

## AVANCES EN LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN LAS COSTAS DE MANZANILLO

MIRIAM LIZZETH VÁZQUEZ CAAMAL,  
ERICKA ALINNE SOLANO  
Y CHRISTIAN M. APPENDINI

Los tsunamis representan una amenaza imponente que ha marcado la historia de la humanidad en repetidas ocasiones, devastando poblaciones en eventos como los de Sumatra, Indonesia en 2004 y Tohoku-Oki, Japón en 2011. Por definición, los tsunamis son series de ondas desencadenadas por perturbaciones repentinas del agua, generalmente causadas por sismos en el océano, deslizamientos de grandes volúmenes de sedimentos, impactos de meteoritos o erupciones volcánicas. Entre estas causas, los sismos en zonas de subducción de placas tectónicas son las fuentes tsunamigénicas más comunes, dado su potencial para provocar grandes levantamientos del piso oceánico. Así, el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región que abarca zonas de subducción y arcos volcánicos, es el epicentro de aproximadamente 78% de los tsunamis a nivel mundial, según la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration* [NOAA], 2023).

En el contexto mexicano, la costa centro y sur del Pacífico forma parte del Cinturón de Fuego, se caracteriza por una zona de subducción, resultado de la interacción de las placas Norteamericanas, Rivera y Cocos. Esta región, que incluye los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, es altamente vulnerable a los tsunamis. Los eventos históricos en Colima ejemplifican el impacto que pueden tener estos fenómenos. Por ejemplo, el 22 de junio de 1932 y el 9 de octubre de 1995, se registraron sismos de magnitud 8.0 y 8.5 respectivamente, ocasionando daños considerables en Cuyutlán y Manzanillo. A pesar de la existencia de medidas conocidas para enfrentar los sismos en estas zonas costeras, es crucial establecer zonas seguras mediante estudios a nivel municipal para garantizar una evacuación efectiva y segura para los habitantes.

Los sismos tsunamigénicos se originan cerca de las trincheras, lo que resulta en tsunamis locales altamente destructivos debido a la mínima pérdida de energía en su trayectoria hacia la costa y al escaso tiempo disponible para que la población tome medidas. Históricamente, los tsunamis generados cerca de la costa han causado graves estragos en las comunidades costeras de todo el mundo (Geist, 1998;

Tsushima *et al.*, 2011). Para hacer frente a esta amenaza, los estudios regionales sobre el peligro de inundaciones por tsunami se han vuelto fundamentales para orientar y desarrollar planes de contingencia destinados a mitigar los posibles impactos en las poblaciones costeras. Estos estudios incluyen la identificación de rutas de evacuación y áreas seguras, así como la planificación de la ubicación de servicios públicos y la construcción de estructuras de protección.

Entre las metodologías para evaluar el peligro de inundación, los análisis probabilísticos de peligro por tsunami (PTHA, por sus siglas en inglés) han surgido como una herramienta fundamental ampliamente utilizada a nivel mundial, debido a que permiten obtener las amplitudes de tsunami para periodos de retorno específicos (Miyashita *et al.*, 2020). Sin embargo, su aplicación conlleva la incertidumbre asociada a la identificación de la fuente que originará el tsunami. Aunque anteriormente, los estudios de peligro por tsunami se centraban en la utilización de catálogos de sismos históricos, en años recientes se han desarrollado herramientas que permiten obtener modelos de sismos hipotéticos (sintéticos). Estos modelos presentan desplazamientos no uniformes en la falla que origina el sismo (deslizamiento heterogéneo), lo que proporciona una representación más precisa de cómo se produce la ruptura durante los sismos. Además, estos modelos integran datos locales específicos de la zona de subducción de interés.

