



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

ANÁLISIS DEL NÚMERO DE FROUDE EN LA BAHÍA DE COQUIMBO: EVALUACIÓN DEL MÉTODO EGLA Y SU APLICABILIDAD EN INGENIERÍA COSTERA

Francisco Sáez ^a; Rodrigo Cienfuegos ^{a,b}; Patricio Catalán ^{a,c}

RESUMEN

Este estudio evalúa el desempeño del método Energy Grade Line Analysis (EGLA) en la estimación de las alturas de inundación por tsunamis en la Bahía de Coquimbo, con un enfoque particular en el parámetro relacionado al número de Froude. Se analizan tres formas de parametrizar el número de Froude y se comparan las alturas de inundación obtenida contra simulaciones numéricas basadas en las ecuaciones de aguas someras. Los resultados indican que las variaciones del número de Froude pueden generar errores en la estimación de la altura de inundación entre 15% y 35%. Esto destaca la necesidad de ajustar y mejorar la estimación del número de Froude para mejorar la predicción de altura y velocidad del flujo en las zonas de inundación.

^a Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, CIGIDEN, francisco.saez@sansano.usm.cl

^b Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, rcienfue@uc.cl

^c Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. patricio.catalan@usm.cl

1 INTRODUCCIÓN

Los tsunamis son fenómenos naturales extremos capaces de causar un impacto devastador a lo largo de áreas costeras. Nuestro país cuenta con una de las costas más extensas del mundo y, dado su historial sísmico, está particularmente expuesto a estos eventos. Por lo tanto, el análisis de inundación generado por tsunamis juega un rol crucial desde un punto de vista social e ingenieril, dado que en estas áreas se desarrollan actividades tanto económicas como recreaciones.

Esto expone la necesidad de contar con métodos capaces de reproducir la inundación del tsunami de forma eficiente para ser utilizadas en el diseño de estructuras costeras y de planificación. Uno de los enfoques comúnmente utilizados son las simulaciones numéricas basados en la física del fenómeno mediante la resolución de las Ecuaciones de Aguas Someras en su forma no lineal (NLSWE, por sus siglas en inglés), el cual requiere una alta capacidad computacional limitando los escenarios a considerar el análisis (Kriebel, 2017). Un segundo enfoque corresponde a métodos basados en el principio de conservación de energía para estimar la altura de inundación y velocidad del flujo (Weibe, 2013; Smart, 2016; Kimpton, 2024).

En este contexto, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, siglas en inglés) proponen un método basado en el principio de conservación de energía llamado Energy Grade Line Analysis (EGLA) a través de Design Standard for Tsunami-exposed (Chock, 2016; ASCE/SEI 7-16, 2016; ASCE/SEI 7-22, 2022). EGLA debe ser calibrado tomando en cuenta mapas de inundación establecidas por la entidad gubernamentales respectivas, los cuales son calculados usando simulaciones de alta resolución basado en NLSWE (Kriebel, 2017).

Por otra parte, EGLA utiliza el número de Manning como una forma de estimar la rugosidad del terreno, además de la topobatimetría y el número de Froude, el cual resulta ser un parámetro fundamental ya que permite relacionar la altura del flujo con la velocidad de este. Dicho esto, diversas formas de parametrizar el número de Froude han sido propuestas con el fin de mejorar el desempeño del modelo en diferentes condiciones topobatimétricas e hidrodinámicas (Weibe, 2013; Naito, 2013; Kriebel, 2017; Tada, 2018).

El caso de estudio es la Bahía de Coquimbo, la cual es una localidad particularmente relevante dado que corresponde a una zona con importante actividad económica como el puerto de Coquimbo y su capacidad resonante dado sus características geográficas que amplifican este tipo de fenómenos (Catalán, 2024). Ejemplo de lo anterior, es el terremoto de Illapel en el año 2015 con una magnitud de 8.3 MW, el cual generó un tsunami con una profundidad máxima de 4.7 metros y una altura de run-up de hasta 6.4 metros en algunas áreas lo que causó daños severos en la infraestructura y edificaciones de la bahía (Paulik, 2021).

El presente estudio tiene como objetivo analizar la aplicación de tres formulaciones diferentes del número de Froude para evaluar la efectividad del método EGLA respecto a la altura de inundación obtenida en la Bahía de Coquimbo. Esto proporcionaría una mirada detallada a la calibración del número de Froude para obtener alturas de inundación y velocidades del flujo más precisas, las cuales pueden ser consideradas en el diseño estructural y/o planificación en zonas expuestas a tsunamis.

