

Ing. Sánchez-Escobar, Ronald Efrén¹; MSc Aranzales-Sánchez, María Paula¹; Geólogo Ferrer-Peláez Juan¹; Ph.D Velasco-Reyes, Erick R².

¹ Centro de Investigaciones Oceanográficas del Pacífico (CCCP), Dirección General Marítima, Colombia.

² School of Civil and Construction Engineering, College of Engineering, Oregon State University

RESUMEN

La costa Pacífica colombiana (CPC) es altamente vulnerable a tsunamis, evidencia los eventos de 1906 (Mw 8.5) y 1979 (Mw 8.3). Aunque el Sistema de Pronóstico, Evaluación y Generación de Alertas de Tsunami (EVIDA) aborda escenarios de campo cercano, la evaluación de eventos lejanos y regionales que permita a las autoridades del Sistema Nacional de Detección y Alerta de Tsunami (SNDAT) activar protocolos de respuesta según el nivel de amenaza sigue siendo una necesidad operativa crítica. Presentamos un esquema de acoplamiento entre GeoClaw y SFINCS que resuelve la propagación transoceánica y la inundación costera en un flujo de trabajo unificado, modulo que permitir fortalecer el Sistema EVIDA. Los resultados demuestran que el acoplamiento GeoClaw-SFINCS puede completar simulaciones bidimensionales de inundación para las 11 poblaciones en menos de hora y media, un margen temporal significativamente inferior al tiempo de tránsito transoceánico para eventos lejanos con tiempos de arribo superiores a 8 horas.

INTRODUCCIÓN

La costa Pacífica colombiana (CPC) enfrenta amenazas de tsunamis lejanos y regionales que el Sistema Nacional de Detección y Alerta de Tsunami (SNDAT) aún no evalúa operativamente. Presentamos el **acoplamiento numérico GeoClaw-SFINCS**: GeoClaw resuelve la propagación transoceánica mediante refinamiento de malla adaptativa (AMR), y SFINCS simula la inundación costera con alta resolución y eficiencia computacional. El **acoplamiento completa simulaciones 2D de inundación para 11 poblaciones en menos de 1.5 horas**, muy por debajo del tiempo de tránsito de eventos lejanos (>18 h), lo que lo hace operativamente viable para alertas tempranas y evaluación de escenarios ante 25 zonas de subducción del Pacífico.