En México, la integración de PTHA a nivel regional es limitada y las evaluaciones locales disponibles para las poblaciones en riesgo son menos comunes. Esto subraya la necesidad de realizar estudios que integren la evaluación de inundaciones para las poblaciones costeras vulnerables. Ante esta necesidad, este artículo presenta avances para la localidad portuaria de Manzanillo, Colima, que cuenta con una población de más de 190,000 habitantes (INEGI, 2020), y que es de gran relevancia turística e industrial. En la región Jalisco-Michoacán, donde está Manzanillo, desde 1563 se han registrado al menos 18 sismos de subducción que generaron tsunamis locales. Estos eventos tuvieron impactos observables en las costas del estado de Colima, donde uno de ellos causó inundaciones hasta 8 km tierra adentro y cuatro de ellos tuvieron niveles de ascenso (*runup*) superiores a los 10 m.

La aplicación de análisis PTHA ofrece la ventaja de evaluar una amplia gama de casos sin depender únicamente de catálogos históricos, aumentando la robustez estadística. En este estudio analizamos 4,800 modelos de sismos sintéticos utilizando el modelo de *fakequakes* de MudPy (Melgar *et al.*, 2016), con magnitudes que van desde 7.0 hasta 8.5. Este rango se seleccionó considerando que los sismos de magnitud menor a 7.0 rara vez generan tsunamis significativos; el límite superior

de 8.5 corresponde a la magnitud del sismo más grande registrado en la región de estudio, que fue el sismo de Colima en 1818. La Figura 1 muestra ejemplos de los modelos de deslizamiento de sismos en la zona de subducción, con epicentros cercanos a la costa de Manzanillo. La escala de color indica el deslizamiento durante el sismo, mientras que la malla representa el modelo de la zona de subducción correspondiente a Slab2.0 (Hayes *et al.*, 2018).

El tsunami generado por los modelos sísmicos se calcula a partir de la deformación generada por los deslizamientos durante la ruptura de la litósfera. Esta deformación se transfiere al piso oceánico, por ende, a la superficie del océano. Posteriormente, la deformación inicial se restaura debido a la gravedad, lo que genera ondas concéntricas que se dispersan hasta llegar a las costas. En este trabajo, la transformación de los deslizamientos del modelo de ruptura sísmica a la deformación que inicia el tsunami es calculada con el modelo numérico de GeoClaw (LeVeque *et al.* 2011), el cual, resuelve las ecuaciones de aguas someras para calcular el tsunami resultante en la costa de interés. Para esto, es crucial disponer de datos detallados de batimetría, ya que las ondas experimentan procesos de asomeramiento, refracción e interacciones con la morfología y estructuras costeras, como puertos y bahías, que pueden resultar en una amplificación importante de la altura de ola debido tanto a la generación de ondas de borde como al entrampamiento y resonancia de ondas. En este trabajo usamos datos de batimetría a una resolución de 30 segundos de arco (~900 m) para la parte oceánica y de 30 m para evaluar el peligro a nivel municipal, así como la inundación a nivel de manzana.

Para evaluar las amplitudes de tsunami en la costa se colocaron cinco mareógrafos numéricos (Figura 2) sobre la isóbata de -10 m. A partir de estas mediciones, se extrajo la amplitud máxima por evento y se calculó la probabilidad de que un evento de la magnitud de cada sismo ocurriera en Manzanillo, utilizando información sísmica regional de la Ley de Gutenberg-Richter. Esto permitió obtener curvas de peligro para cada uno de los sensores, a partir de las cuales, se obtuvieron las amplitudes máximas para diferentes periodos de retorno. Por otro lado, para aproximar el valor obtenido en la línea de costa, se aplicó la Ley de Green para estimar los resultados a una profundidad de -1 m.

$$\eta_1 = \eta_2^4 \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}, \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $\eta_1$  y  $\eta_2$  es la sobreelevación del nivel del mar en dos puntos perpendiculares a la línea de costa, luego,  $h_1$  y  $h_2$  es la profundidad de la columna de agua en los mismos puntos.