2 ANTECEDENTES

2.1 Energy Grade Line Analysis

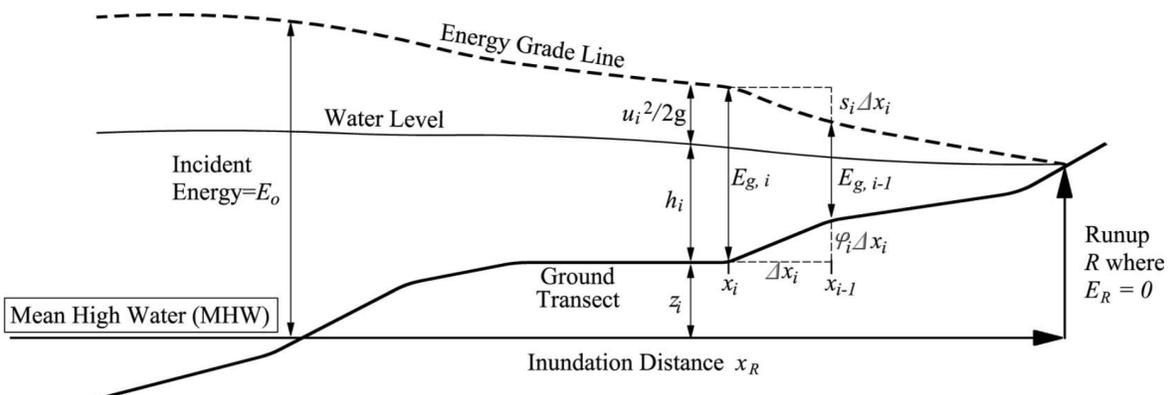
El método EGLA propuesto por la ASCE (ASCE/SEI 7-22, 2022) permite estimar las alturas de inundación mediante la aplicación del principio de conservación de energía sobre perfiles o transectos representativos de la topografía del lugar de interés. Específicamente, el método está basado en la ecuación de Bernoulli en su versión invariante a lo largo de una línea de flujo, la cual corresponde a la traza de la altura máxima de inundación sobre el transecto.

Para su aplicación, la ecuación de Bernoulli es discretizada sobre el perfil del terreno desde la línea de costa hasta el punto de Runup, es decir, el punto donde se alcanzó la inundación máxima inducida por el tsunami. Un esquema de la implementación de la ecuación de Bernoulli sobre un determinado transecto se presenta en la Figura 1 y su discretización se presenta en la ecuación (1).

$$\left(z + h + \frac{u^2}{2g}\right)_{i+1} = \left(z + h + \frac{u^2}{2g}\right)_i - S_i \Delta x_i \quad (1)$$

Específicamente, z es la elevación del transecto interpolado en cada punto desde un punto de referencia (típicamente la línea de costa, $z = 0$), h es la profundidad del flujo, u es la velocidad del flujo horizontal promediada en la vertical, g es la aceleración de gravedad, S es la pendiente de la línea de energía y $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ es la discretización espacial entre dos nodos consecutivos.

Figura 1: Representación del principio de conservación de energía a través de un transecto inundado. Fuente: (ASCE/SEI 7-22, 2022).



La normativa ASCE/SEI recomienda utilizar la ecuación de Manning (2) para estimar la pendiente de fricción en cada paso de discretización.

$$S_i = \frac{u_i^2}{\left(\frac{1}{n_i}\right)^2 h_i^{\frac{4}{3}}} \quad (2)$$

n_i representa el coeficiente Manning en el nodo i .

2.2 Parametrización del número de Froude

La ecuación de balance de energía cuenta con dos variables independientes: la profundidad del flujo y la velocidad del flujo. Estas variables pueden ser relacionadas a través del número de Froude, el cual se presenta en la ecuación (3).

$$F = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad \text{ó} \quad u = F\sqrt{gh} \quad (3)$$

Lo anterior permitiría resolver la ecuación de Bernoulli solo en términos de la profundidad del flujo dada una determinada parametrización del número de Froude. Sustituyendo la ecuación (3) para el número de Froude en la ecuación de balance de energía (1) se puede obtener la ecuación discreta (4) en términos de la profundidad del flujo (única variable independiente) a lo largo del transecto.

$$\left(z + h + \frac{1}{2}F^2h\right)_{i+1} = \left(z + h + \frac{1}{2}F^2h\right)_i - \left(\frac{gF^2n^2\Delta x}{h^{\frac{1}{3}}}\right)_i \quad (4)$$

En la literatura se encuentran diferentes parametrizaciones del número de Froude, donde se destacan tres: constante, lineal y raíz cuadrada. Fema (2007) sugiere un $F = \sqrt{2}$, pero se ha demostrado en investigaciones posteriores que se puede obtener mejores resultados si el número de Froude varía a lo largo del transecto, especialmente si el número de Froude decae desde la línea de costa hasta el punto de Runup (Kriebel, 2017).

Por otro lado, la normativa ASCE/SEI7-17 (2022) establece que el método EGLA debe ser implementado desde un punto conocido dado por el Runup (R) y la distancia horizontal máxima de inundación (X_R). Por definición, este punto corresponde al punto de inundación máxima y, por ende, la profundidad del flujo equivale a 0. La ecuación (5) representa la parametrización del número de Froude.