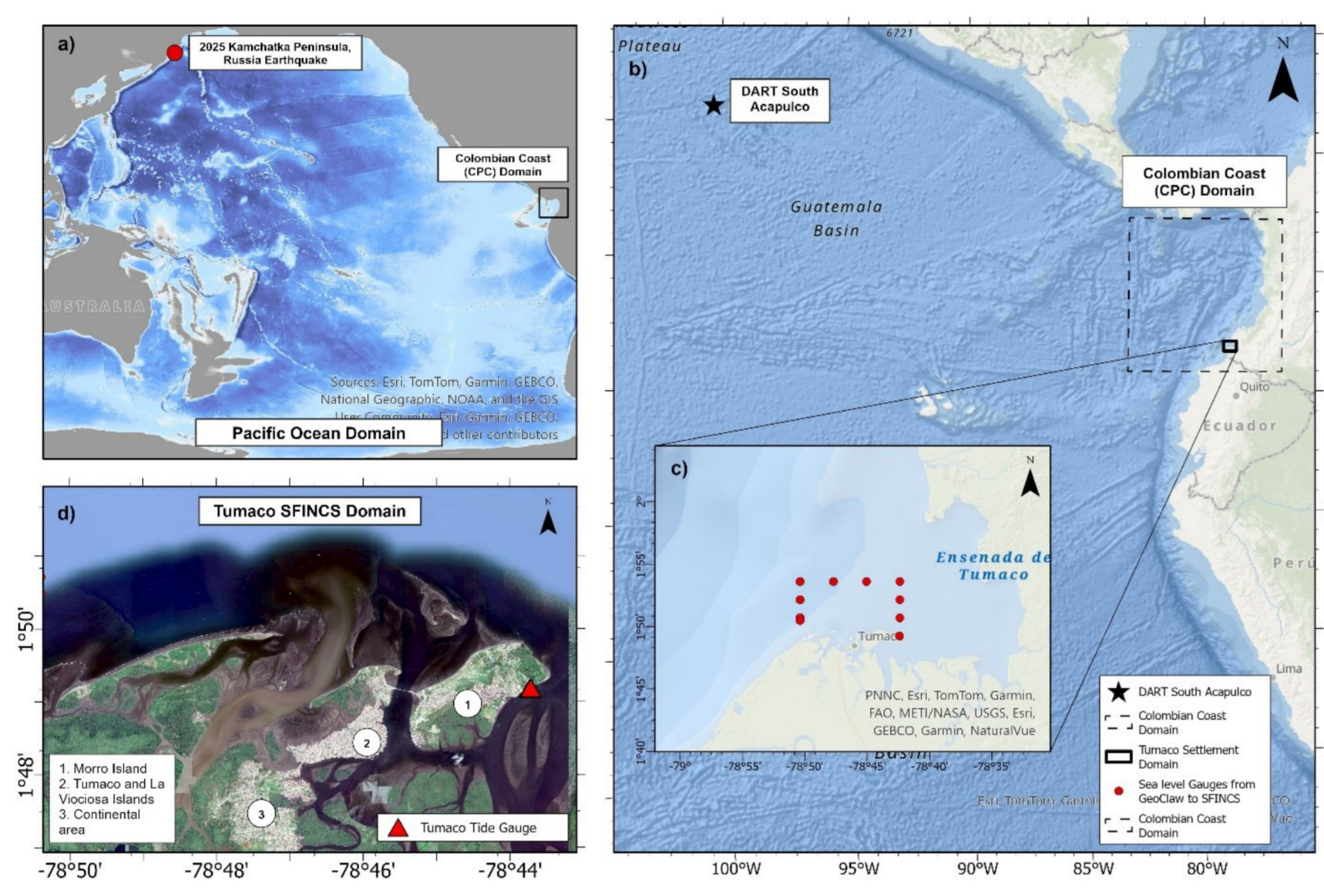


Figura 1. Zona de estudio. a) Dominio del Océano Pacífico para la propagación de tsunamis de campo lejano, en círculo rojo se ubica el epicentro del sismo de Kamchatka del 29 de julio de 2025. b) Dominio de refinamiento de la Costa Pacífica Colombiana; ubicación de la DART South Acapulco empleada para la validación de GeoClaw c) Población de Tumaco empleada para la validación del acople GeoClaw-SFINCS; los círculos rojos corresponden a los Gauges que registran las variaciones del nivel del mar (de 0 a 21 horas) en el modelo de GeoClaw y son los forzantes para la propagación en SFINCS. d) Dominio SFINCS de la población de Tumaco y ubicación del mareógrafo empleado para la validación.

Tiempo de computo GeoClaw: 1 ½ h – openmp con 14 hilos
Tiempo de computo SFINCS: 1 minute
Hardware: Intel (R) Core(TM) Ultra 7 155H, 16 cores, 3.80 GHz, 22 Procesadores Lógicos

MATERIALES Y MÉTODOS

GeoClaw simula la propagación del tsunami desde la fuente hasta la costa de la CPC, obteniendo series temporales de nivel del mar en múltiples puntos a lo largo del límite costero de 11 poblaciones (norte-sur del litoral). Estas series se utilizan como condiciones de contorno en SFINCS, reproduciendo con mayor detalle la propagación en aguas someras y la inundación costera en cada localidad.

Para validar el funcionamiento del acople y el desempeño de cada modelo, se utilizó la fuente NOAA-NCTR del evento de Kamchatka 2025, basada en la inversión SIFT de Yong Wei (Wei, en Ruiz & Melgar, 2025). La validación de GeoClaw se realizó con registros de la boya DART 43413 South Acapulco (aguas profundas) y la de SFINCS con el mareógrafo de Tumaco, Colombia (aguas someras); en ambos casos se aplicaron filtros para extraer la señal de marea y eliminar variaciones de alta frecuencia.

