



**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**Estudio de peligro por tsunami en la costa occidental de México.  
Evaluación del peligro por inundación en las ciudades de  
Acapulco, Puerto Vallarta y Puerto Escondido.**

Nina Danae Ramírez González

Diego Montealegre Zúñiga

Ángel Bautista Tadeo

Informe preparado para el CENAPRED

Dirección de Investigación  
**Subdirección de Riesgos por Inundación**





## CONTENIDO

1	Introducción.....	5
2	Objetivo.....	5
3	Ubicación y representación, de los sismos generadores de Tsunami en la Brecha Sísmica de Guerrero y la altura de ola máxima estimada .....	6
3.1	Mapas de altura de ola máxima para cuatro eventos sísmicos, generadores de tsunami en la Brecha de Guerrero .....	8
3.2	Elaboración del modelo hidráulico de la superficie libre del agua en el océano Pacífico 10	
3.3	Obtención y revisión de modelos digitales de elevaciones con fondo marino (batimetría), para el océano Pacífico mexicano.....	13
3.4	Elaboración y revisión de simulaciones hidrodinámicas del comportamiento de profundidad del mar ante un evento sísmico .....	14
4	Elaboración y revisión de simulaciones hidrodinámicas de comportamiento de inundación por tsunami en Acapulco, Guerrero y Puerto Vallarta, Jalisco.....	16
4.1	Elaboración y revisión de simulaciones hidrodinámicas del comportamiento de inundación por tsunami en Acapulco, Guerrero .....	17
4.1.1	Delimitación de la zona de análisis para la Bahía de Acapulco, Guerrero.....	17
4.1.2	Simulación de tsunami en Acapulco.....	19
4.2	Simulación de tsunami en Puerto Vallarta, Jalisco .....	21
4.2.1	Delimitación de la zona de análisis para Puerto Vallarta, Jalisco .....	22
4.2.2	Simulación de tsunami en Puerto Vallarta.....	23
4.3	Simulación de tsunami en Puerto Escondido, Oaxaca .....	25
4.3.1	Delimitación de la zona de análisis para la Puerto Escondido, Oaxaca .....	26
4.3.2	Simulación de tsunami en Puerto Escondido.....	27
5	Conclusiones.....	29
6	Recomendaciones .....	29
7	Referencias.....	30





## TABLA DE FIGURAS

**Figura 1 Epicentros de los escenarios propuestos para el análisis .....6**

**Figura 2 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia).....7**

**Figura 3 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Puerto Vallarta, Jalisco (Fuente: Elaboración propia) .....7**

**Figura 4 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Puerto Ángel utilizadas para el análisis de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia) .....7**

**Figura 5 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M8.6 (Fuente: Elaboración propia).....9**

**Figura 6 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M8.0 (Fuente: Elaboración propia).....9**

**Figura 7 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M7.5 (Fuente: Elaboración propia).....9**

**Figura 8 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M7.0 (Fuente: Elaboración propia).....10**

**Figura 9 Malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México (Fuente: Elaboración propia).....11**

**Figura 10 Visualización suavizada de la malla estructurada con elementos cuadrados de 2 000 m por lado y zonas definidas como condición de frontera (Fuente: Elaboración propia) .....11**

**Figura 11 Tamaños en la malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México (Fuente: Elaboración propia) .....12**

**Figura 12 Acercamiento a los diferentes tamaños de cálculo (Fuente: Elaboración propia) .....13**

**Figura 13 Cobertura del modelo digital de elevaciones del fondo marino GEBCO, para el océano Pacífico mexicano (Fuente: Elaboración propia).....13**

**Figura 14 Cobertura de la batimetría en el océano Pacífico que cubre el litoral de cuatro estados mexicanos.....14**

**Figura 15 Cobertura de la batimetría en el litoral de seis estados del litoral mexicano, y de elevaciones del fondo del océano Pacífico .....14**

**Figura 16 Profundidades del nivel el mar por efecto del evento sísmico M8.6, obtenidas por medio de simulación hidrodinámica (Fuente: Elaboración propia) .....15**

**Figura 17 Velocidades del flujo en el mar por efecto del evento sísmico M8.6, obtenidas por medio de simulación hidrodinámica (Fuente: Elaboración propia) .....16**

**Figura 18 Mapa de tsunamis mexicanos registrados en los últimos 285 años, periodo 1754 – 2017, CENAPRED 2019 .....17**

**Figura 19 Zona para el estudio de inundaciones debido a una ola de Tsunami en la bahía de Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia).....18**

**Figura 20 Modelo Digital de Elevaciones con resolución espacial de 5x5 m, para la ciudad de Acapulco y zona costera aledaña (Fuente: Elaboración propia).....19**

**Figura 21 Profundidades de inundación por tsunami asociado a un sismo M8.6, en Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia) .....19**

**Figura 22 Acercamiento a las profundidades por inundación en Acapulco Diamante**





(Fuente: Elaboración propia).....20

**Figura 23** Mapa de profundidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyuca (Fuente: Elaboración propia) .....20

**Figura 24** Mapa de velocidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyuca (Fuente: Elaboración propia) .....21

**Figura 25** Mapa de severidad para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyuca (Fuente: Elaboración propia) .....21

**Figura 26** Marco tectónico eventos sísmicos locales en la costa de Jalisco, Colima y sur de Nayarit (Fuente: Ramírez et al., 2016) .....22

**Figura 27** Modelo Digital de Elevaciones con resolución espacial de 5x5 m, para la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit.....23

**Figura 28** *Malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México* .....23

**Figura 29** Simulación de tsunami en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y área conurbada (Fuente: Elaboración propia).....24

**Figura 30** Mapa de profundidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia) .....24

**Figura 31** Mapa de velocidades para el escenario sísmico de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia) .....25

**Figura 32** Mapa de severidad para el escenario sísmico de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia) .....25

**Figura 33** Regionalización sísmica del estado de Oaxaca (Fuente: CFE, Protección Civil Oaxaca).....26

**Figura 34** *Mallado en Iber de la zona de estudio de Puerto Escondido, Oaxaca*.....27

**Figura 35** Variación considerada del nivel del mar para Puerto Escondido, Oaxaca .....27

**Figura 36** Mapa de profundidades para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia).....28

**Figura 37** Mapa de velocidades para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia).....28

**Figura 38** Mapa de severidad para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia).....28





## 1 INTRODUCCIÓN

Los tsunamis o maremotos, definidos de origen como un fenómeno natural geológico, debido a que son generados por la acción directa de los movimientos de la corteza terrestre, sismos o actividad volcánica en el suelo marino; pueden presentar grados de transgresión o penetración del mar en tierra que provoquen inundaciones, las cuales son importantes revisar para poder establecer las condiciones de peligro y riesgo que generan.

Es importante tener en cuenta que, estrictamente, se considera tsunami cualquier perturbación adicional en las variaciones constantes del nivel medio del mar por efecto de diversas actividades regulares como marea, oleaje o acciones humanas.

La mayor presencia de este tipo de fenómenos con influencia en litorales mexicanos se produce en el océano Pacífico, sin dejar de lado los pocos eventos de los que se tiene registro en el golfo de México. En el periodo de 1900 a 1986 (Ramírez, 1986) se han observado 247 tsunamis; nueve de éstos generaron daños en algunos puntos alrededor de toda la extensión del mar; 7 % se generaron cerca de México y América Central, mientras que 29 % en los alrededores de Japón. En 284 años de registros en la historia de los tsunamis locales ocurridos en México (Cruz, 2005) se conoce del arribo de más de 60 eventos con altura máxima de 10 m estimada a partir de las narratorias.

## 2 OBJETIVO

Caracterizar las inundaciones en zonas urbanas generadas por un tsunami derivado de algún sismo en la costa del océano Pacífico mexicano. Se omite la representación de las variables de inundación (profundidad, velocidad y severidad) en mapas de peligro debido a que el evento no está asociado a una probabilidad de ocurrencia. Por otra parte, la asociación de las proyecciones de altura de ola mediante simulación hidrodinámica, con respecto a una posibilidad numérica requiere de un catálogo de sismos que aún está siendo elaborado por especialistas en ingeniería sísmica.

