

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARTAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI CON
MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO**

**C. Hernández¹,
R. Jünemann^{1,2},
A. Urrutia¹,
J. Crempien^{1,2},
C. Cortez¹**

RESUMEN

En Chile, las Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU) elaboradas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) constituyen herramientas fundamentales para definir los niveles máximos esperados de inundación en las principales zonas urbanas costeras. Tienen aplicación directa en la planificación territorial y en la Gestión para la Reducción del Riesgo de Desastres, liderada por SENAPRED. Las CITSU representan la inundación máxima estimada para un evento conocido o probable, a partir de información histórica y científica disponible en cada comuna. En el presente trabajo se realiza un análisis comparativo entre estas cartas y los resultados de modelos probabilísticos de inundación por tsunami para distintos periodos de retorno promedio, en base a tres tipos de análisis: (i) comparación de la superficie total inundada, (ii) evaluación del run-up en distintos segmentos costeros, y (iii) análisis de la profundidad de inundación mediante una división espacial del territorio.

¹ *Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN)
ANID/FONDAP/1523A0009*

² *Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile*

1. INTRODUCCIÓN

En contextos costeros como el chileno, la evaluación y gestión del riesgo por tsunamis requiere herramientas precisas para estimar las distintas componentes del riesgo (amenaza, exposición y vulnerabilidad) en distintas escalas territoriales. En este marco, las Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU), elaboradas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), constituyen la principal referencia para identificar zonas de amenaza de tsunami, expuestas a inundación extrema. Estas cartas, utilizadas por entidades como SENAPRED y unidades de municipios y gobernaciones, permiten orientar la planificación urbana, los planes de emergencia y la regulación territorial (SHOA, s.f.).

Las CITSU se basan principalmente en escenarios determinísticos, típicamente contruidos a partir de eventos conocidos o esperados, representando la inundación máxima estimada en niveles de profundidad (SHOA, s.f.). Por ejemplo, la CITSU de Arica contempla información histórica de dos sismos que generaron tsunamis en la zona: 13 de agosto de 1868 y el segundo el 09 de mayo de 1877, cuya información fue complementada con información topográfica y batimétrica mediante modelos de simulación numérica (SHOA, 2021). El uso de este resultado, según la ley N° 21.364 dispone que deben ser incorporados en los planes de gestión de riesgo de desastres y utilizados para la elaboración de instrumentos de planificación territorial, planificación de borde costero, ordenamiento territorial y manejo integrado de cuencas (SHOA, s.f.). No obstante, al basarse en escenarios determinísticos, su metodología puede limitar la representación de la variabilidad natural del fenómeno.

En contraste, los modelos probabilísticos permiten generar cartas de inundación para distintos períodos de retorno promedio de la profundidad, ofreciendo una perspectiva complementaria basada en la probabilidad de exceder determinados niveles de inundación.

El presente trabajo tiene como objetivo comparar las CITSU con los resultados de modelos probabilísticos de inundación para distintos periodos de retorno promedio. El análisis se estructura en tres dimensiones: superficie inundada, altura máxima del terreno inundado (*run-up*), y profundidad de inundación. Se evalúan 7 comunas costeras de Chile: Arica, Iquique, La Serena, Coquimbo, Penco, Dichato y Talcahuano.

2. METODOLOGÍA MODELOS PROBABILÍSTICOS

Los modelos probabilísticos de tsunami se construyen mediante la generación estocástica de escenarios sísmicos basados en un catálogo sintético de terremotos, definidos por su magnitud e hipocentro. Las magnitudes se obtienen a partir de una distribución exponencial truncada (Poulos et al., 2019) y los hipocentros se distribuyen aleatoriamente de manera uniforme a lo largo de la zona de subducción. Cada escenario define una superficie de ruptura en la interfaz entre las placas de Nazca y Sudamericana, cuya geometría se basa en el modelo Slab2 (Hayes et al., 2018) y cuyas dimensiones siguen las leyes de escalamiento propuestas por Allen & Hayes (2017).

Sobre cada una de estas superficies se generan modelos de falla finita con deslizamientos heterogéneos (Crempien et al., 2020), a partir de los cuales se calcula la deformación vertical del fondo marino usando el modelo de Okada (1985). Esta deformación constituye la condición inicial del tsunami.