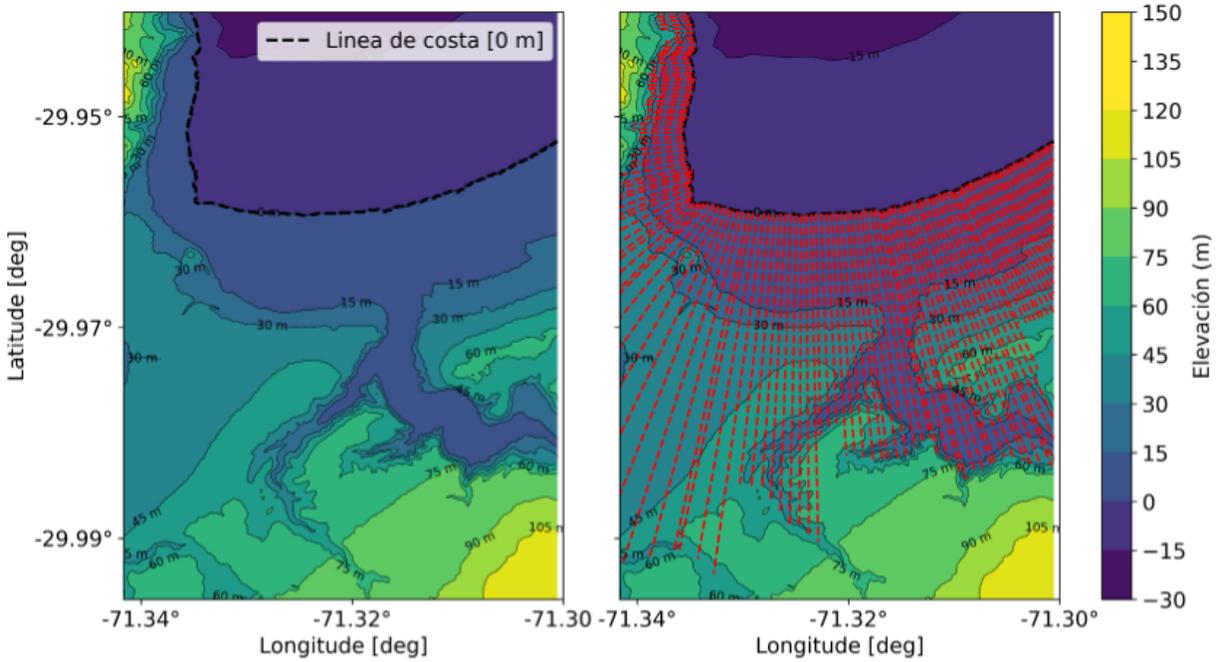
$$F_i = F_0 \left(1 - \frac{x_i}{X_R}\right)^{0.5} \quad \begin{cases} F_0 = 1 & , \text{ si la pendiente} > 1/100 \\ F_0 = 1.3 & , \text{ si la pendiente} < 1/100 \end{cases} \quad (5)$$

Donde F_0 es el número de Froude en la línea de costa.

La tercera parametrización del número de Froude a considerar en este estudio fue propuesta por Wiebe (2013), la que considera un decaimiento lineal desde la línea de costa hasta la distancia horizontal máxima de inundación y se presenta en la ecuación (6).

topobatemetría se presenta en la Figura 3 junto con la distribución de transectos representada mediante líneas rojas segmentadas (limitada hasta los 50 m).

Figura 3: Topo-batimetría utilizada en el modelo HYSEA y transectos creados (líneas rojas) para implementación EGLA.



3.2 Modelo numérico Tsunami Hy-SEA

Tsunami-HySEA (Macías, 2017) es un modelo numérico diseñado especialmente para realizar simulaciones de tsunamis basado en un ambiente GPU para lograr simulaciones robustas, fiables y de buena precisión en menor tiempo de cómputo. El modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras en su versión 2D y no lineal, las cuales se presentan en (7). Estas ecuaciones pueden ser expresadas en sus coordenadas cartesianas mediante la ecuación de conservación y las ecuaciones de momentum en las respectivas direcciones.

$$\begin{aligned}
 h_t + (q_x)_x + (q_y)_y &= 0 \\
 (q_x)_t + \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \right)_x + \left(\frac{q_x q_y}{h} \right)_y &= ghH_x + S_x \\
 (q_y)_t + \left(\frac{q_x q_y}{h} \right)_x + \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \right)_y &= ghH_y + S_y
 \end{aligned} \tag{7}$$

$h(x, t)$ denota el ancho de la capa de agua en la respectiva coordenada geográfica x y tiempo t , $H(x)$ es la profundidad del fondo medida desde un punto de referencia y el flujo de masa o de momentum se puede expresar como $q(x, t) = h(x, t) u(x, t)$, el cual relaciona la velocidad promediada en la vertical con el ancho de la capa de agua.

Se realizaron 50 simulaciones de tsunamis, los cuales son incorporados como inputs al modelo numérico mediante el desplazamiento inicial de un plano de falla. En una primera etapa se realiza un modelo regional para la propagación del tsunami y posteriormente un modelo local de mayor resolución en la bahía de Coquimbo. El coeficiente de Manning considerado en las simulaciones es igual a 0.03, el cual corresponde al mismo utilizando en la implementación del método EGLA.

En la Figura 4 se presenta un ejemplo del área de inundación obtenida para una de las 50 simulaciones. Adicionalmente, en la Figura 5 se muestra el resultado del proceso de interpolación de un transecto sobre la topobatemetría y sobre el mapa de altura de inundación, donde se muestra el punto de Runup (R) y de distancia máxima horizontal de inundación (X_R) respectivo.

Figura 4: Área de inundación obtenida mediante Tsunami-HySEA sobre la bahía de Coquimbo.