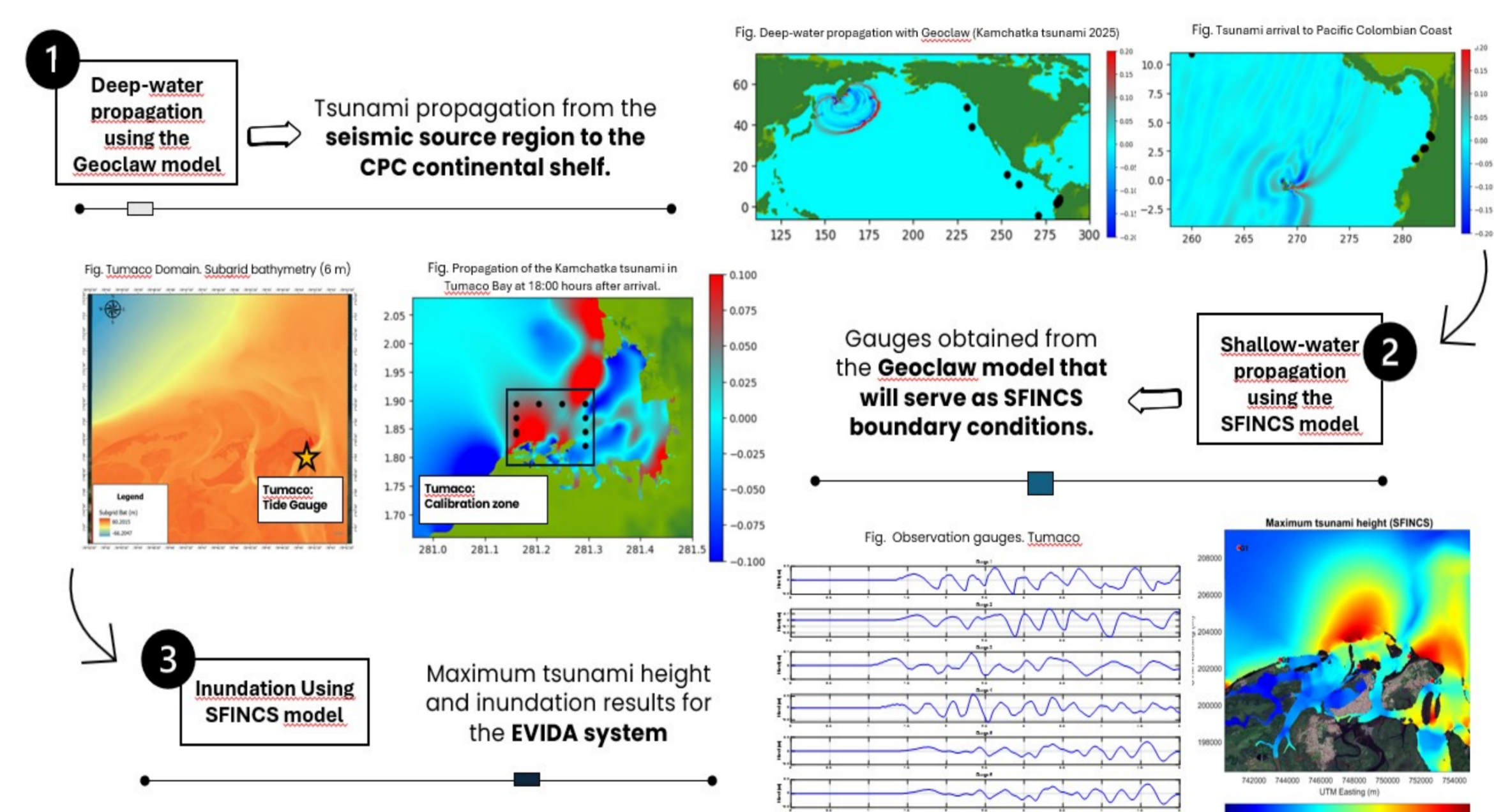


Figura 2. Metodo Acoplamiento GeoClaw y SFINCS

OBJETIVOS

- I. Desarrollar una herramienta robusta para avanzar en la comprensión de la amenaza por tsunamis lejanos en la **Costa Pacífica Colombiana**.
- II. Fortalecer el Sistema Nacional de Alerta con la generación de pronósticos rápidos y alertas tempranas.
- III. Reducción del riesgo en las **Comunidades Costeras**.