La propagación y posterior inundación se simulan con el software GeoClaw (Berger et al., 2011; LeVeque et al., 2011), que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras mediante un esquema de volúmenes finitos. Por lo tanto, para cada escenario del catálogo sísmico sintético se obtienen mapas de inundación máxima de alta resolución que describen la intensidad del tsunami en términos de la profundidad de la columna de agua en el espacio.

Finalmente, se integran los resultados de profundidad de cada escenario para estimar la amenaza probabilística de inundación por tsunami, considerando una profundidad mínima de 5 cm.

3. SUPERFICIE INUNDADA

El análisis de superficie inundada considera la extensión territorial de la comuna que se ve afectada por el tsunami, independientemente de la profundidad del agua. Este indicador es clave para la definición de zonas de amenaza y la planificación de evacuaciones.

Para el análisis de superficie se utilizan los mapas comunales obtenidos de las CITSU, y los resultados de los modelos probabilísticos (MP) para distintos periodos de retorno promedio (Tr). La Figura 1a presenta la inundación estimada por la CITSU para la comuna de Arica (SHOA, 2021), mientras que la Figura 1b la correspondiente al MP para un Tr de 40.000 años. Ambos mapas pueden superponerse para identificar las zonas con coincidencia y aquellas donde difieren.

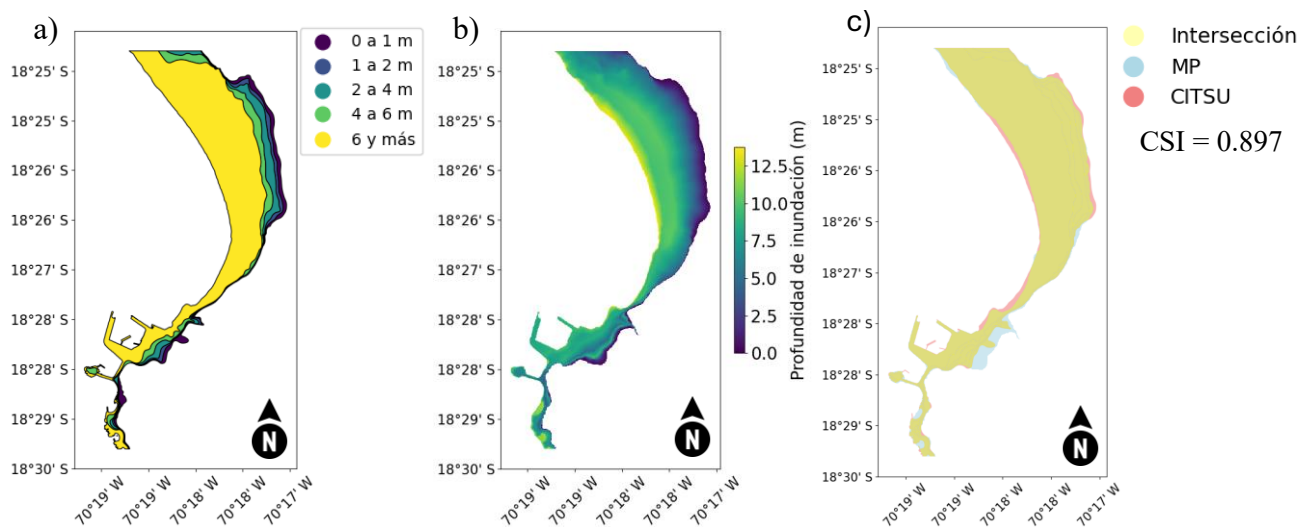


Figura 1. Mapas de superficie y profundidad de inundación para la comuna de Arica: (a) Muestra la CITSU generada por el SHOA; (b) los resultados del modelo probabilístico para un Tr igual a 40.000 años; y (c) Superposición de los mapas de inundación para la comuna de Arica. El área en amarillo corresponde a la intersección entre ambos mapas; en azul donde MP muestra inundación y la CITSU no, y en rojo donde la CITSU muestra inundación y MP no.