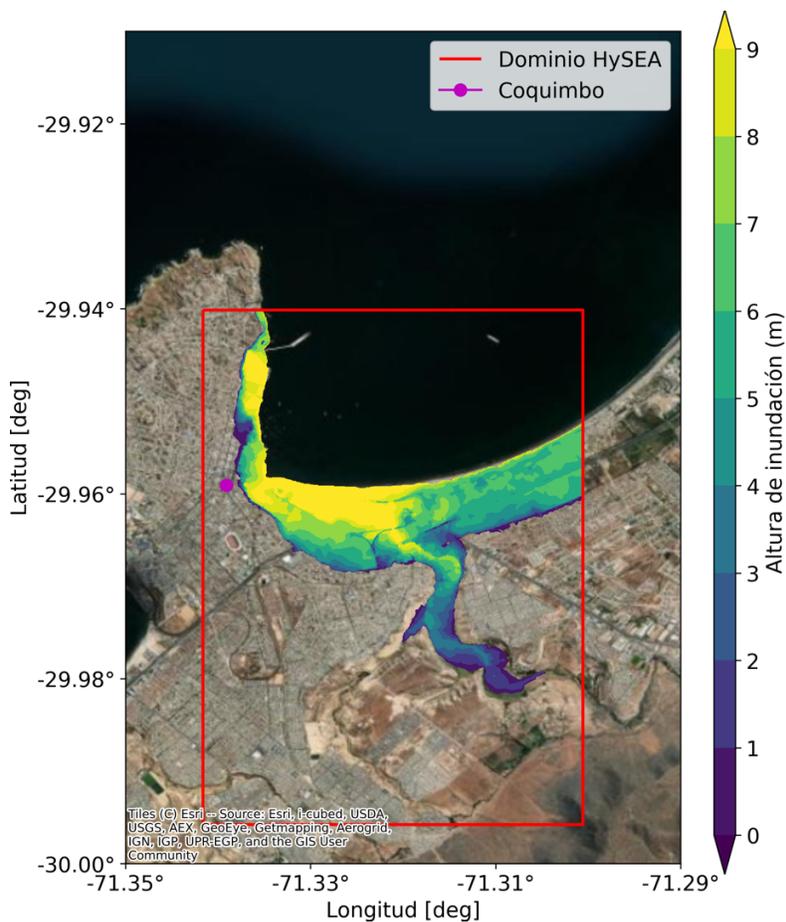
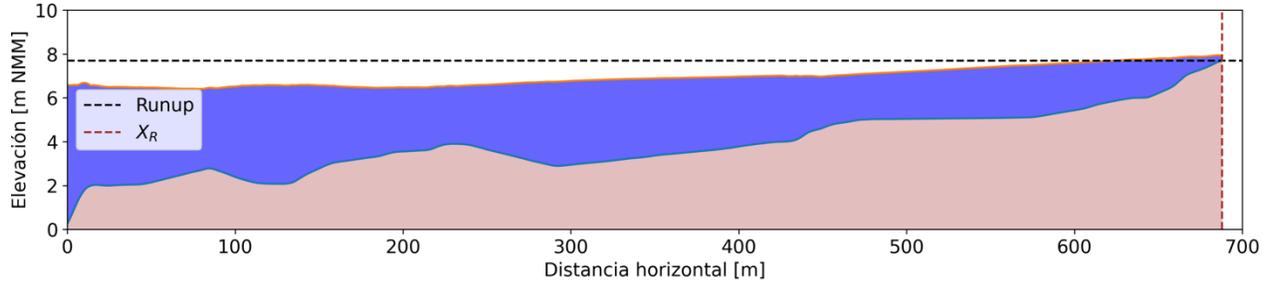


Figura 5: Ejemplo de elevación e inundación sobre un transecto.



3.3 Metodología

Para la aplicación de EGLA se necesita conocer el punto de Runup (R) y distancia máxima de inundación (X_R) para luego resolver la ecuación de Bernoulli desde el punto de Runup hasta la línea de costa (aguas arriba). Se realizan 50 simulaciones mediante Tsunami-HySEA para encontrar la inundación máxima en cada simulación para la aplicación del método EGLA.

Considerando lo anterior, se establecen dos formas para resolver la ecuación de Bernoulli:

- La primera considera las diferentes parametrizaciones del número de Froude, donde la única variable independiente a resolver es la altura de inundación. Con lo anterior, además se puede recuperar la velocidad del flujo.
- La segunda opción considera utilizar como dato la altura de inundación a lo largo del transecto obtenida mediante Tsunami-HySEA, siendo el número de Froude la única variable independiente a resolver. Esto permitiría estimar un número de Froude óptimo a lo largo del transecto tal que la altura de inundación mediante EGLA sea una mejor aproximación de la altura obtenida por las simulaciones.

Este enfoque permite realizar una comparación en términos de altura de inundación y del número de Froude contra los resultados provenientes de las simulaciones, los cuales son considerados como óptimos.

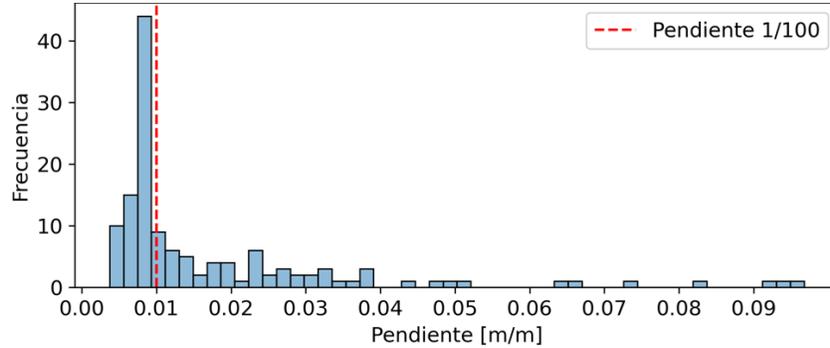
3.4 Calibración

Como se mencionó en la sección 2, las formulaciones del número de Froude lineal y cuadrática deben ser calibrada según sus respectivos parámetros libres. La formulación constante no debe ser calibrada dado que no varía a lo largo del transecto.