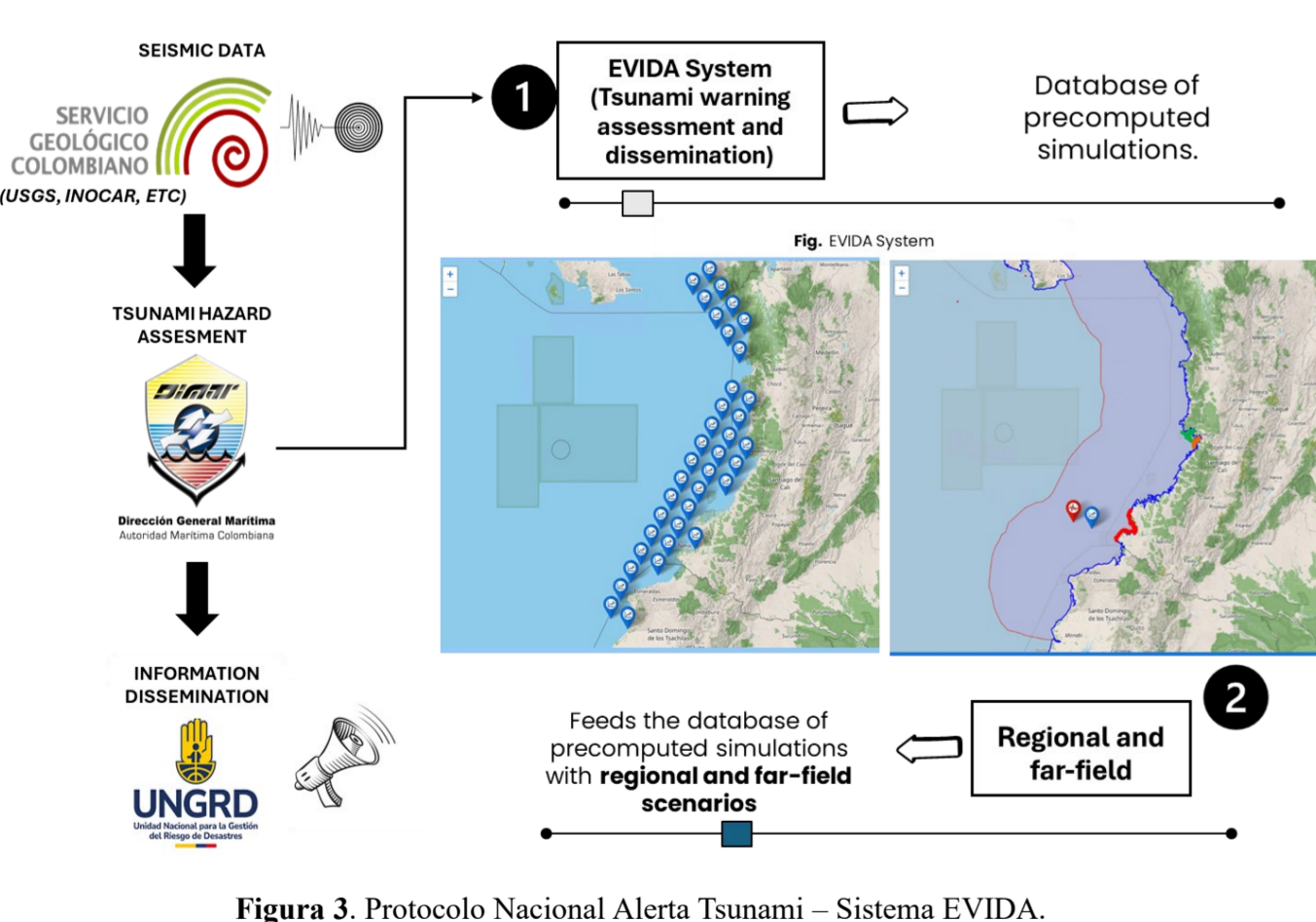


Figura 3. Protocolo Nacional Alerta Tsunami – Sistema EVIDA.