La Figura 1c muestra el resultado de la superposición entre ambos mapas, considerando solamente el área inundada, independiente de la profundidad de inundación. En amarillo se indica la zona donde ambos coinciden, en azul donde MP muestra inundación pero la CITSU no, y en rojo donde la CITSU muestra inundación, pero MP no.

Para evaluar las diferencias espaciales entre ambos mapas de inundación se utiliza el Critical Success Index (CSI) (Schaefer, 1990). Este indicador, empleado por el National Weather Service para verificar la precisión de sus pronósticos meteorológicos, se define a partir de los aciertos, las falsas alarmas y los errores de predicción (Mbizvo et al., 2023). Bajo este contexto, el CSI se puede calcular de la siguiente manera:

$$CSI = \frac{A_{Intersección}}{A_{Intersección} + A_{MP} + A_{CITSU}}, \quad (1)$$

Este indicador cuantifica la coincidencia entre la superficie inundada de la CITSU (utilizada de referencia) y la del MP para un determinado periodo de retorno, considerando tanto las sobreestimaciones (inundación detectada solo por MP) como las omisiones (inundación detectada solo por la CITSU). Valores más cercanos a 1 indican una mayor coincidencia espacial entre ambos mapas. En el caso de la Figura 1c, utilizando el MP para un periodo de retorno promedio de 40.000 años, se obtiene un valor de CSI igual a 0.897, siendo el valor máximo observado entre los Tr evaluados.

La Figura 2 muestra los resultados del indicador CSI para distintos periodos de retorno, para las siete comunas del país consideradas en este estudio.

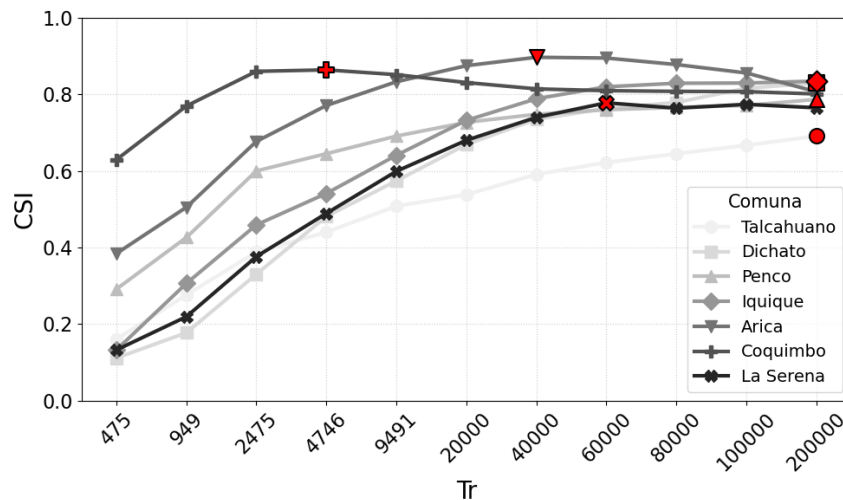


Figura 2. Resultados del CSI para distintos periodos de retorno (Tr) en siete comunas de Chile. Valores cercanos a 1 indican mayor similitud con la CITSU de cada comuna.

Los resultados evidencian que la correspondencia espacial entre los mapas de inundación derivados de los MP y las CITSU varía significativamente entre comunas, y no responde a un único nivel de amenaza. Por ejemplo, mientras que en Arica el mayor grado de coincidencia (máximo CSI, indicado en rojo en la Figura 2) se alcanza para un Tr de 40.000 años, en Coquimbo disminuye a 2.475 años, y en La Serena aumenta a 60.000 años.

La Figura 3 muestra estos resultados de forma espacial, mostrando la superposición entre la CITSU y el MP para los periodos de retorno que representan la mayor coincidencia en cada comuna. Es importante destacar que Coquimbo y La Serena comparten una misma CITSU (SHOA, 2015). Esta

heterogeneidad sugiere que las CITSU incorporan criterios locales y no necesariamente están construidas con base en un nivel uniforme de probabilidad de ocurrencia de la medida de intensidad de tsunami.