3.4.1 Número de Froude cuadrático

Esta formulación depende de la pendiente de los perfiles topobatimétricos. Dado que cada perfil puede variar su pendiente, el parámetro F_0 se ajusta transecto a transecto, calculando la pendiente media por cada perfil. En la Figura 6 se presenta la distribución de la pendiente de los transectos, la cual muestra que la mayoría de los transectos tienen pendiente menor a 2% y, además, se destaca la pendiente límite de 1% o 1/100 propuesta en la formulación del número de Froude.

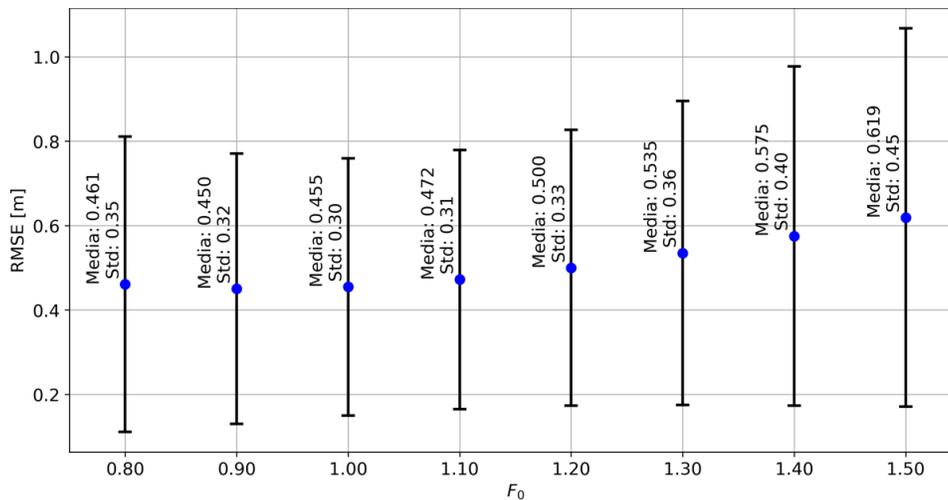
Figura 6: Distribución de pendiente por transectos.



3.4.2 Número de Froude lineal

A diferencia de lo anterior, la formulación lineal depende de dos parámetros F_0 y F_R . Wiebe (2013) propone $F_0 = 0.5$ y F_R puede variar entre 0.8 a 1.5. Por lo tanto, el parámetro F_R se debe calibrar para encontrar el valor óptimo. Esta calibración se realizará a través de una comparación entre las alturas de inundación obtenidas con la simulación y para los diferentes valores de F_R medida por el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados de esta calibración se presentan en la Figura 7, donde el parámetro F_R que induce menor error respecto a las simulaciones corresponde a 0.9. Por lo tanto, se considera $F_R = 0.9$ y $F_0 = 0.5$.

Figura 7 : Error de RMSE para calibración de parámetros de formulación Froude lineal



4 RESULTADOS

Considerando las tres formulaciones del número de Froude presentadas, se analizan los resultados desde un punto de vista de la altura de inundación, del número de Froude y la velocidad promediada en la profundidad a lo largo del transecto. En la Figura 8 se presenta los resultados

para el transecto N°40 con pendiente media igual a 0.016 m/m y la simulación N°30, la cual genera una altura de inundación media en la línea de costa entorno a 3 [m] con máximos de hasta 4 [m]. Por otra parte, en la Figura 9 se muestra los resultados para el transecto N°100 con pendiente media de 0.05 m/m y la simulación N°50 representativa de alturas de inundación media de 9 [m] y máxima de 11 [m] en la línea de costa. Específicamente, se presentan estas simulaciones dado que representan alturas de inundación promedio como lo es la simulación N°30 y máximo en el caso de la simulación N°50 respecto a las demás simulaciones. Además, se presenta un gráfico de cajas para estimar el error de la altura de inundación, el cual se obtiene utilizando la ecuación (8):

$$\text{Error} = \frac{|h_{HySEA} - h_{EGLA}|}{h_{HySEA}} * 100 \quad (8)$$

Donde h_{HySEA} es la altura de inundación obtenida con la simulación numérica y h_{EGLA} es la inundación estimada por EGLA según cada parametrización del número de Froude.

La Figura 8 muestra errores medios entorno al 20% para las tres formulaciones del número de Froude, pero con una varianza importante, lo cual se aprecia en las diferencias de alturas obtenidas. Estas diferencias de altura se deben a las variaciones del número de Froude propuestos respecto al Froude óptimo. Por ejemplo, en torno a 100 m de distancia desde el inicio del transecto, el número de Froude aumenta por sobre el valor crítico (> 1). Esto último guarda relación con la naturaleza de la ecuación de Bernoulli y su aplicación en la hidráulica, ya que se puede interpretar que en este sector el flujo tiende a acelerar como una condición hidráulica de torrente, mientras que las diferentes parametrizaciones estiman el número de Froude como río (< 1).