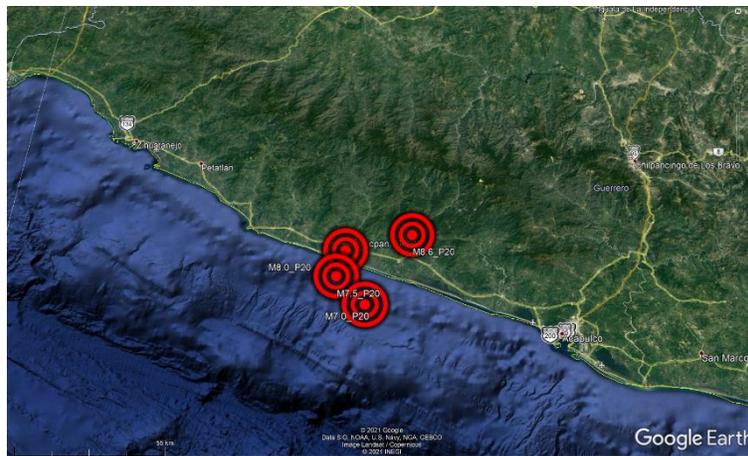
Las profundidades de inundación en las localidades de Acapulco en Guerrero, Puerto Vallarta en Jalisco y Puerto Escondido en Oaxaca se estimaron a partir de las elevaciones del nivel medio del mar, mediante modelos matemáticos realizados en el proyecto anual de trabajo *Análisis del peligro de inundación por tsunami en costas mexicanas*, de la Subdirección de Riesgos Sísmicos del CENAPRED en 2021. En dicho proyecto se generaron modelaciones estáticas para inundaciones en tierra según cuatro escenarios deterministas de sismos hipotéticos de magnitudes 7.0, 7.5, 8.0 y 8.6 con origen en la denominada brecha sísmica de Guerrero. El proyecto presente se enfocará en el escenario de mayor magnitud, ya que es el que cuenta con una elevación máxima de la perturbación de la superficie de nivel del mar, 15.089 m.



### 3 UBICACIÓN Y REPRESENTACIÓN, DE LOS SISMOS GENERADORES DE TSUNAMI EN LA BRECHA SÍSMICA DE GUERRERO Y LA ALTURA DE OLA MÁXIMA ESTIMADA

Se plantearon cuatro escenarios para sismos de magnitudes 7.0, 7.5, 8.0 y 8.6 con epicentros en la denominada, Brecha Sísmica de Guerrero (figura 1), de los cuales la información relevante respecto a la generación de tsunamis es:

- Alturas de ola
- Tiempos de arribo
- Ubicación de los indicadores
- Epicentros

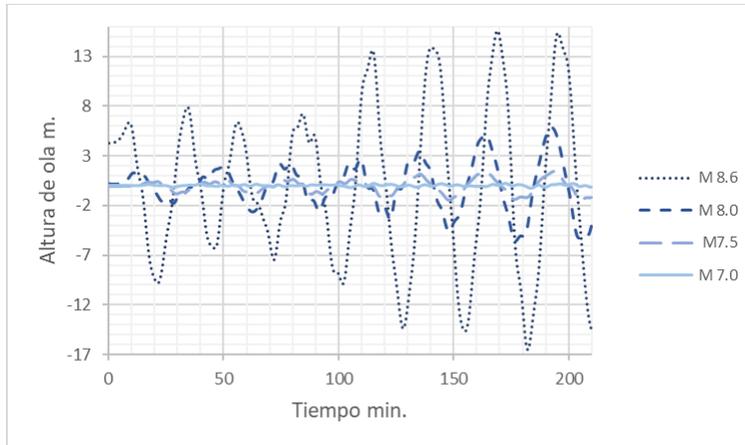


**Figura 1 Epicentros de los escenarios propuestos para el análisis**

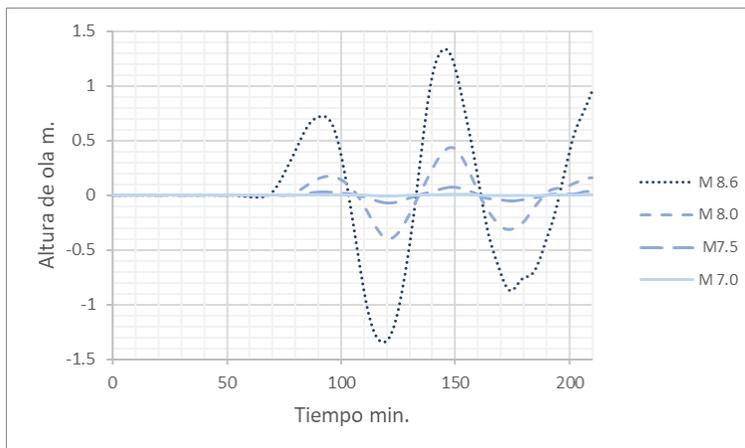
Para cada evento sísmico se estiman las perturbaciones de la superficie del nivel del mar o altura de ola, a partir de 29 puntos, por un periodo de tres horas y media con intervalos de medio minuto; según información de las simulaciones realizadas por la Subdirección de Riesgos Sísmicos (Ramírez, 2021).

Los tiempos de arribo de la variación de longitud y sus alturas de ola se muestran en las figuras 2, 3 y 4. En el caso de Puerto Escondido no se cuenta con una estimación puntual específica para ese sitio, por lo que se usaron los niveles de Puerto Ángel. Las gráficas ofrecen como principal impresión que las perturbaciones de la superficie del nivel del mar son muy similares para los sismos M7.0 y M7.5, aumentan para M8.0, y son superadas notablemente por el sismo M8.6. En el caso de Acapulco las variaciones se presentan de forma casi inmediata para los cuatro eventos sísmicos, y las variaciones máximas ocurren posterior a los 100 minutos (aproximadamente 1.7 horas) y con intervalos de apenas 10 minutos.

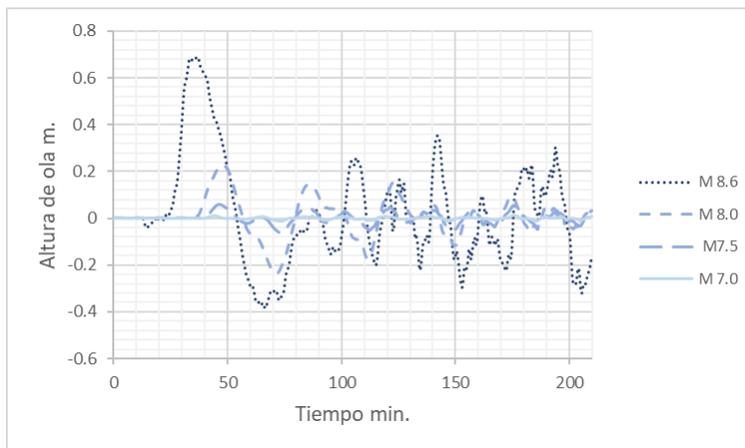




**Figura 2 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 3 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Puerto Vallarta, Jalisco (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 4 Variación de alturas de ola y sus tiempos de arribo a las costas de Puerto Ángel utilizadas para el análisis de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia)**





El mayor tiempo en que se presentaron variaciones ocurrió en Puerto Vallarta, con valores entre 60 y 80 minutos y con una altura máxima de 1.4 m. Como ya se mencionó, Puerto Escondido no tiene un punto específico de mediciones, por lo que se presenta el comportamiento de Puerto Ángel, Oaxaca, el cual se encuentra aproximadamente a 66 km al sureste, con tiempos de arribo y altura de ola menores a los presentados aunque de manera relativa similar.

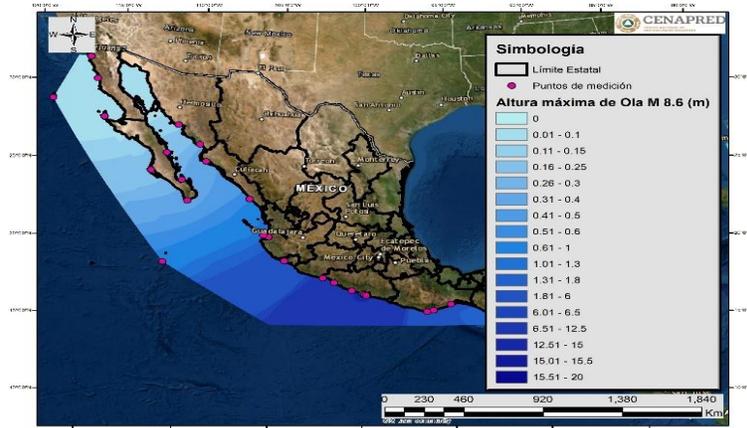
### **3.1 Mapas de altura de ola máxima para cuatro eventos sísmicos, generadores de tsunami en la Brecha de Guerrero**

Con la intención de corroborar la hipótesis de que el escenario que puede generar mayores afectaciones por un tsunami asociado con el sismo es el de M8.6, se realizó una interpolación de los niveles máximos de ola para cada punto mediante el método de interpolación de Kriging, lo cual permitió obtener una correlación espacial entre la distancia y ubicación de los puntos donde se cuenta con datos; éstos son ajustados a una función matemática dentro de un espacio específico delimitado de manera previa (el océano Pacífico mexicano), y se determinó el valor de salida para cada ubicación. Este método es el más adecuado cuando se sabe que hay una influencia espacial, o bien cuando la distancia correlaciona de manera espacial la variable representada. Dicha interpolación permite estimar o contar con una perspectiva la distribución de las alturas máximas del nivel del mar para un evento de tsunami, con la reserva de que no se toma en cuenta la influencia del suelo marino (batimetría o topografía debajo del mar), previamente a la elaboración del modelado y simulado numérico.