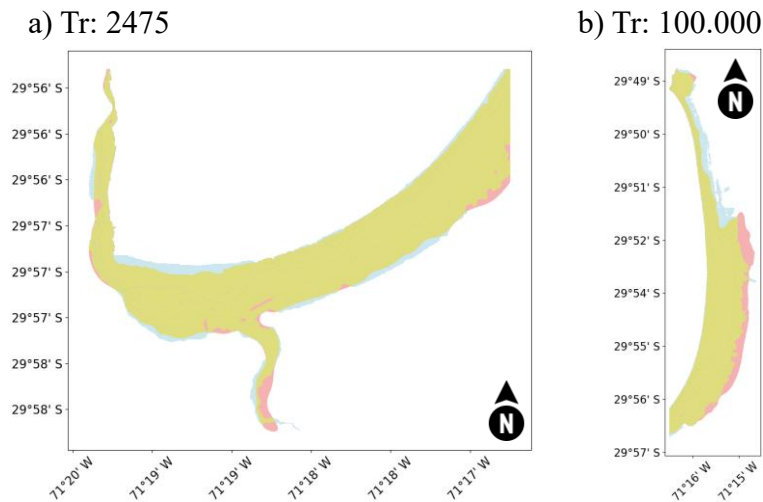


Figura 3. Superposición de los mapas de inundación: (a) superposición entre la CITSU y el MP para un Tr de 2475 años en la comuna de Coquimbo, (b) superposición entre la CITSU y el MP para un Tr de 100.000 años en la comuna de La Serena.

4. RUN-UP

El segundo análisis busca determinar la altura máxima de inundación (*run-up*) estimada por el CITSU y los MP, a lo largo de distintos segmentos costeros definidos dentro de cada comuna. Los segmentos se extienden de forma continua a lo largo del litoral, cubriendo distintas zonas de la comuna, con una distancia ajustada a cada caso. Esto permite analizar la variación espacial de la amenaza a lo largo del litoral, y contrastar el comportamiento de los modelos frente a los valores presentes en las cartas oficiales.

La Figura 4 presenta los resultados para la comuna de Arica. En la Figura 4a se muestran los cuatro segmentos analizados en este caso: S1, S2, S5 y S6, mientras que en la Figura 4b se presentan los resultados del *run-up* para dichos segmentos. Se observa que el valor representado por el CITSU varía en relación con los distintos periodos de retorno, especialmente al comparar los extremos: en el segmento S6 (ubicado al norte), el valor del CITSU se aproxima a un periodo de retorno de 60.000 años, mientras que en el segmento S1 (al sur), se encuentra cercano a los 4.746 años.

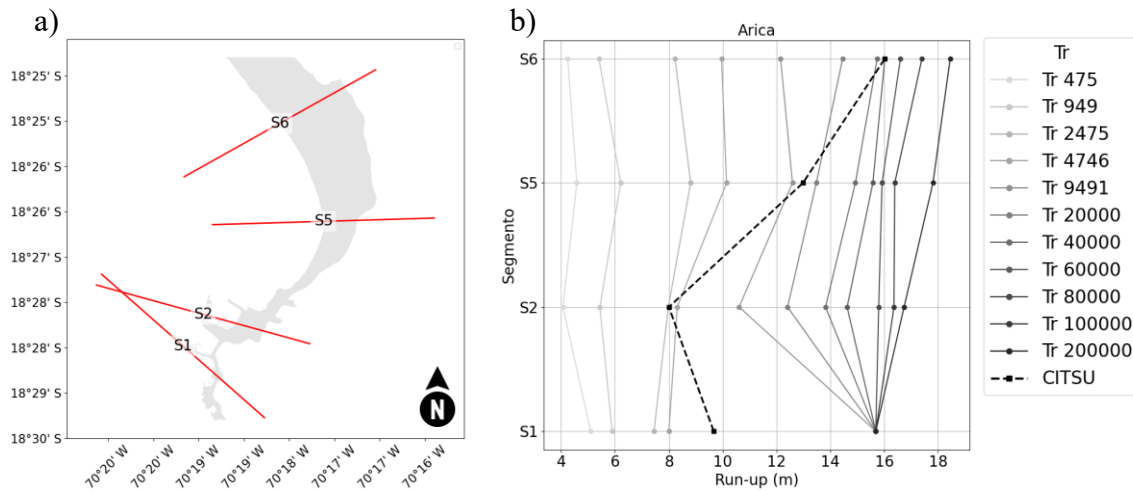


Figura 4. Resultados de run-up en la comuna de Arica: (a) segmentos definidos a lo largo de la comuna utilizados para el cálculo de run-up (S1, S2, S5 y S6), (b) altura máxima de inundación (run-up) estimada por MP para distintos Tr y la CITSU.