A diferencia de la figura anterior, los resultados presentados en la Figura 9 cuenta con una pendiente mayor apreciándose un mayor contraste en la variación del número de Froude a lo largo del transecto, donde en lugares de baja altura de inundación se espera un comportamiento hidráulico asociado a torrente, mientras que en alturas de inundación altas se espera que el flujo se comporte como río. En este caso, existen diferencias considerables del número de Froude óptimo respecto a las tres formulaciones propuestas, lo que se traduce en un aumento del error calculado.

Sin embargo, estudios recientes apuntan a que el parámetro de Froude no guarda relación con la hidráulica clásica y solo representa un parámetro de calibración (Estada et al., 2024).

Figura 8: Comparación de altura de inundación, número de Froude, velocidad y error a lo largo del transecto 40 para el escenario de simulación 30.

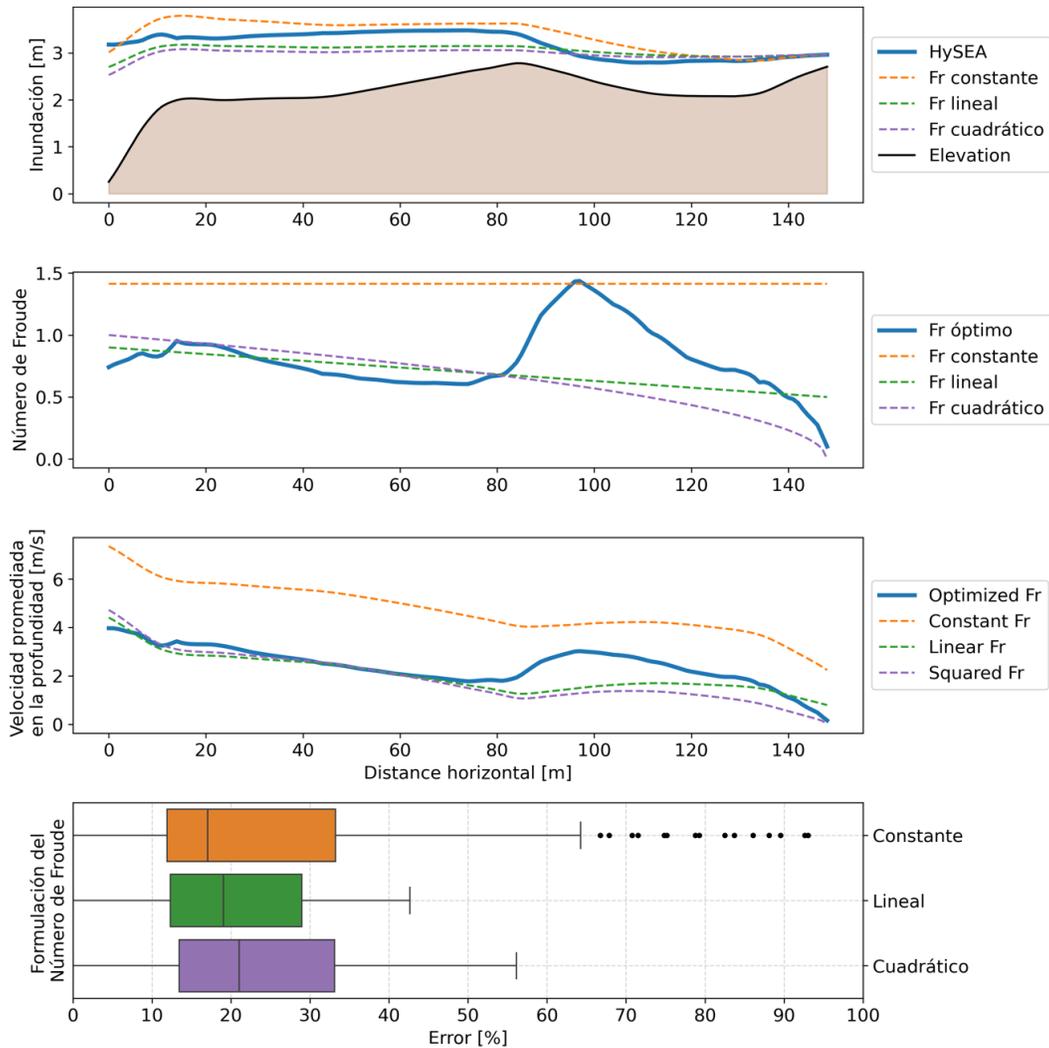
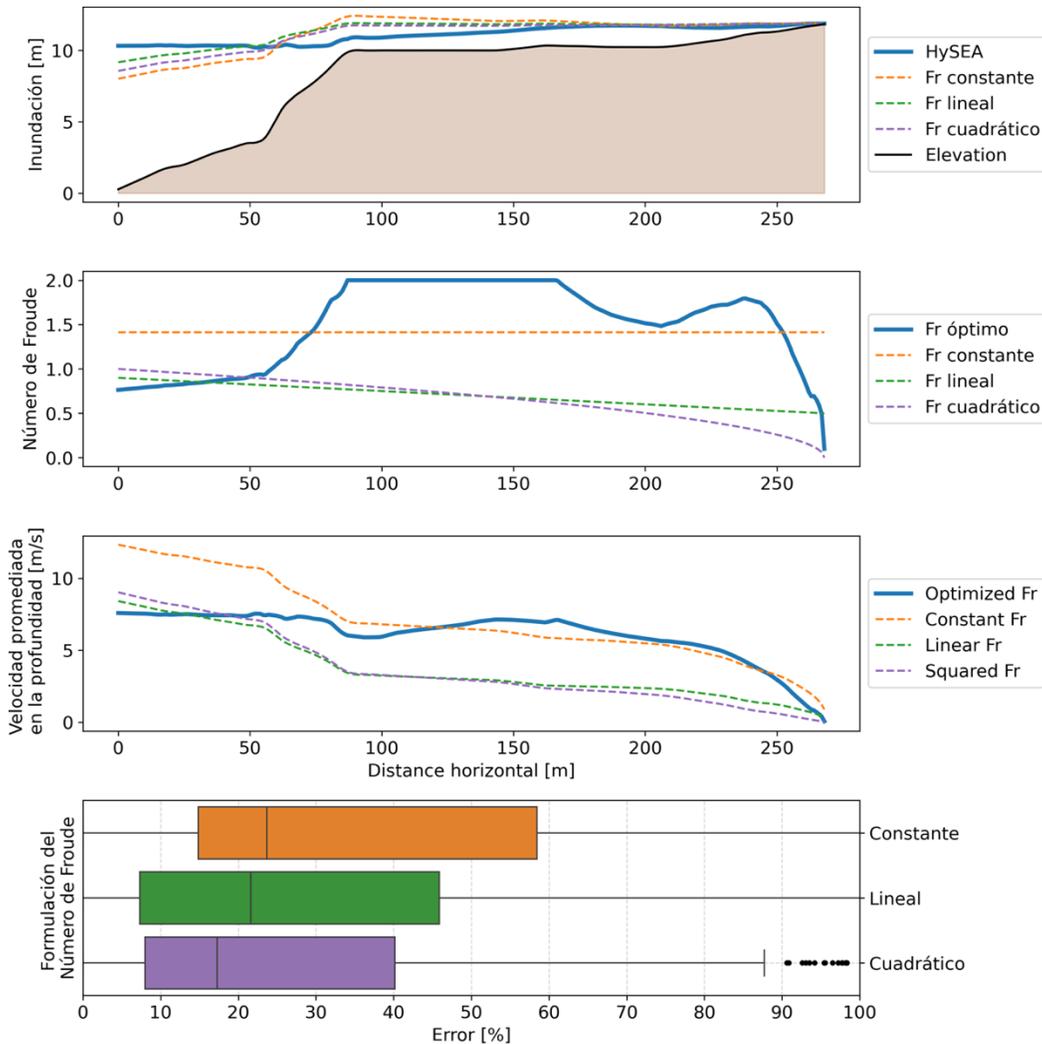
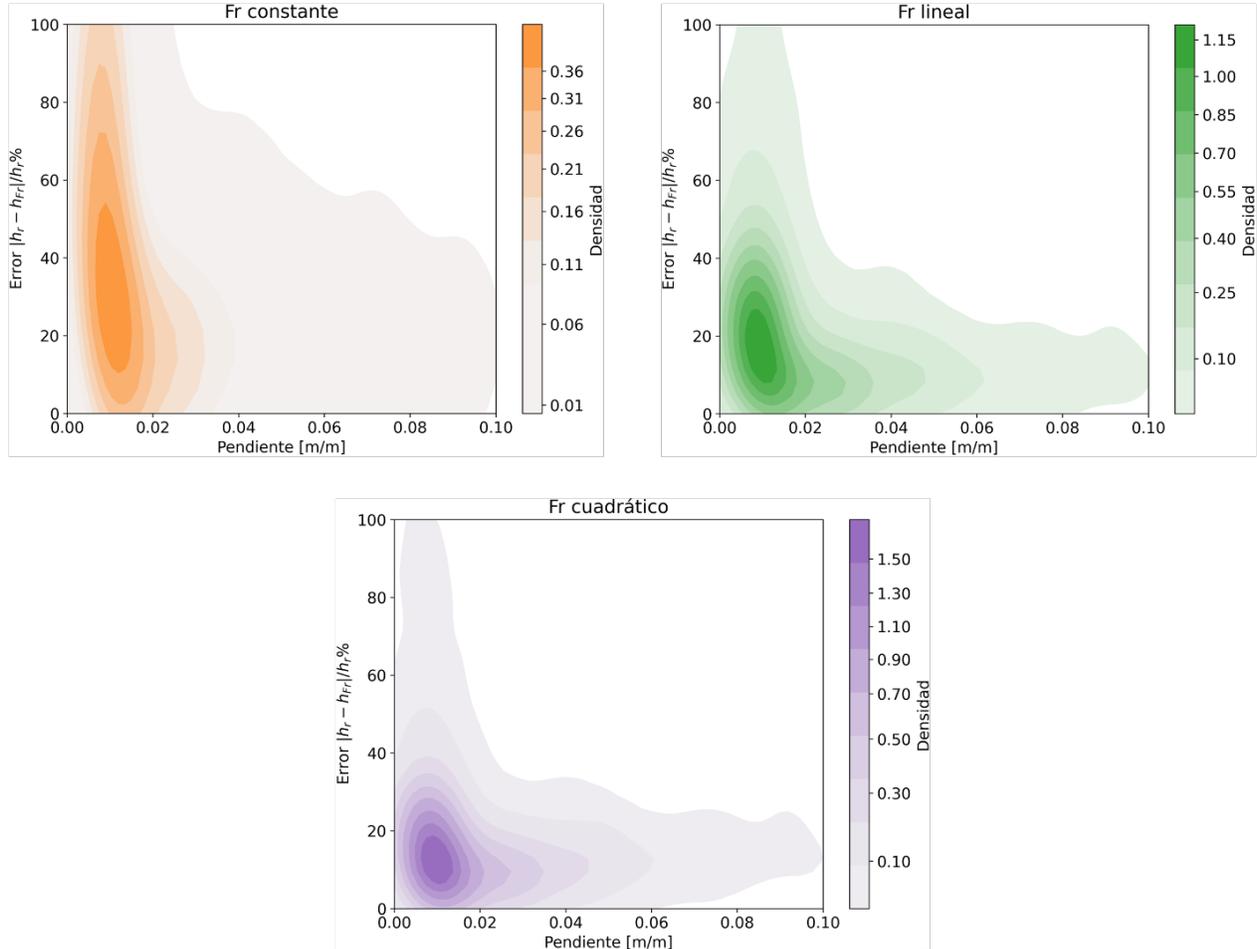