Aunque el uso de una malla fina produce valores más precisos, calcular la inundación para cada caso incrementa el costo computacional y el espacio en memoria. Debido a esta limitación, realizamos mapas de inundación con el método de determinación de cotas de inundación y su proyección tierra adentro elegido por ser un referente estándar en el diseño de infraestructura en zonas costeras. Se observa que las áreas más afectadas son aquellas cercanas a los cuerpos de agua principales. Las zonas de mayor peligro incluyen las áreas adyacentes a las lagunas Valle de las Garzas y San Pedrito, ubicadas en la bahía principal de Manzanillo, donde se encuentra la zona portuaria. Además, se observó una inundación significativa en la costa y planicie adyacente a la laguna de Cuytlán. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este enfoque puede llevar a sobreestimar el área inundada al no considerar la fricción del terreno en el avance de las olas.

Para ilustrar las diferencias entre proyectar las cotas de inundación y realizar la modelación detallada, se realizó una simulación de inundación en GeoClaw con el modelo de sismo que generó amplitudes similares al caso mostrado en la Figura 3. Las diferencias entre los resultados de ambos métodos se muestran en la Figura 4, donde el área inundada, representada por la barra de color, es el resultado obtenido con GeoClaw, mientras que en el fondo se muestra como referencia el mismo caso de la Figura 3. Las mayores diferencias se presentan al interior de la laguna de Cuytlán, así como en las bahías de Santiago y Manzanillo, GeoClaw, lo que puede atribuirse a la interacción de las olas dentro de las bahías. Este tipo de interacciones no se pueden determinar mediante aproximaciones basadas en cotas de inundación.

Este trabajo muestra cómo puede usarse la metodología de PTHA utilizando sismos sintéticos y modelación hidrodinámica para caracterizar el peligro por tsunamis en la costa. Estos estudios son esenciales para realizar planes ante contingencias y garantizar la seguridad de las poblaciones costeras. Es esencial continuar avanzando en la investigación y la implementación de medidas preventivas en las comunidades vulnerables a lo largo de las costas del Pacífico, centro y sur mexicano. Sólo a través de una preparación preventiva que considere una amplia gama de escenarios y la colaboración estrecha con las autoridades de protección civil, podremos mitigar eficazmente los impactos devastadores de futuros eventos de tsunamis. De esta manera, no sólo protegeremos vidas humanas y la infraestructura, también, fortaleceremos la resiliencia de las comunidades costeras mexicanas ante los desafíos que la naturaleza nos presenta. |