Dado que se observó una representación consistente de la superficie de la altura máxima de ola, obtenida mediante interpolación de las elevaciones estimadas puntualmente en relación con su ubicación, se elaboraron los mapas para los cuatro eventos de magnitudes 8.6, 8.0, 7.5 y 7.0 (figuras 5, 6, 7 y 8), para los cuales sus elevaciones máximas del mar fueron estimadas en 19.92, 6.66, 4.93 y 1.37 m, respectivamente.

La representación de la altura de ola para los cuatro eventos generadores de tsunami, se realizaron con la misma escala con el objetivo de que las magnitudes sean comparables a simple vista; aunque esto genera los inconvenientes de contar con muchos valores de escala y que no se observe el comportamiento de la distribución de olas en el evento de menor magnitud





**Figura 5 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M8.6 (Fuente: Elaboración propia)**

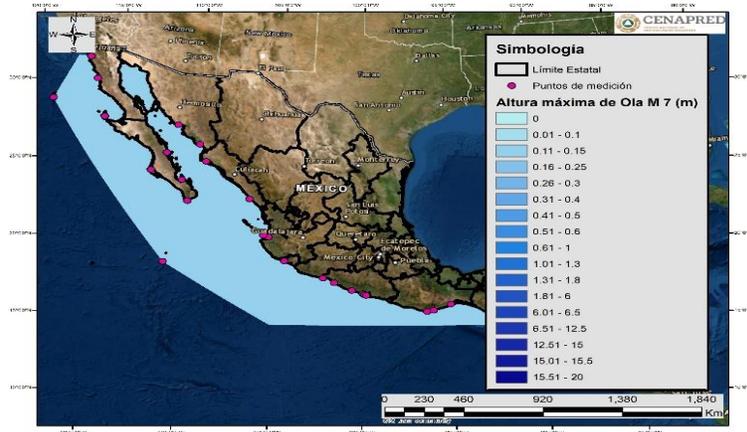


**Figura 6 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M8.0 (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 7 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M7.5 (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 8 Mapa de altura máxima de ola para el evento sísmico de M7.0 (Fuente: Elaboración propia)**

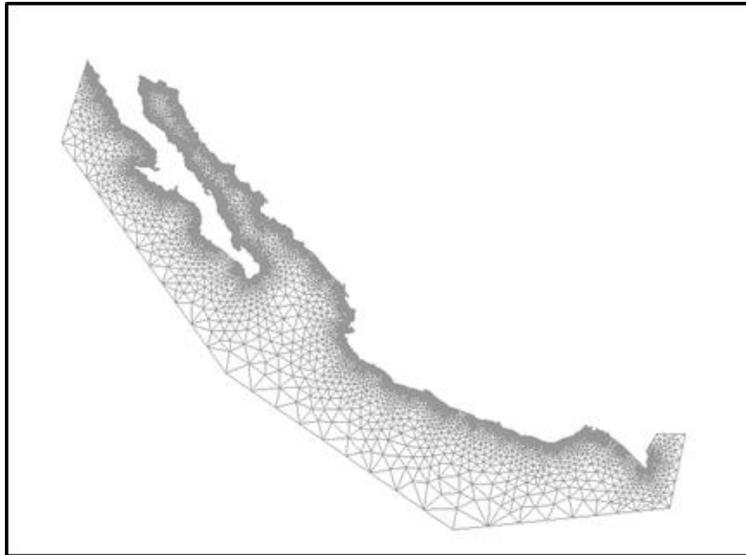
Lo anterior proporcionó una representación preliminar que permitió identificar escenarios y zonas críticas.

### **3.2 Elaboración del modelo hidráulico de la superficie libre del agua en el océano Pacífico**

A manera de complemento se desarrolló un modelo numérico hidrodinámico para revisar el comportamiento del tsunami en el Pacífico mexicano. Se probaron mallas, una estructurada y otra no estructurada para la representación del fondo marino, se limitó un área de 1 679 829 km<sup>2</sup>, en función de la influencia de los eventos sísmicos que se encuentran bajo análisis.

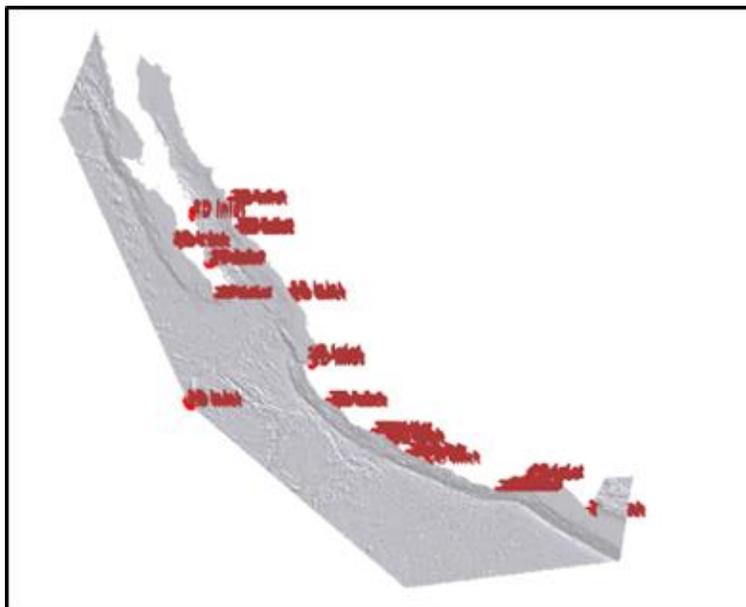
Con el sistema computacional Iber versión 2.4.2 se probó la caracterización de las mallas de cálculo. La primera es una malla no estructurada, la cual se adaptó de manera flexible al contorno del litoral mexicano; este tipo de elemento se aplicó a los polígonos con formas irregulares; se utilizaron tamaños de elemento aleatorios definidos por el programa a partir de los límites de cálculo establecidos por la influencia de los niveles de ola de los eventos estudiados y la línea de costa del Pacífico mexicano. En la figura 9 se muestra la cobertura de malla de elementos con tamaño aleatorio.





**Figura 9** Malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México (Fuente: Elaboración propia)

Se probó también una malla estructurada con elementos de cálculo cuadrados, que por lado cuentan con una longitud de 2 000 m (figura 10); tamaño que representa de manera adecuada las elevaciones del fondo marino, por lo que se establecieron las condiciones de frontera necesarias para el desarrollo de la simulación; aunque este tipo de malla presenta la desventaja de hacer el procedimiento de simulación matemática relativamente lento, debido a que el área y límites del modelo son de gran tamaño.



**Figura 10** Visualización suavizada de la malla estructurada con elementos cuadrados de 2 000 m por lado y zonas definidas como condición de frontera (Fuente: Elaboración propia)

Tomando en cuenta las implicaciones de las mallas descritas previamente, se consideró que la mejor opción para establecer un modelo de simulación con buena resolución y tiempo de cálculo era una superficie de cálculo combinada: una malla no estructurada compuesta por elementos triangulares con lados de dos diferentes longitudes.

La construcción del modelo hidrodinámico para la costa mexicana del océano Pacífico cuenta con un área de 1 679 829 km<sup>2</sup>; su superficie tiene elementos triangulares que se adaptan de manera flexible a los límites del espacio de cálculo. Se probaron distintos tamaños hasta encontrar los que mejor se adaptaban, procurando obtener el menor número posible a fin de hacer eficiente el proceso, y además no tan grandes para que no se perdiera detalle en la representación; los tamaños quedaron de 4 000 m en general, y sólo en el golfo de California de 2 000 m (figura 11).



**Figura 11 Tamaños en la malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México (Fuente: Elaboración propia)**

La figura 12 muestra un acercamiento a la península de Baja California, donde se puede observar la adaptación de la malla de cálculo a los límites de frontera y a la vez se ve el tamaño de los elementos triangulares.





**Figura 12 Acercamiento a los diferentes tamaños de cálculo (Fuente: Elaboración propia)**

### **3.3 Obtención y revisión de modelos digitales de elevaciones con fondo marino (batimetría), para el océano Pacífico mexicano**

Para evaluación y análisis de los tiempos de traslado y arribo de las alturas de ola a distintos puntos a lo largo de la línea costera mexicana en el océano Pacífico, se elaboraron modelos numéricos de simulación con el objetivo de visualizar la dinámica del fenómeno. Las representaciones elaboradas previamente fueron obtenidas por interpolación en sistemas de información geográfica (SIG), por lo que sólo permiten observar la altura máxima de ola provocada por el evento sísmico o tsunami, de una manera estática.

Fue necesario contar con modelos digitales de elevación del fondo marino; éstos se obtuvieron del sitio en internet de Mapa Batimétrico General de los Océanos (GEBCO, por sus siglas en inglés), en específico la versión global de 2018, debido a que cuenta con una corrección focal y una resolución de 0.00833 arc de grado, aproximadamente 927 m; la cual dada la escala de la superficie de los océanos se considera adecuada.