Figura 9: Comparación de altura de inundación, número de Froude, velocidad y error a lo largo del transecto 100 para el escenario de simulación 50.



Finalmente, se puede analizar cómo se distribuye el error de cada transecto para todos los escenarios simulados en función de la pendiente del respectivo transecto. En la Figura 10 se muestra esta distribución para cada una de las formulaciones del número de Froude, donde dada la distribución de pendientes de los transectos, el error está concentrada hacia pendientes menores a 0.02 m/m para los tres ejemplos. La distribución asociada al número de Froude constante está asociado a un mayor error, entorno a un 35%, lo cual concuerda con investigaciones previas (Kriebel, 2017). Mientras que para la formulación lineal y cuadrática del número de Froude se alcanza un error 20% y 15%, respectivamente. Por otro lado, en las tres parametrizaciones, errores mayores al 50% son asociados a pendientes menores a 0.02 m/m y el error se mantiene entorno a la media para pendientes mayores a este umbral.

Figura 10 : Distribución de error de altura de inundación según pendiente de transecto.



5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha presentado la aplicación del método EGLA propuesto la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) en la Bahía de Coquimbo, en la cual se analizaron tres formulaciones diferentes del número de Froude, parámetro primordial de esta metodología.

Los resultados han expuesto la importancia del número de Froude en la implementación del método EGLA. Considerando el área de estudio y dependiendo de la parametrización de este número se pueden alcanzar errores entre 15% a 35% en la estimación de la altura de inundación respecto a las simulaciones numéricas. Esto toma aún más relevancia al considerar que esto puede inducir en subestimaciones o sobrestimaciones de la altura de inundación, la cual corresponde a un parámetro de diseño para estimar fuerzas hidrodinámicas que afectarían estructuras y/o la planificación de la ciudad en análisis.

Lo anterior muestra la necesidad de explorar nuevas parametrizaciones del número de Froude para mejorar la estimación de la altura de inundación respecto a las simulaciones o nuevas

técnicas asociadas a machine learning para la estimación del número de Froude. Gracias al avance de estas metodologías, sería interesante poder resolver la ecuación de balance de energía según el transecto y sus respectivas condiciones de borde mediante redes neuronales con información física (Wang, 2023).

6 REFERENCIAS

- FEMA. (2007). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners*.
- Smart. (2016). *Estimating tsunami run-up*. 10.1007/s11069-015-2052-8: Natural Hazards.
- ASCE/SEI 7-22, 2. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-22*. American Society of Civil Engineers.
- ASCE/SEI 7-16, 2. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16*. American Society of Civil Engineers.
- Chock, G. (2016). *Design for Tsunami Loads and Effects in the ASCE 7-16 Standard*. Journal of Structural Engineering.
- Kimpton, T. (2024). *A rapid simplified method for determining tsunami inundation extent based on energy conservation*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering.
- Wiebe, D. (2013). *Tsunami Inundation: Estimating Damage and Predicting Flow Properties*. Oregon State University.
- Kriebel. (2017). *Energy Method for Approximating Overland Tsunami Flows*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- Naito. (2016). *Shipping-container impact assessment for tsunamis*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- Tada. (2018). *Energy Grade Line Analysis of Tsunami run-up on the Sendai Plain after the 2011 Tohoku earthquake*. Coastal Engineering.
- Makinoshima, F. (2020). Tsunami evacuation processes based on human behaviour in past earthquakes and tsunamis: A literature review.
- Catalán. (2024). Classification of Bays based on Resonant Response to Tsunamis: The Case of Chile. *Enviado a Journal of Geophysical Research*.
- Paulik. (2021). The 16 September 2015 Illapel Earthquake and Tsunami: Post-Event Tsunami Inundation, Building and Infrastructure Damage Survey in Coquimbo, Chile. *Pure and Applied Geophysics*.
- Macías. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. *Pure Appl. Geophys.*
- Estrada et al. (2024). Forward energy grade line analysis for tsunami inundation mapping. *enviado a Coastal Engineering*.