RESULTADOS

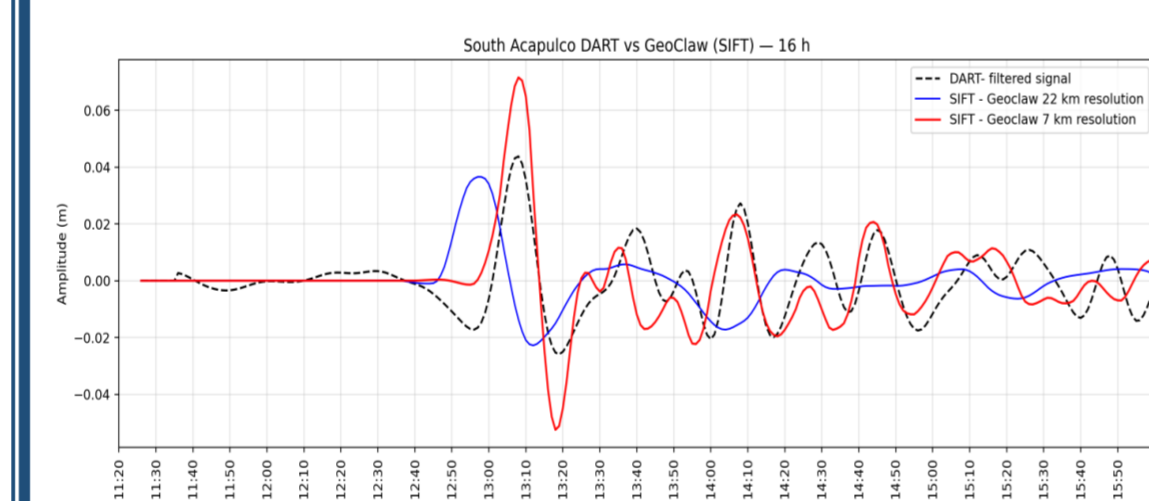


Figura 4. Series de tiempo de la DART South Acapulco de la señal observada (negra punteada) y la señal del modelo con la fuente SIFT para una resolución de 22 km (línea azul) y de 7 km (línea roja) en océano abierto.

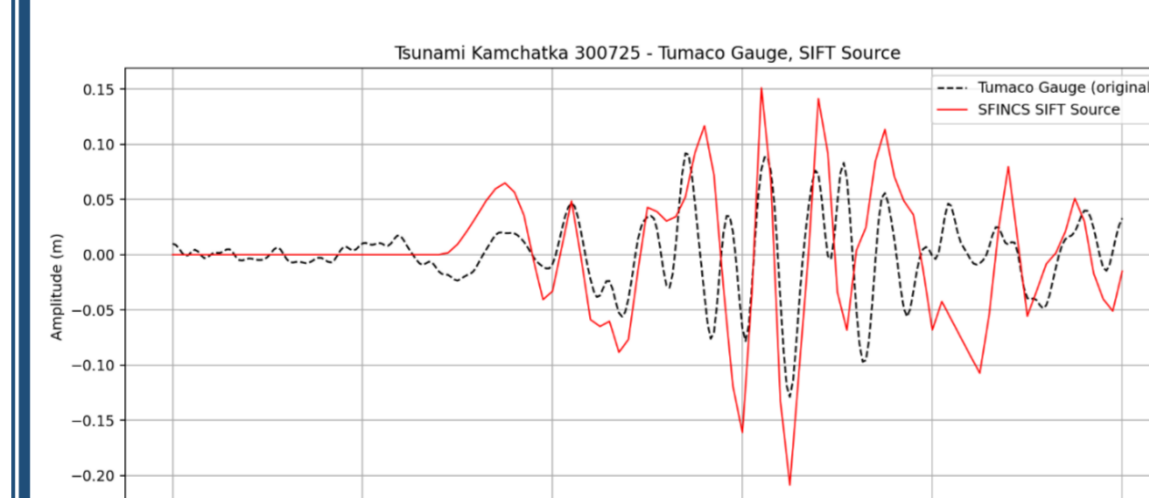


Figura 5. Series de tiempo del Mareógrafo de Tumaco de la señal observada (negra punteada) y la señal del modelo con la fuente SIFT.

Tipo Métrica	Métrica	Valores estadística modelo de 16 a 21 horas	
		Modelo con Fuente SIFT	Modelo de 16 a 21 horas
Correlación y Coherencia Temporal	Pearson r	0.445	0.445
Error	RMSE (m)	0.0505	0.0505
Rendimiento	Willmott Index	0.6452	0.6452

Tipo Métrica	Métrica	Valores estadística modelo de 0 a 16 horas	
		Modelo SIFT – Océano Abierto 22 km resolución	Modelo SIFT – Océano Abierto 7 km resolución
Correlación y Coherencia Temporal	Pearson r	-0.212	0.753
Error	RMSE (m)	0.0175	0.0113
Rendimiento	Willmott Index	0.2584	0.8437

Durante las primeras 3-4 horas tras la llegada del tsunami a la boya DART, las simulaciones reproducen consistentemente la fase, la secuencia temporal de oscilaciones y las amplitudes relativas del ciclo dominante, especialmente las olas de mayor energía.