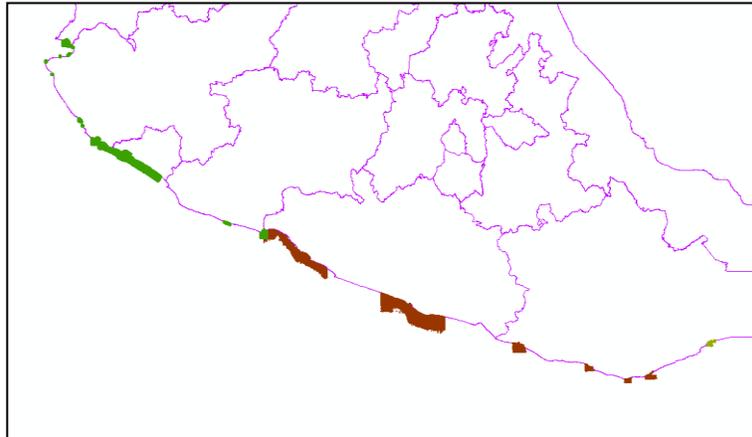
La figura 13 muestra la superficie del fondo marino del océano Pacífico mexicano.



**Figura 13 Cobertura del modelo digital de elevaciones del fondo marino GEBCO, para el océano Pacífico mexicano (Fuente: Elaboración propia)**

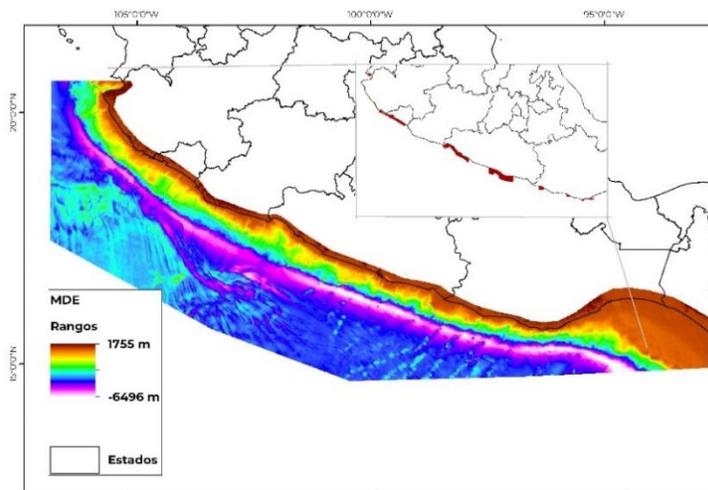


Adicionalmente se revisó información topobatimétrica proporcionada por la Secretaría de Marina, la cual ha sido generada en múltiples misiones de navíos y con datos adquiridos de forma remota por dicha institución. Se puede complementar y rectificar con reportes GEBCO. La figura 14 muestra la cobertura de dicha información, la cual deriva de un largo proceso de compilación y transformación en formatos tipo ráster.



**Figura 14 Cobertura de la batimetría en el océano Pacífico que cubre el litoral de cuatro estados mexicanos**

La figura 15 muestra la cobertura de información topobatimétrica en seis estados costeros: Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas (una porción).



**Figura 15 Cobertura de la batimetría en el litoral de seis estados del litoral mexicano, y de elevaciones del fondo del océano Pacífico**

### **3.4 Elaboración y revisión de simulaciones hidrodinámicas del comportamiento de profundidad del mar ante un evento sísmico**

Se realizó la simulación del comportamiento de las profundidades del mar, ante las perturbaciones generadas por un evento sísmico. Se decidió representar el movimiento



telúrico de M8.6, con origen en la brecha de Guerrero, dado que de los escenarios analizados es el de mayor magnitud y el que presentó mayores efectos en comparación con los otros de magnitudes 7, 7.5 y 8, en los cuales existen diferencias sustanciales en cuanto a altura de ola, como se observó en los mapas de alturas obtenidas mediante interpolación.

La figura 16 muestra el mapa obtenido de profundidades de agua en el mar. Es importante tener en cuenta que su magnitud incluye la batimetría normal (hasta el nivel medio del mar) y las sobreelevaciones obtenidas al modelar el evento M8.6. Se tiene un máximo de 40 163 m y se puede observar en cuales zonas del océano Pacífico se presentaron los mayores efectos.

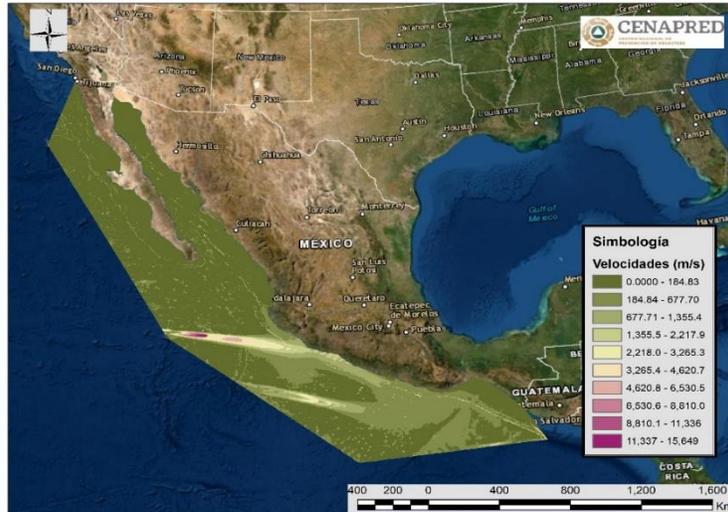


**Figura 16 Profundidades del nivel el mar por efecto del evento sísmico M8.6, obtenidas por medio de simulación hidrodinámica (Fuente: Elaboración propia)**

Las velocidades de flujo del maremoto simulado se pueden observar en la figura 17, en donde se alcanza a ver una zona en forma de pluma, que cuenta con velocidades mayores a 360 m/s, valor a partir del cual y hasta un máximo de 15 649 m/s corresponde a tsunamis (Ramírez, 1986).

Es importante tener presente que los valores estimados son de gran escala debido a la magnitud física del escenario que se desarrollan; así que los valores tan altos tanto de profundidad como de velocidad están condicionados por las dimensiones del mar, además de que los valores máximos de velocidad son puntuales y no se prolongan en el tiempo.





**Figura 17 Velocidades del flujo en el mar por efecto del evento sísmico M8.6, obtenidas por medio de simulación hidrodinámica (Fuente: Elaboración propia)**

La simulación del comportamiento hidrodinámico en el océano Pacífico permite conocer las alturas de ola cerca de las costas en sitios donde no se tiene medición, por lo que con estas estimaciones se pueden desarrollar modelos de simulación de inundación por tsunami en cualquier sitio del litoral del Pacífico.

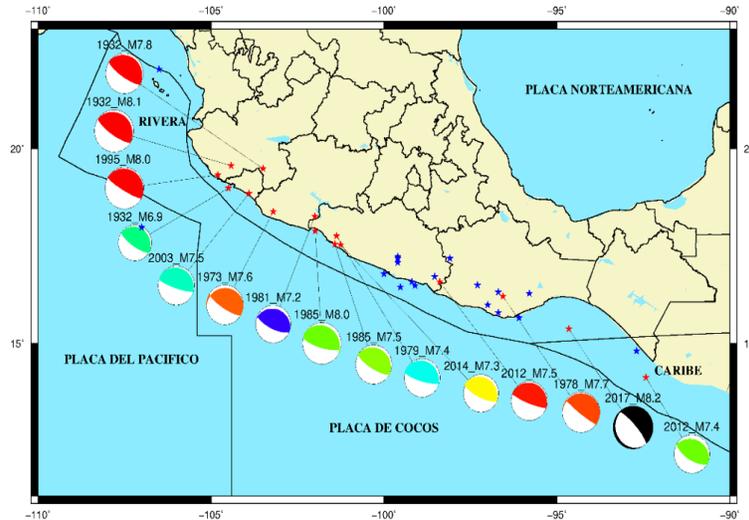
#### **4 ELABORACIÓN Y REVISIÓN DE SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS DE COMPORTAMIENTO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN ACAPULCO, GUERRERO Y PUERTO VALLARTA, JALISCO**

Como ya se mencionó, el evento más crítico en cuanto a generación de tsunamis es el sismo de M8.6 con epicentro en la brecha de Guerrero. Con éste se simuló el comportamiento de la penetración de agua a partir de la altura máxima de ola en Acapulco, Guerrero, en Puerto Vallarta, Jalisco y en Puerto Escondido, Oaxaca.

La selección de dichas ciudades se hizo por su importancia turística, ya que su alta confluencia de personas constituye zonas de alto riesgo; de modo que, si llegara a ocurrir un tsunami no sólo habría pérdidas económicas y ecológicas, sino posiblemente también muertes y todo tipo de lesiones a la población en el punto de incidencia del maremoto.

La figura 18 muestra la distribución de los tsunamis registrados en un periodo de 285 años. Esta imagen fue elaborada por la Subdirección de Riesgos Sísmicos del CENAPRED en 2019, a partir del Catálogo del Centro de Alertamiento de Tsunamis de la Secretaría de Marina.