Este patrón se repite en otras comunas. Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados del análisis de *run-up* para las comunas de Coquimbo y La Serena. En ambos casos se evidencian diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de MP y el CITSU. En Coquimbo, los valores de *run-up* del CITSU se aproximan a los obtenidos por MP para un periodo de retorno de 2.475 años, con una excepción notable en el segmento 17, donde el valor se acerca a un periodo de 949 años. En La Serena, a partir del segmento 6 (S6) se observa un cambio en el comportamiento: hacia el segmento 10 (norte), el CITSU presenta menores alturas de *run-up* que los modelos probabilísticos; en cambio, hacia el segmento 1 (sur), el CITSU muestra valores de *run-up* superiores a todos los periodos de retorno considerados.

Además, al igual que en el análisis de superficie inundada, se evidencia una diferencia metodológica en la carta compartida entre ambas comunas. En Coquimbo, el CITSU se asemeja a los resultados de los Tr más bajos; en cambio, en La Serena, los Tr equivalentes al CITSU superan los 20.000 años en todos los segmentos, reflejando una discrepancia geométrica significativa entre ambos sectores. Esto tiene implicancias directas en la planificación costera, ya que sectores con similares condiciones están caracterizadas de forma muy disímil en términos de amenaza de tsunami.

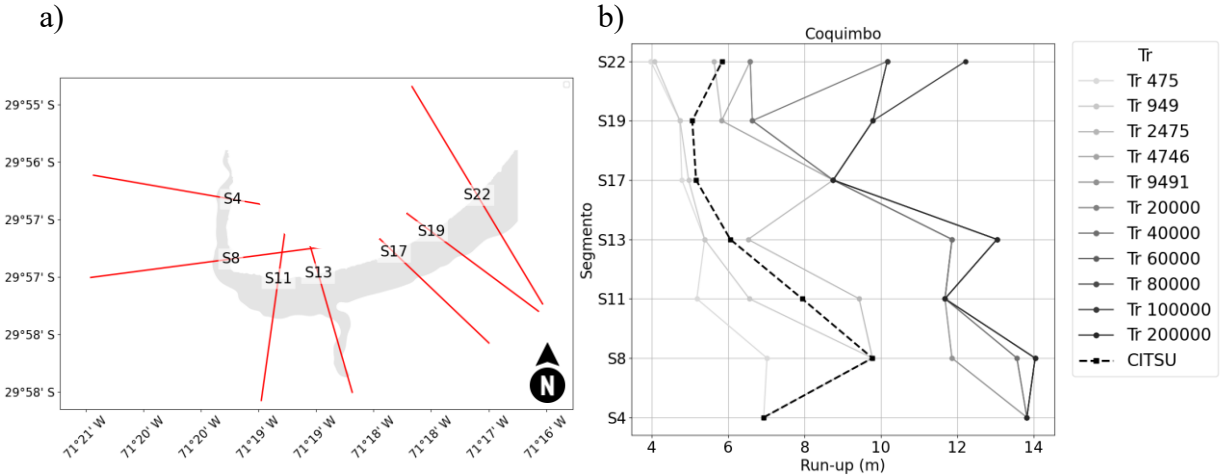


Figura 5. Resultados de run-up en la comuna de Coquimbo: (a) segmentos definidos a lo largo de la comuna utilizados para el cálculo de run-up, (b) altura máxima de inundación (run-up) estimada por MP para distintos Tr y la CITSU.