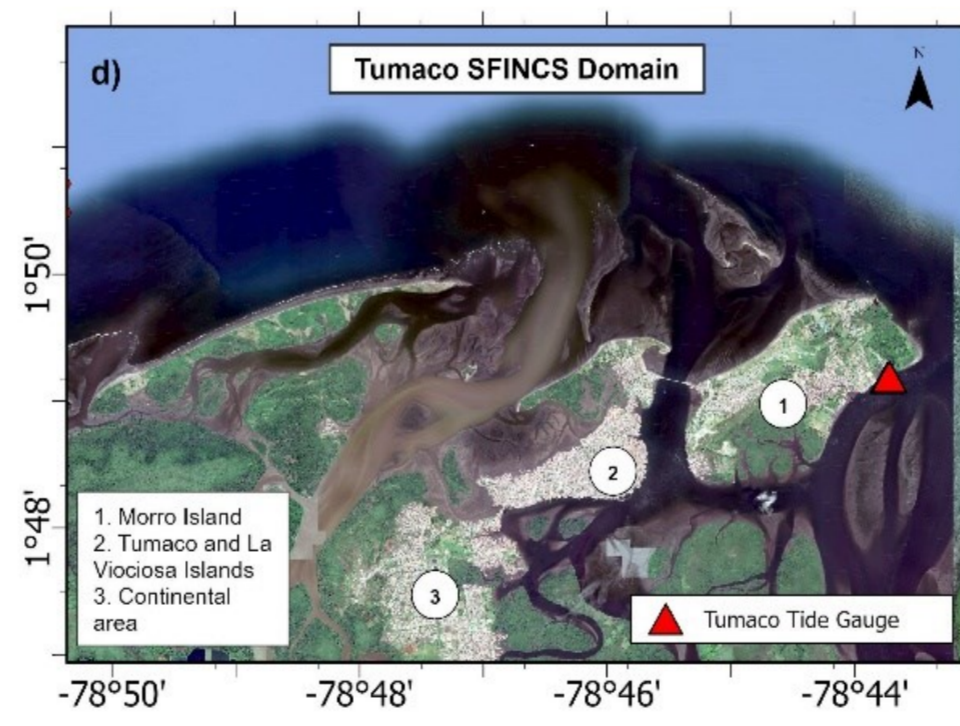


Figura 6. Dominio SFINCS de la población de Tumaco y ubicación del mareógrafo empleado para la validación.