**Figura 18 Mapa de tsunamis mexicanos registrados en los últimos 285 años, periodo 1754 – 2017, CENAPRED 2019**

#### **4.1 Elaboración y revisión de simulaciones hidrodinámicas del comportamiento de inundación por tsunami en Acapulco, Guerrero**

En el documento *Historia de los tsunamis locales ocurridos en México* (CAT- SEMAR, 2018) se cuenta con un registro de 26 eventos en la ciudad de Acapulco, los cuales tienen diversas formas de reporte de información y daños, y provienen de diferentes fuentes. Entre los más notables se encuentran: i) el de 25 de febrero de 1732 con una estimación de ola de entre 3 y 4 m; ii) el del 1 septiembre de 1754 con elevaciones de 4 a 5 m, iii) el del 4 mayo de 1826 en el que el mar se retiró de sus límites normales de 40 a 48 m; y iv) el del 12 de agosto de 1868 en el que el mar se retiró 40 varas (alrededor de 24 m).

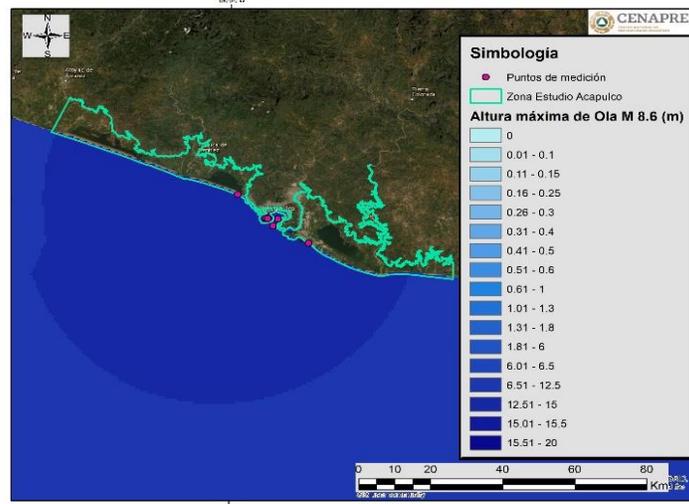
##### **4.1.1 Delimitación de la zona de análisis para la Bahía de Acapulco, Guerrero**

La delimitación de la zona de análisis por inundación provocada por la ola de un tsunami en la bahía de Acapulco se hizo a partir de la influencia de ola máxima, obtenida mediante interpolación de las elevaciones estimadas por el área de Riesgos Sísmicos y la cota 37.5 m.s.n.m.

Dicha cota se encuentra dentro del margen de 20 a 50 m recomendado para modelos de aguas someras con los que habitualmente se simula la hidrodinámica de una onda o pulso de agua provocado por tsunami; y además abarca los cuerpos de agua como ríos o lagunas que podrían tener influencia o cambiar sus condiciones de flujo natural ante un evento súbito como el sismo considerado.

La figura 19, muestra la zona establecida para el análisis en la bahía de Acapulco y la zona costera aledaña.





**Figura 19 Zona para el estudio de inundaciones debido a una ola de Tsunami en la bahía de Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia)**

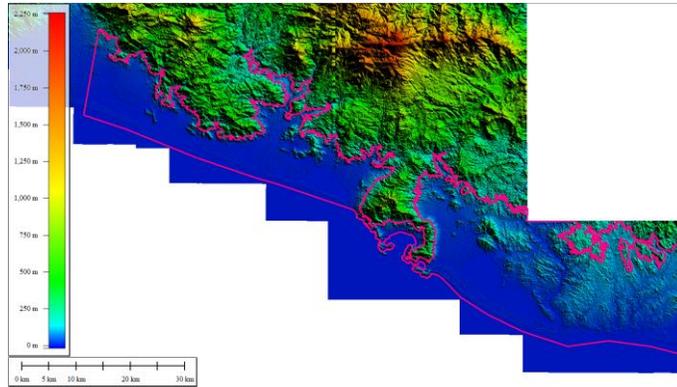
Es importante mencionar que las interpolaciones de los valores puntuales muestran una distribución adecuada, debido a la correlación de las alturas y su ubicación. Este método tiene la deficiencia de que disminuye las magnitudes de las alturas de ola, pero sirve para identificar las zonas de influencia. Los modelos geológicos disponibles corresponden a sismos originados en la Brecha de Guerrero, adecuados para el análisis de Acapulco y útiles para Puerto Vallarta y Puerto Escondido; aunque para un mejor estudio en estas dos últimas ciudades sería conveniente contar con modelos de sismos generadores de tsunami originados más cerca de ellas.

Posterior al acoplamiento de todas las secciones se delimitó el área de análisis con el enfoque de priorizar las zonas con mayor exposición; es decir, donde existe gran número de viviendas y densidad de población, dentro de la cobertura de una cuenca hidrográfica y que además se cuente con información del terreno.

Como parte de la elaboración del modelo de tsunami, se verificó la existencia de información topográfica, en formatos de Modelos Digitales de Elevación (MDE), disponibles para su descarga en el sitio oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En el caso de la Bahía de Acapulco, Guerrero, se descargaron y acoplaron 71 cartas (figura 20) a escala 1:10 000, con una cobertura de 2 790.5 km<sup>2</sup>, resolución horizontal de 5 m, y de tipo superficie; es decir, representan la superficie del suelo sin filtrado, tratamiento o eliminación de construcciones u algún otro tipo de objeto que sobresalga del terreno natural. Dichas cartas son generadas mediante sensores remotos satelitales y aerotransportados; con tres secciones de terreno delimitadas a 1:50 000 y una extensión de 3 087.9 km<sup>2</sup>, los elementos horizontales son de tamaño de 15 m x 15 m conseguidos mediante la digitalización de las cartas topográficas de la misma escala.

Para Acapulco, el enfoque consideró tanto la bahía como zonas costeras cercanas a ésta, debido a la gran cantidad de comunidades y topografía muy plana de este litoral.



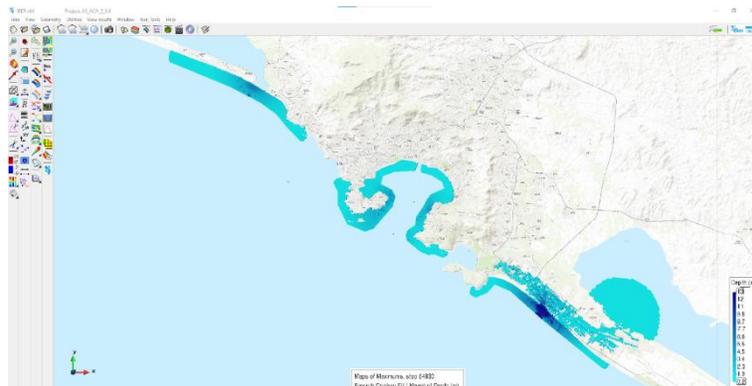


**Figura 20 Modelo Digital de Elevaciones con resolución espacial de 5x5 m, para la ciudad de Acapulco y zona costera aledaña (Fuente: Elaboración propia)**

#### 4.1.2 Simulación de tsunami en Acapulco

Para Acapulco se contó con ocho puntos que tienen valores de alteración del nivel medio del mar, a partir de los cuales se establecieron las condiciones de frontera para la simulación hidráulica. En las secciones de la línea litoral entre estos puntos se asignó la condición de flujo libre (descarga libre) para no provocar alteraciones directas entre las diversas alturas de ola ni forzar el modelo a interacciones de flujo irreales.

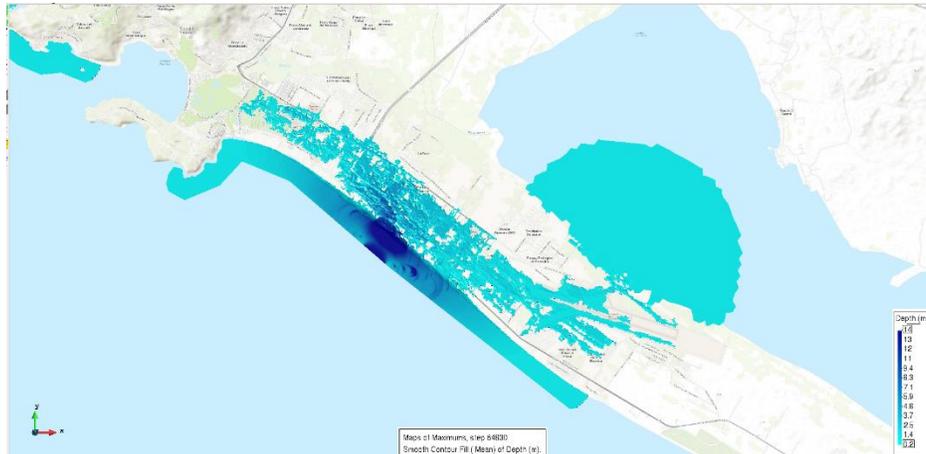
En la figura 21 se presentan las profundidades de inundación provocadas por el tsunami asociado al sismo M8.6. Se puede observar que únicamente hay penetración del mar en la zona de Acapulco Diamante, en el área de la barra de Coyuca y la bahía de Acapulco; sólo hay interacción de las sobreelevaciones del nivel del mar con la línea litoral.