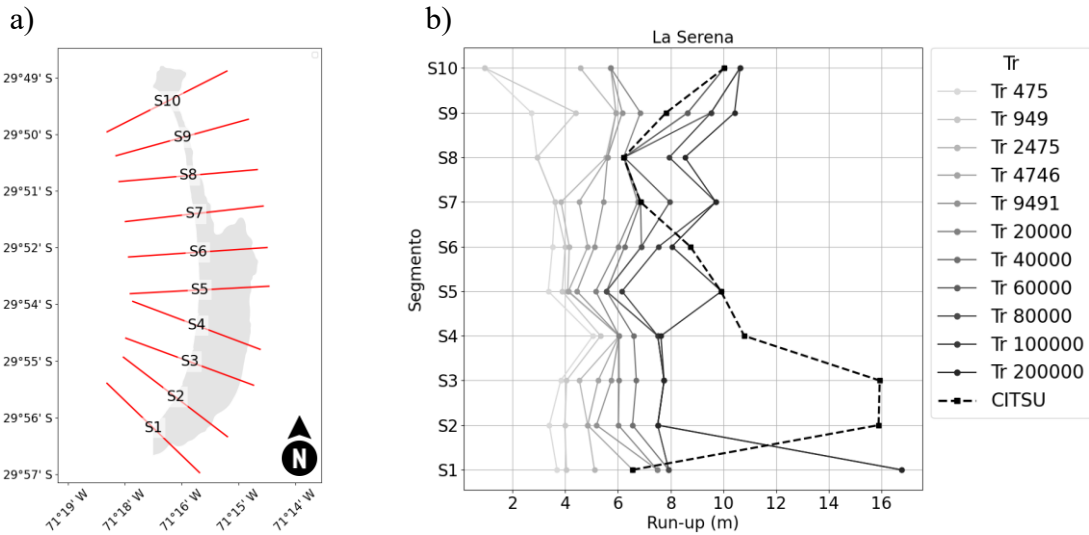


Figura 6. Resultados de run-up en la comuna de La Serena: (a) muestra los segmentos definidos a lo largo de la comuna utilizados para el cálculo de run-up, (b) altura máxima de inundación (run-up) estimada por MP para distintos Tr y la CITSU.

5. PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN

Finalmente, se compara la profundidad de inundación estimada por el CITSU con los valores obtenidos a partir de los MP. Para ello, se discretiza el dominio de la comuna mediante una grilla espacial, donde cada celda se categoriza según el rango de profundidad reportado por cada modelo (Figura 7). A cada celda se le asigna el valor de profundidad de inundación correspondiente, según la información proveniente de la CITSU o del modelo probabilístico. En el caso de la CITSU, la información está expresada en categorías de profundidad, por lo que se asocia a cada rango un valor numérico representativo (ver Tabla 1), lo que permite establecer una comparación cuantitativa directa con los resultados de los modelos probabilísticos.

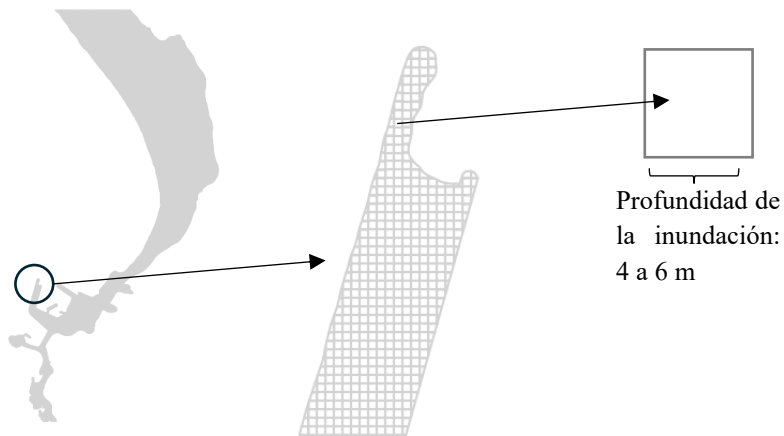


Figura 7: Metodología para el análisis de profundidad de inundación. El mapa CITSU se discretiza en grillas, asignando a cada celda su respectiva categoría de profundidad de inundación.