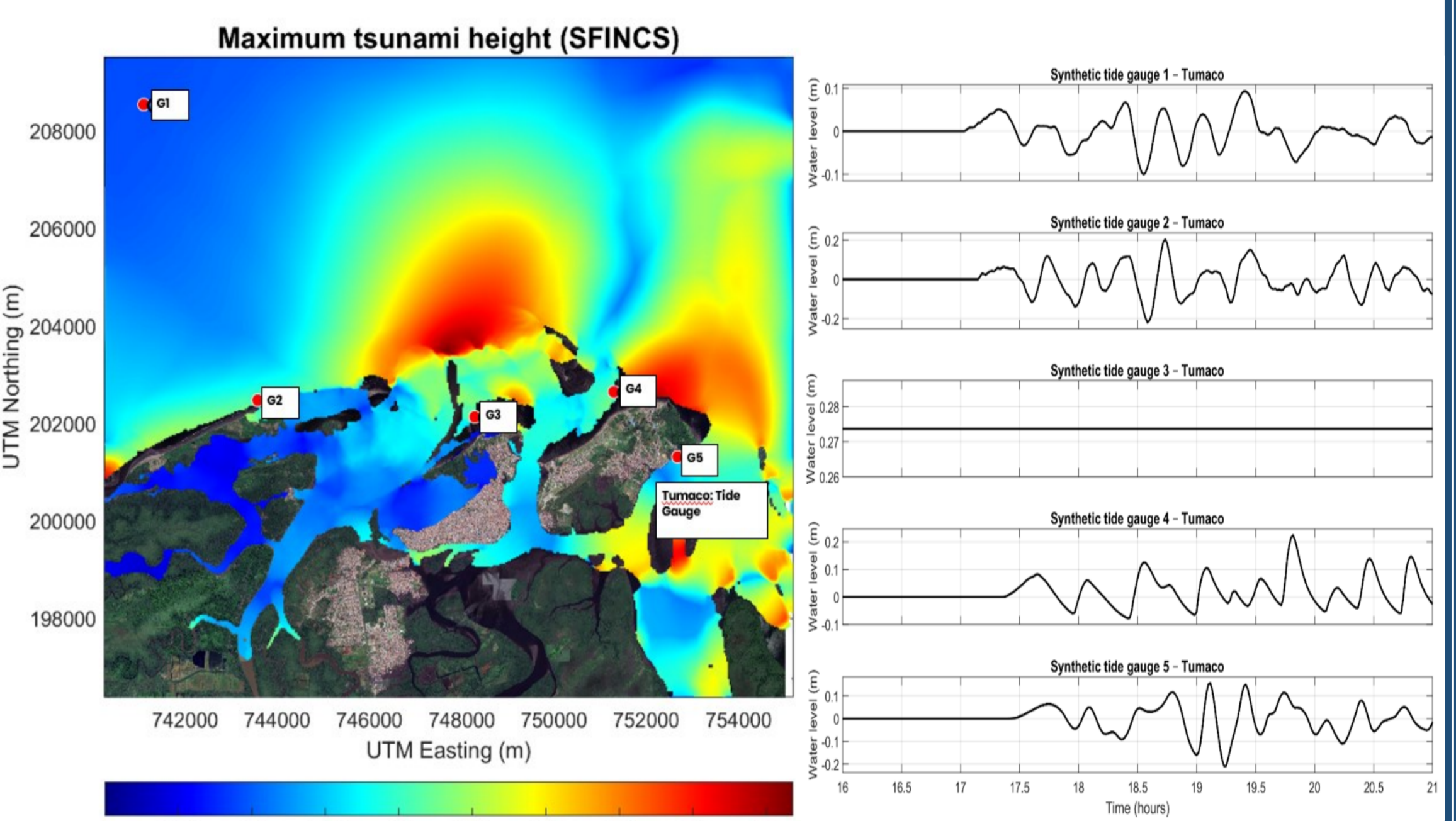


Figura 7. Máximas alturas de Tsunami en Tumaco a partir de la deformación del fondo marino basada en los parámetros de fallas de la NOAA. (Yong Wei, en Ruiz y Melgar, 2025)

Las diferencias en la magnitud de las alturas simuladas son consistentes con la sensibilidad del sistema a los efectos locales de la bahía y a la ubicación del mareógrafo. Adicionalmente, el evento analizado corresponde a un tsunami de origen lejano, con una propagación transoceánica de varias horas desde la fuente sísmica hasta la costa del Pacífico colombiano. Este largo recorrido implica la acumulación de incertidumbres asociadas a la caracterización de la fuente, a la interacción con la batimetría a gran escala y a los procesos de dispersión y atenuación durante la propagación.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El acoplamiento entre los modelos GeoClaw y SFINCS logra reproducir de manera consistente el tiempo de llegada del tsunami y el orden de magnitud de las amplitudes registradas, así como la estructura general de los trenes de oleaje observados en el mareógrafo de Tumaco. En este sentido, la concordancia alcanzada es particularmente relevante considerando la complejidad del entorno costero y la distancia entre la fuente sísmica y el punto de observación, lo que respalda la aplicabilidad del modelo para el análisis de tsunamis lejanos en zonas costeras con geometría compleja. La alta eficiencia computacional del modelo, con tiempos de simulación del orden de 1 a 3 minutos, refuerza su aplicabilidad para estudios de evaluación rápida de tsunamis.

Referencias bibliográfica

- Clawpack. (2024). Earthquake sources: Fault slip and the Okada model. Obtenido de Clawpack-5: <https://www.clawpack.org/okada.html#okada>
- NOAA NCTR. (2025). Kamchatka Tsunami, July 29, 2025. Obtenido de NOAA Center for Tsunami Research: <https://nctr.pmel.noaa.gov/kamchatka20250729/>
- Ruiz-Angulo, A., Melgar, D., de Marez, C., Deniau, A., Nencioli, F., & Hjörleifsdóttir, V. (2025). SWOT Satellite Altimetry Observations and Source Model for the Tsunami from the 2025 M 8.8 Kamchatka Earthquake. The Seismic Record, 5(4), 341–351. doi:10.1785/0320250037

Datos de contacto

rsanchez@dimar.mil.co; maria.aranzales@uri.edu; velascer@oregonstate.edu; jjferrero03@gmail.com