**Figura 21 Profundidades de inundación por tsunami asociado a un sismo M8.6, en Acapulco, Guerrero (Fuente: Elaboración propia)**

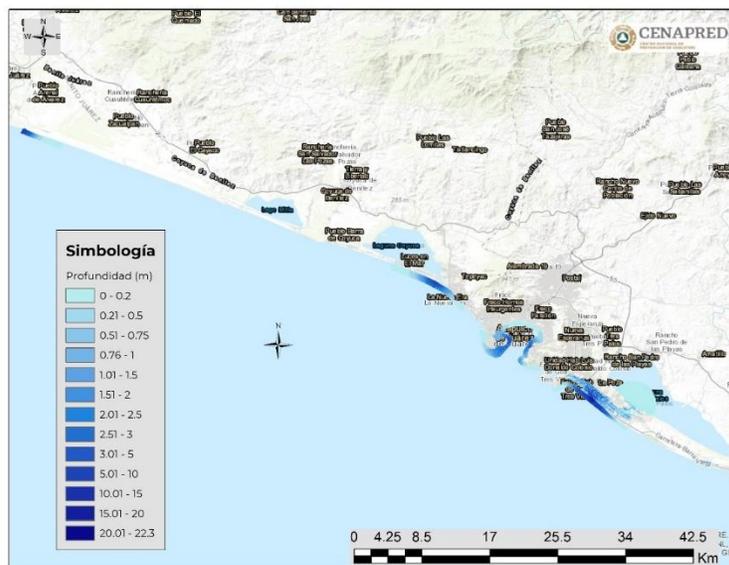
La figura 22 es un acercamiento a la zona Diamante de Acapulco, debido a una altura de ola máxima de 15 m se observan profundidades de inundación de 13 m en zonas de playa, y cerca de 1.1 m en las cercanías del aeropuerto. Es importante mencionar que la laguna de Tres Palos, en la parte posterior del mismo, podría: i) contribuir al aumento del nivel de las inundaciones si ésta se hallara previamente en niveles altos; o ii) ayudar a mitigarlo si contara con poca agua.





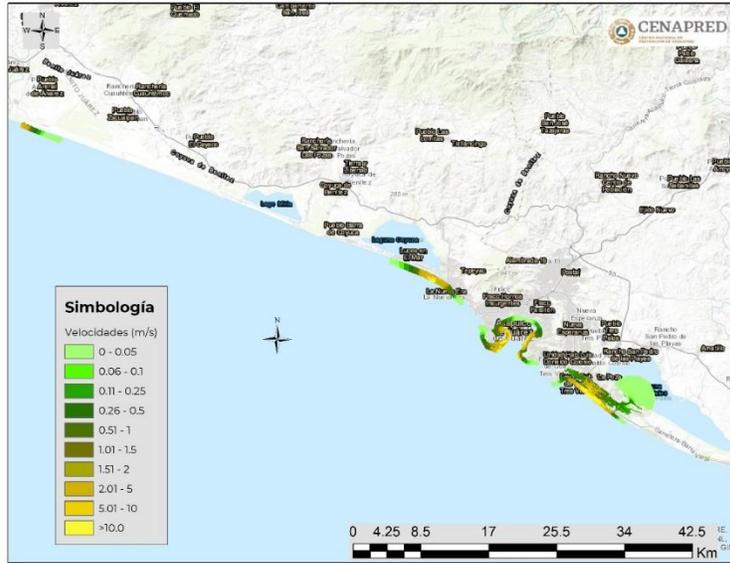
**Figura 22 Acercamiento a las profundidades por inundación en Acapulco Diamante (Fuente: Elaboración propia)**

Las figuras 23, 24 y 25 muestran los mapas de inundaciones (profundidad, velocidad, severidad) por tsunamis para Acapulco y zonas circundantes.



**Figura 23 Mapa de profundidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyacla (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 24** Mapa de velocidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyuca (Fuente: Elaboración propia)



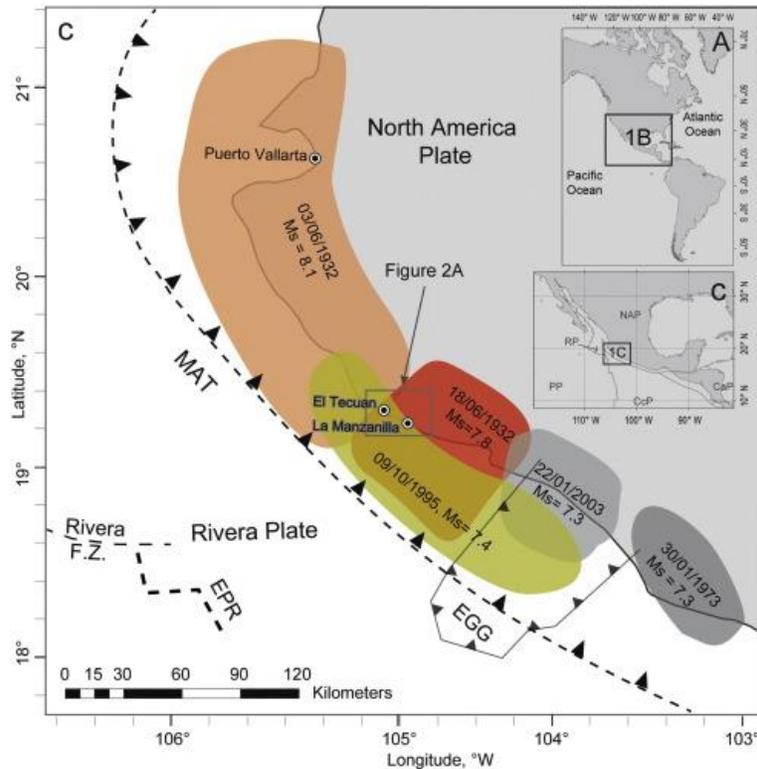
**Figura 25** Mapa de severidad para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en Acapulco, zona Diamante y barra de Coyuca (Fuente: Elaboración propia)

## 4.2 Simulación de tsunami en Puerto Vallarta, Jalisco

La actividad sísmica y principal fuente de tsunamis a lo largo de la costa del Pacífico están primordialmente relacionadas con la subducción de las placas de la Rivera y de Cocos por debajo de la placa Norteamericana (figura 26). Entre los tsunamis documentados que más han afectado a la costa de Jalisco se encuentran los que ocurrieron en 1932, dos por sismos de gran magnitud y uno de ellos probablemente por deslizamiento de los sedimentos del río Armería. El más reciente ocurrió e inundó la costa sur de Jalisco, el 9 de octubre de 1995, como consecuencia de un sismo (M8.0) con epicentro frente a bahía Tenacatita (Trejo, 2015), uno de los mejor documentados en la historia de México (Ortiz y Ortiz, 2021). Algunos



estudios basados en modelaciones numéricas estimaron alturas de ola de 0.8 m en las costas de Puerto Vallarta para este evento sísmico.



**Figura 26 Marco tectónico eventos sísmicos locales en la costa de Jalisco, Colima y sur de Nayarit (Fuente: Ramírez et al., 2016)**

El escenario sísmico de M8.6 generó una altura de ola de 1.33 m en la costa de Puerto Vallarta. En comparación con el evento ocurrido en octubre de 1995 se tiene una altura de ola superior a 0.5 m.

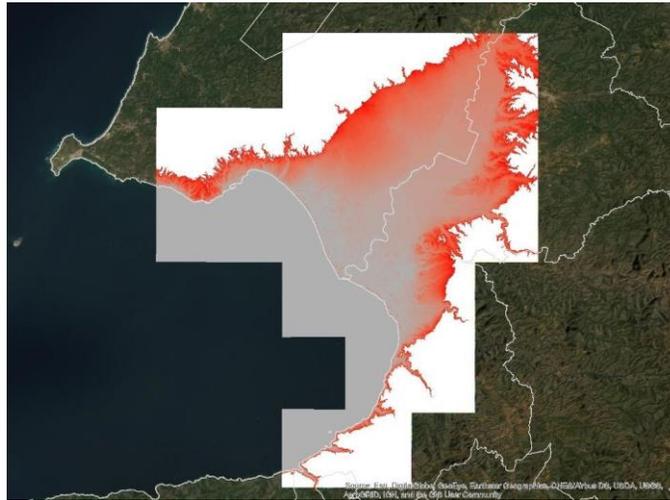
#### 4.2.1 Delimitación de la zona de análisis para Puerto Vallarta, Jalisco

Para evaluar los efectos del escenario sísmico y tsunami en la costa de Puerto Vallarta y su área conurbada se verificó la existencia y calidad de la información topográfica en formatos de Modelos Digitales de Elevación (MDE) en el sitio oficial del INEGI. Se descargaron y acoplaron 22 cartas de escala 1:10 000 con una cobertura de 918.8 km<sup>2</sup>, resolución horizontal de 5 m, y de tipo superficie; es decir, representan la superficie del suelo con las mismas características utilizadas para Acapulco.

