993.** W phase. Geophysical Research letters, vol. 20, No 16, 1691-1694.

**Kostoglodov, V., y Pacheco F., 1999** CIEN AÑOS DE SISMICIDAD EN MEXICO 1999, UNAM

**Leonardo Suárez, Miguel (2013),** sustentante. PSM2012: aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico.

**Okada. 1985.** Surface Deformation to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. Bull. Seism. Soc. Am., 75, [4], 1135-1154.

**Ortiz, M. 2011.** Apuntes del Curso de Capacitación Para Operar el Centro de Alerta de Tsunamis de México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., México.

**Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B. and Karakaisis G. F. 2004.** "Global Relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes". Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, 2004.

**Sánchez Devora. A., y Farreras, S. 1993.** Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México. USA, World Data Center A. National Oceanic and Atmospheric Administration. United States Geological Survey. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50. 94pp.

**Suárez Reynoso, G. y García Acosta, V. 1996** Los sismos en la historia de México.- México. UNAM-CIESAS-Fondo de Cultura Económica. 1996. 286pp.

**Wang, X. & Liu, P.L.D. 2007.** NUMERICAL SIMULATIONS OF THE 2004 INDIAN OCEAN TSUNAMIS — COASTAL EFFECTS. Journal of Earthquake and Tsunami, September 2007, Vol. 01, No. 03: pp. 273-297.

**Zelt, J.A. 1991.** The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. Coastal Engineering, 15(3): 205-246.

**Zúñiga, R. 1994.** Main Seismogenic Sources Zones in Mexico. Technical Report Project 89-0190 IPGH, Pan-American Institute of Geography and History.

**Zúñiga, F. R., G. Suárez, A. Figueroa-Soto, A. Mendoza, 2017.** A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. J. Seismol. 21(6):1295–1322.

## Referencias web

**Earthquake Source Model Database** <http://equake-rc.info/srcmod/>

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. Tel: 5511036000 ext. 72019, [www.gob.mx/cenapred](http://www.gob.mx/cenapred)

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en <https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>  
Página 19 de 20





**SEGURIDAD**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CNPC**

COORDINACIÓN NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL



**CENAPRED**

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES

**Global CMT Web Page** <https://www.globalcmt.org/>  
**Servicio Sismológico Nacional** <http://www.ssn.unam.mx/>

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía  
Coyoacán, Ciudad de México. Tel: 5511036000 ext. 72019, [www.gob.mx/cenapred](http://www.gob.mx/cenapred)

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en  
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>  
Página 20 de 20