Tabla 1: Asignación numérica a las categorías de profundidades de inundación CITSU

Categoría de inundación CITSU Profundidad de la inundación	Valor numérico asociado
0 a 1 m	0,5 m
1 a 2 m	1,5 m
2 a 4 m	3 m
4 a 6 m	5 m
6 y más	7 m

A cada celda de la grilla se identifica el valor de T_r del MP cuya profundidad simulada es más cercana a la indicada por la CITSU, denominado período de retorno equivalente (T_{re}). Este procedimiento se repite en toda la grilla, generando un mapa de calor que indica, para cada celda de la grilla el T_{re} que mejor representa la profundidad establecida en la carta CITSU.

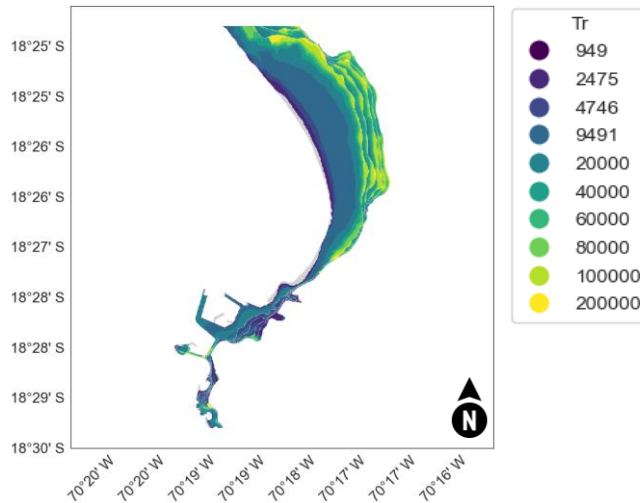


Figura 8: Distribución espacial de los Tre en la comuna de Arica.

La Figura 8 muestra el mapa de calor generado para la comuna de Arica, donde los Tre varían entre 949 y 200.000 años. Se observa una alta concentración de celdas asociadas a periodos de 20.000 y 40.000 años. En las zonas interiores, más alejadas de la costa (sector derecho de la figura), predomina la presencia de celdas vinculadas a Tre más altos, entre 100.000 y 200.000 años.

La Figura 9 presenta la distribución espacial de los Tre para las comunas de Coquimbo y La Serena. Aunque en ambas comunas los valores oscilan entre 475 y 200.000 años, se observa que en Coquimbo los Tre más representativos se concentran en torno a los 2.475 años, con escasa presencia de celdas asociadas a Tre superiores a 40.000 años. En contraste, La Serena presenta una alta proporción de celdas con Tre cercanos a los 200.000 años. No obstante, se evidencian diferencias al interior de la comuna: tanto en el sector norte como sur predominan celdas con Tre menores, bajo los 20.000 años.

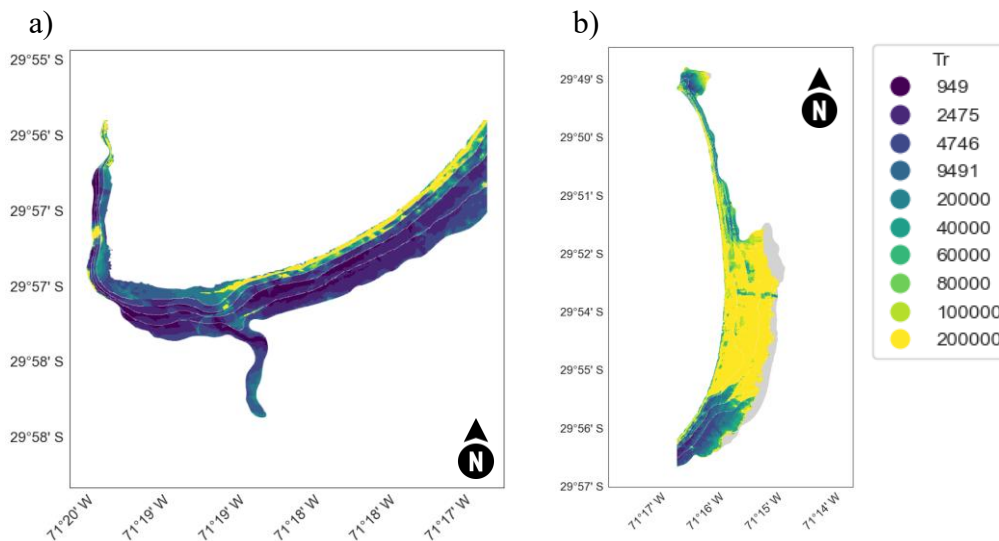


Figura 9: Distribución espacial de los periodos de retorno que mejor se ajustan a la inundación indicada por la CITSU en las comunas (a) Coquimbo y (b) La Serena.