De manera inicial, para delimitar el área de análisis se cubrió la costa de Puerto Vallarta, tanto la zona urbana como la que se ubica en la periferia, por lo que se incluyó información de Bahía de Balderas, Nayarit. Se consideró importante la descarga del río Ameca, así que el modelo digital de elevaciones cubre 30 km aguas arriba de su descarga al mar, ya que están expuestas a los efectos de un tsunami. La figura 27 muestra el MDE delimitado a una cota de 100 m sobre el nivel del mar, la cual es una elevación muy superior a la altura del tsunami



modelado; sin embargo, el contar con información agrupada podrá facilitar la elaboración de futuros estudios en esta zona.



**Figura 27 Modelo Digital de Elevaciones con resolución espacial de 5x5 m, para la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit**

#### 4.2.2 Simulación de tsunami en Puerto Vallarta

Se generó un modelo en Iber que abarca la zona topográficamente inundable, además se tomó como referencia el área que identificó la tesis doctoral *Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco* (Trejo, 2015), así como 10.5 km aguas arriba de la desembocadura del río Mascota. El modelo consiste en una malla no estructurada de 20 metros de tamaño en la zona urbana y cauce del río Mascota, 50 metros en zonas inundables de población dispersa y 100 metros de la línea de costa hacia mar adentro (figura 28).



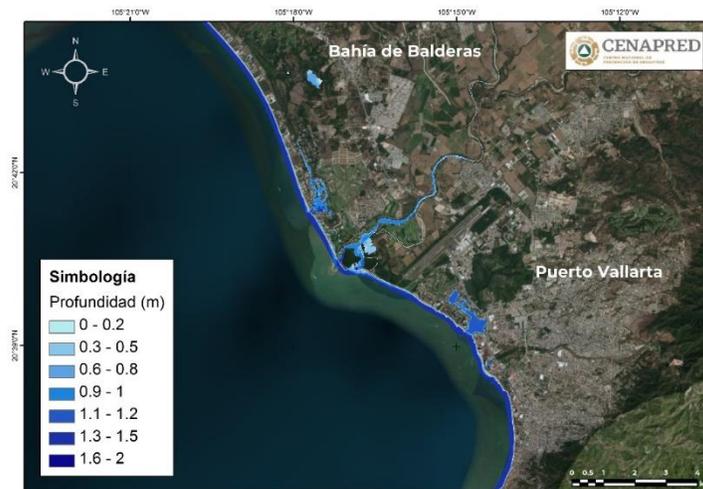
**Figura 28 Malla no estructurada para el espacio de cálculo del océano Pacífico en México**

De acuerdo con el mismo escenario se estiman alturas de ola máximas de 1.4 m en la costa de Puerto Vallarta. El comportamiento del tsunami se ingresó a un modelo hidráulico en Iber para determinar su ingreso en tierra (figura 29).



**Figura 29 Simulación de tsunami en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y área conurbada (Fuente: Elaboración propia)**

Cabe precisar que en este caso se consideró la variación de las alturas de ola a lo largo de toda la franja de costa, lo que es una sobreestimación de los efectos del tsunami, ya que los datos son puntuales; sin embargo, al tener una altura máxima relativamente pequeña, se considera que esta sobreestimación permite establecer condiciones extraordinarias y garantizar la seguridad ante inundaciones provocadas por un fenómeno de este tipo. Los resultados de la simulación se muestran en las figuras 30, 31 y 32, correspondientes a mapas de profundidades, velocidades y severidad.

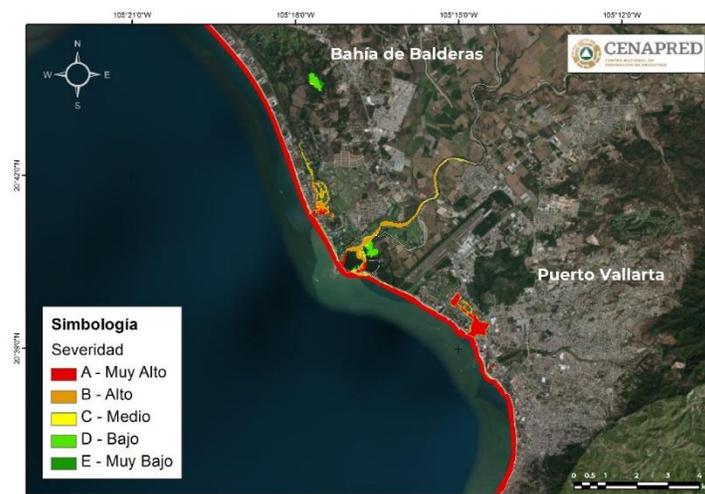


**Figura 30 Mapa de profundidades para el tsunami asociado al sismo de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 31** Mapa de velocidades para el escenario sísmico de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia)

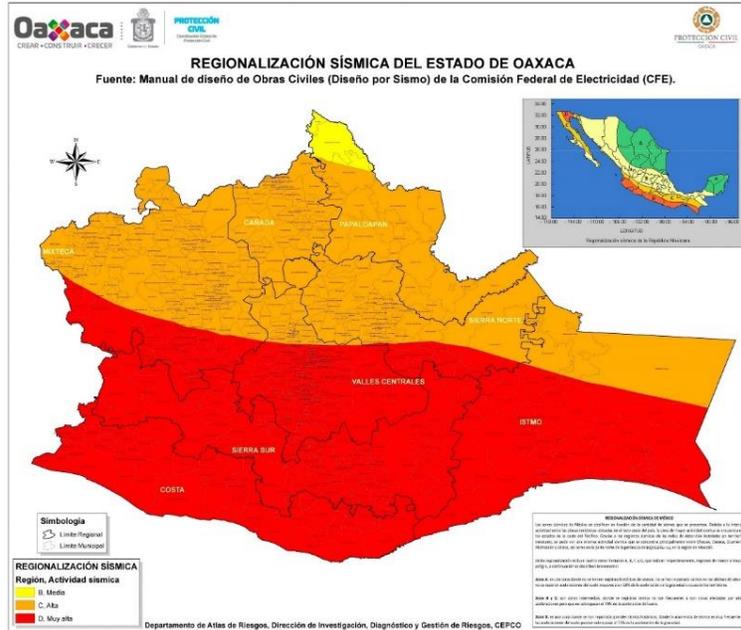


**Figura 32** Mapa de severidad para el escenario sísmico de M8.6 en la costa de Puerto Vallarta, Jalisco y Bahía de Balderas, Nayarit (Fuente: Elaboración propia)

### 4.3 Simulación de tsunami en Puerto Escondido, Oaxaca

Más del 50% del estado de Oaxaca está ubicado en la zona sísmica D (figura 33) o de muy alta intensidad, por lo que aumenta la posibilidad de presentar un tsunami local, ya que los sismos son la principal fuente generadora de tsunamis; aunado a que históricamente el estado ha presentado frecuentes sismos de gran intensidad, y que las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.





**Figura 33 Regionalización sísmica del estado de Oaxaca (Fuente: CFE, Protección Civil Oaxaca)**

De acuerdo con los registros históricos, se tiene conocimiento de un terremoto ocurrido el 28 de marzo de 1787, el cual generó un maremoto local muy destructivo que fue reportado por varios funcionarios de gobierno tanto de Guerrero como de Oaxaca, así como en documentos históricos y periódicos de la época; lo que permitió estimar el origen y la altura del tsunami. Las afectaciones ocurrieron mayormente entre la costa de Punta Maldonado Gro., y Salina Cruz, Oax., donde se estima que el tsunami alcanzó entre 5 y 8 metros de altura.

#### 4.3.1 Delimitación de la zona de análisis para la Puerto Escondido, Oaxaca

La ciudad de Puerto Escondido se localiza al sur del estado de Oaxaca, en el municipio de San Pedro Mixtepec Distrito 22, coordenadas 97°04'16.667" W y 15°51'45.006" N, con una población de 29 903 personas de acuerdo con datos del Censo 2020 del INEGI. Debido a que es una ciudad de gran relevancia, y uno de los lugares turísticos más importantes del estado y del país, se realizó la simulación hidráulica para esta ciudad y se tomó en cuenta una longitud de línea de costa de 17.22 kilómetros.

En la simulación hidráulica se utilizó el modelo hidrodinámico bidimensional Iber, para calcular las zonas de inundación. Como insumos de topografía se utilizó el modelo digital de elevaciones de tipo superficie del INEGI, del cual se acoplaron ocho cartas de escala 1:10 000 con una cobertura de 307.6 km<sup>2</sup>, la resolución horizontal es de 5 m; la malla es de 10 metros (figura 34) para la zona costera y urbanizada, y de 40 metros para la zona restante en la que predominan grandes lugares con vegetación.