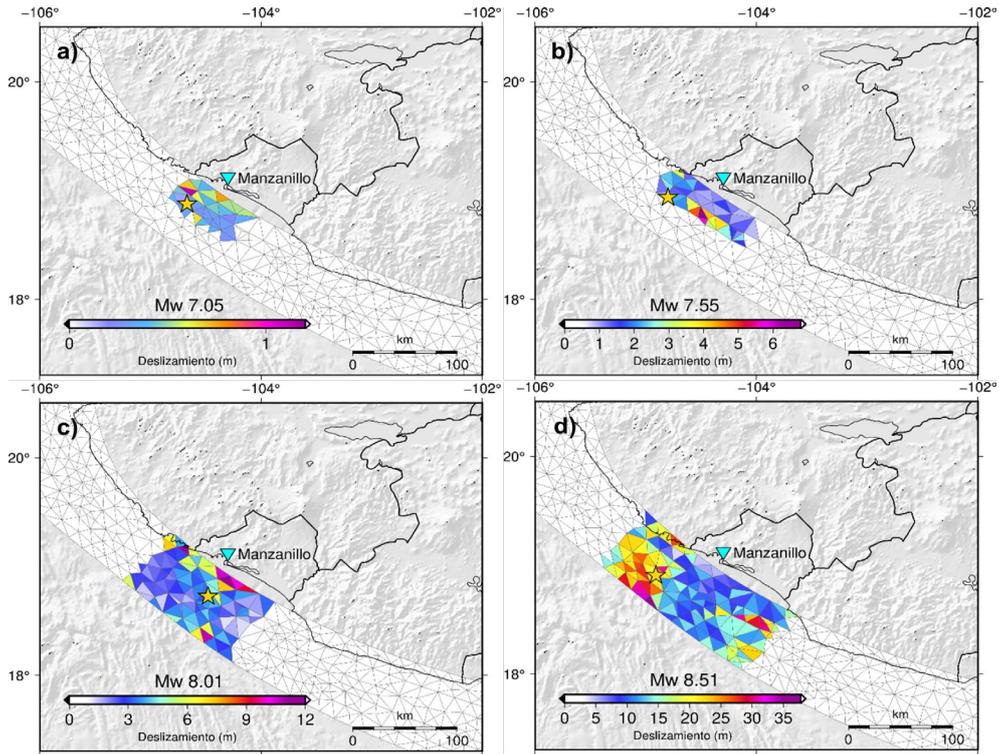


Figura 1. Ejemplos de modelos sísmicos sintéticos con magnitudes a) 7.05, b) 7.55, c) 8.01 y d) 8.51. La estrella indica el hipocentro desde donde se origina el sismo y el triángulo celeste la posición de Manzanillo



Figura 2. Ubicación de los mareógrafos empleados en las simulaciones numéricas



Figura 3. Mapa de inundación para el periodo de retorno de 100 años. Se muestra la inundación usando el valor de sensor ubicado sobre la cota de -10 m y la aproximación del *runup*

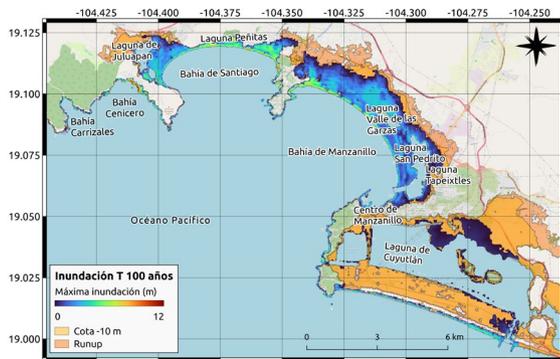


Figura 4. Máxima inundación evaluada con GeoClaw para un caso similar al periodo de retorno de 100 años. Como referencia se muestra la inundación calculada al proyectar la cota de inundación para el mismo periodo de retorno

## Referencias

- Geist, E. L. (1998). Local tsunamis and earthquake source parameters. *Advances in Geophysics*, 39, 1.
- 17-209. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60276-9.
- Hayes, G. P.; Moore, G. L.; Portner, D. E.; Hearne, M.; Flamme, H.; Furtney, M. y Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61. DOI: 10.1126/science.aat4723.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Presentación de resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda. Colima. (2021). [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020\\_pres\\_res\\_col.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_col.pdf).
- LeVeque, R. J.; George, D. L. y Berger M. J. (2011). Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods. *Acta Numerica*, 20, 211-289. DOI: 10.1017/s0962492911000043.
- Melgar, D.; LeVeque, R. J.; Dreger, D. S. y Allen, R. M. (2016). Kinematic rupture scenarios and synthetic displacement data: An example application to the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6658-6674.
- Miyashita, T.; Mori, N. y Goda, K. (2020). Uncertainty of probabilistic tsunami hazard assessment of Zihuatanejo (Mexico) due to the representation of tsunami variability. *Coastal Engineering Journal*, 62(3), 413-428.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. *Tsunami locations*. Consultado el 10 de abril de 2023. <https://www.noaa.gov/jets-tream/tsunamis/tsunami-locations>.
- Tsushima, H.; Hirata, K.; Hayashi, Y.; Tanioka, Y.; Kimura, K.; Sakai, S. I. y Maeda, K. (2011). Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, planets and space*, 63, 821-826.