Este enfoque permite observar variaciones significativas en los Tre a lo largo del territorio, revelando que la equivalencia entre el CITSU y los MP varía incluso dentro de una misma comuna. Cabe destacar que las diferencias observadas también se deben al uso de distintos modelos de elevación digital y a que los valores de los parámetros utilizados en las simulaciones, *e.g.* el coeficiente de fricción, no necesariamente son iguales.

6. CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta un análisis comparativo entre las CITSU y los mapas de inundación por tsunami generados mediante modelos probabilísticos. El análisis se estructuró en tres dimensiones: (i) superficie inundada, (ii) *run-up* —ambos relevantes para identificar y delimitar las zonas afectadas por tsunamis, lo que resulta fundamental en la planificación de evacuaciones—, y (iii) profundidad de inundación, variable que suele emplearse para estimar el daño estructural potencial y que, además, constituye la base para la categorización utilizada por las CITSU.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten observar que la correspondencia entre las cartas CITSU y los mapas de inundación generados mediante modelos probabilísticos no es uniforme a lo largo del país y varía significativamente entre comunas, lo que indica que las cartas CITSU representan distintos niveles de amenaza en cada caso. Cada comuna presenta un periodo de retorno distinto que se asemeja más a lo representado en su respectiva carta, lo que sugiere que estas no responden a una lógica uniforme de amenaza. El análisis de superficie inundada, *run-up* y profundidad de inundación demuestra además que las diferencias también se manifiestan espacialmente dentro de cada comuna.

Estos hallazgos pueden servir como base para orientar futuras revisiones de las CITSU, incorporando enfoques probabilísticos. Integrar esta perspectiva permitiría una mejor caracterización de la amenaza por tsunami y en consecuencia una cuantificación del riesgo más robusta, que permita avanzar hacia una mayor coherencia metodológica en la evaluación de amenazas por tsunami y la aplicabilidad uniforme de la metodología a lo largo del territorio costero.

REFERENCIAS

Allen, T. I., & Hayes, G. P. (2017). Alternative rupture-scaling relationships for subduction interface and other offshore environments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107 (3), 1240–1253.

Berger, M. J., George, D. L., LeVeque, R. J., & Mandli, K. T. (2011). The geoclaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources*, 34 (9), 1195–1206.

Crempien, J. G., Urrutia, A., Benavente, R., & Cienfuegos, R. (2020). Effects of earthquake spatial slip correlation on variability of tsunami potential energy and intensities. *Scientific reports*, 10 (1), 8399.

Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362 (6410), 58–61.

LeVeque, R. J., George, D. L., & Berger, M. J. (2011). Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods. *Acta Numerica*, 20, 211–289.

Mbizvo GK, Bennett KH, Simpson CR, Duncan SE, Chin RFM, Lerner AJ. Using Critical Success Index or Gilbert Skill Score as composite measures of positive predictive value and sensitivity in diagnostic accuracy studies: Weather forecasting informing epilepsy research. *Epilepsia*. 2023; 64: 1466–1468. <https://doi.org/10.1111/epi.17537>

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75 (4), 1135–1154.

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109 (1), 66–74

Schaefer, J. T., 1990: The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *Wea. Forecasting*, 5, 570–575, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1990\)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2)

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (2021). Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU): Arica. Recuperado el 4 de agosto de 2025, de https://shoabucket.s3.amazonaws.com/shoa.cl/shoa-cl/descargas/citsu/pdf/citsu_arica.pdf

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (2015). Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU): Coquimbo – La Serena. Recuperado el 4 de agosto de 2025, de https://shoabucket.s3.amazonaws.com/shoa.cl/shoa-cl/descargas/citsu/pdf/citsu_arica.pdf

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (s. f.). Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU). Recuperado el 4 de agosto de 2025, de <https://www.shoa.cl/php/citsu.php>