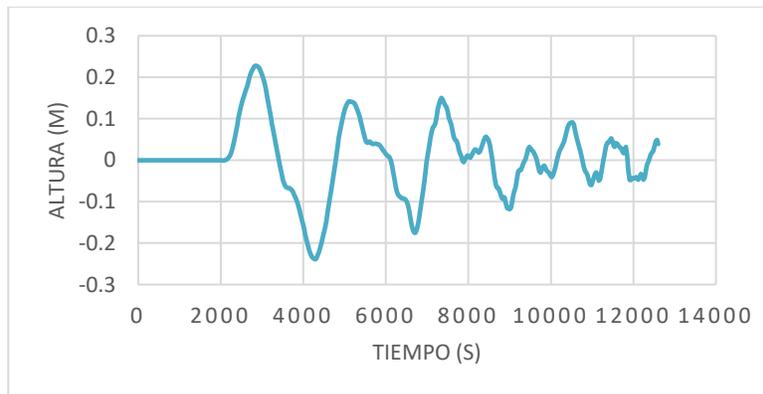




**Figura 34** Mallado en Iber de la zona de estudio de Puerto Escondido, Oaxaca

#### 4.3.2 Simulación de tsunami en Puerto Escondido

Al igual que en los dos casos previos se trabajó con el escenario sísmico de M8.6 y con datos obtenidos de la simulación numérica de la generación de tsunami, aunque, como no hay específicamente para Puerto Escondido, se utilizaron los de un punto próximo: la estación Puerto Ángel (figura 35).



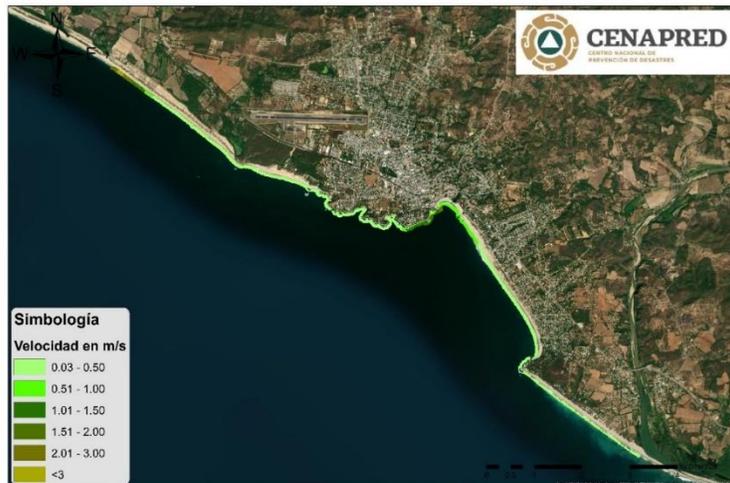
**Figura 35** Variación considerada del nivel del mar para Puerto Escondido, Oaxaca

El registro se utilizó como condición de entrada para nuestro modelo de simulación; sin embargo, para tener un factor de seguridad, este valor puntual se utilizó a lo largo de los 17.22 kilómetros de línea costera. Como resultado, se obtuvieron mapas de profundidades, velocidades y severidad para la ciudad en estudio (figuras 36, 37 y 38):

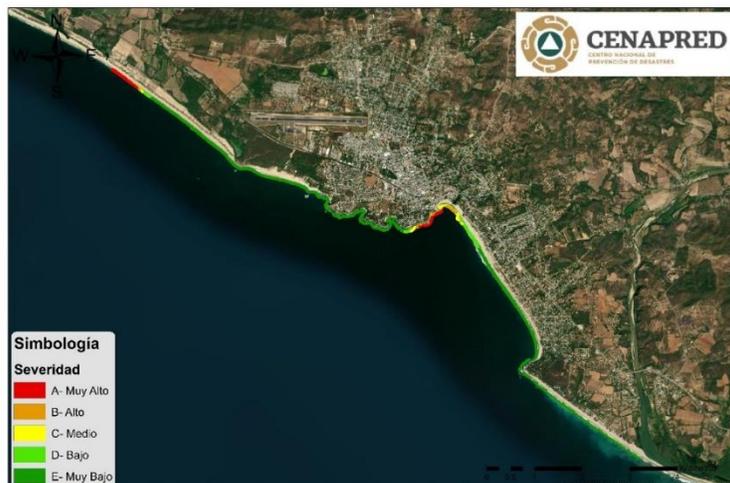




**Figura 36** Mapa de profundidades para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 37** Mapa de velocidades para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 38** Mapa de severidad para la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca (Fuente: Elaboración propia)





## 5 CONCLUSIONES

Se representaron las inundaciones o transgresiones del tsunami en las tres ciudades, considerando el comportamiento de las elevaciones de la ola en un periodo de tiempo representativo para cada sitio. Se observó que las condiciones topográficas de bahías, islas, cabos, rompeolas y sistemas de descarga de cauces con lagunas o estuarios ayudan a atenuar la magnitud de este tipo de eventos. Debido a esto, se considera que la combinación de condiciones extraordinarias en sus niveles de agua, así como el arrastre de sedimentos y materiales orgánicos puede provocar que los eventos de inundación se incrementen en localidades costeras ante un maremoto. Por ejemplo, si durante la ocurrencia del desbordamiento de un río se presentara a la vez un sismo de magnitud y características para generar sobre elevación del nivel de mar de gran magnitud, las zonas bajas, vados y cauces que en otro momento podrían regular la entrada del agua del mar, al encontrarse llenos amplificarían los efectos de las olas, y agravarían el impacto del evento tsunamigénico.

La combinación de los efectos del tsunami e inundaciones fluviales o pluviales no ha sido contemplada en los modelos hidrodinámicos, debido a la falta de información sobre su ocurrencia simultánea y a lo complicado de realizar un modelo probabilístico para su representación y análisis.

No se encuentra gran coincidencia entre los modelos desarrollados y el catálogo histórico de tsunamis. Esto puede ser debido a que los eventos registrados están asociados a eventos sísmicos con diferentes características, o a la subjetividad en la recopilación y relatoría de los mismos. Lo anterior sólo refuerza la necesidad de generar mayor cantidad de mapas por inundación derivados de maremotos asociados a diversos factores y en combinación con otros efectos que podrían incrementar el peligro y el riesgo, dado que al conocer el comportamiento de las inundaciones se pueden realizar acciones preventivas y tomar decisiones que conlleven la seguridad de la población y de sus bienes.

## 6 RECOMENDACIONES

En la medida de lo posible convendría asociar los eventos tsunamigénicos y probabilidades de ocurrencia. Con esto se podrán realizar los escenarios de peligro y riesgo por inundación y a su vez facilitar la combinación con otros eventos como avenidas extraordinarias de ríos o eventos de inundación de otro origen. El desarrollo de estos escenarios permitirá establecer medidas preventivas, tanto estructurales (ubicación óptima de escolleras, malecones o barreras contra tsunamis, torres de evacuación, y lagunas de regulación) como no estructurales (diseño de planes de evacuación con rutas y que indiquen abastecimiento de víveres, zonas seguras, refugios temporales, además de que contemplen los tiempos límite de actuación).

Ante la imposible tarea de predecir un sismo con epicentro, profundidad y energía tales que le confieran la capacidad de provocar un tsunami de magnitudes catastróficas, es necesario desarrollar un catálogo o compendio de escenarios sísmicos con diferentes características para los cuales se simulen las perturbaciones del nivel del mar y así conocer sus implicaciones como la generación de inundaciones, bajo el objetivo de mejorar el conocimiento de los efectos de los maremotos en el litoral mexicano.





## 7 REFERENCIAS

1. CAT-SEMAR, (2018). Historia de los tsunamis locales ocurridos en México, <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioPtoescondido.pdf>
2. CENAPRED, (2005). Series Fascículos, Tsunamis.
3. Global CMT Web Page <https://www.globalcmt.org/>
4. <https://www.oaxaca.gob.mx/proteccioncivil/cartografia/>
5. Ortiz, L. G. & M. Ortiz, (2021). Tsunamis en la costa occidental de México y en el mar de Cortés. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE. Ensenada, Baja California, México.
6. Ramírez E. (2021). Simulación numérica de tsunamis en costas mexicanas como herramienta para la prevención, mitigación y preparación, Proyecto Anual de Trabajo, Subdirección de Riesgos Sísmicos, CENAPRED.
7. Ramírez E. (2021). Análisis del peligro de inundación por tsunami en costas mexicanas, Proyecto Anual de Trabajo, Subdirección de Riesgos Sísmicos, CENAPRED.
8. Ramírez J. (1986), Tsunami. Revista Geográfica de Chile, Terra Australis, 29. 29-39.
9. Ramírez, M. T., Bógalo, M. F., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Corona, N., Machain, M. L., & Sosa, S. (2016). Historic and ancient tsunamis uncovered on the Jalisco-Colima Pacific coast, the Mexican subduction zone. *Geomorphology*, 259, 90-104.
10. Trejo, E. (2015). Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco. Tesis de doctorado. Universidad de Guadalajara.

