

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**COMPLEX TSUNAMI MODELLER (CTM): SIMULADOR DE FLUJO DE
TSUNAMI REALISTA BIDIRECCIONAL A ESCALA**

RAFAEL ARÁNGUIZ M.¹
OSCAR LINK L.²
KAREN ROJAS T.³

RESUMEN

Los tsunamis representan un peligro costero de gran impacto, cuya compleja hidrodinámica resulta difícil de reproducir en laboratorio. Los métodos tradicionales de generación de ondas presentan limitaciones para simular de forma realista tanto la inundación como el retiro del flujo. En este trabajo se presenta el Complex Tsunami Modeller (CTM), un nuevo sistema experimental implementado en el canal de olas de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), capaz de generar flujos bidireccionales de tsunami con control automatizado de profundidad de flujo y velocidad. Para definir las condiciones de frontera, se utilizó una base de datos probabilística de escenarios sintéticos de tsunami, desde la cual se caracterizaron perfiles temporales de profundidad y velocidad. El sistema CTM fue calibrado y validado en ensayos sobre lecho fijo, demostrando una buena representación de los perfiles hidrodinámicos deseados. Este sistema constituye una herramienta versátil para futuras investigaciones experimentales sobre socavación, impacto de escombros y fuerzas en estructuras costeras bajo flujo transiente.

¹ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Investigador CIGIDEN - email: raranguiz@ucsc.cl

² Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – email: olink@udec.cl

³ Estudiante Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción – email: krojas@ing.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis constituyen uno de los peligros costeros más destructivos, generados comúnmente por grandes terremotos en zonas de subducción. Eventos recientes como el tsunami del Océano Índico de 2004, el tsunami de Tohoku en Japón en 2011 y el tsunami de 2010 en Chile centro-sur han evidenciado su potencial destructivo, con miles de pérdidas humanas y daños masivos a la infraestructura costera (Aránguiz et al., 2019; Contreras & Winckler, 2013; Fritz et al., 2011). Estos eventos han puesto en evidencia la vulnerabilidad de muchas comunidades costeras y la necesidad urgente de mejorar el conocimiento sobre los procesos físicos asociados a la inundación y retirada del flujo de tsunami sobre el continente.

El estudio de los tsunamis ha avanzado significativamente a través de múltiples enfoques, incluyendo observaciones de campo (Aránguiz et al., 2016; Fritz et al., 2011; Suppasri et al., 2012), modelación numérica (Klapp et al. 2020; Aranguiz et al. 2024) y experimentos físicos a escala reducida (Goseberg et al., 2013). Si bien las observaciones en terreno permiten evaluar los impactos reales de los tsunamis, las limitaciones en la cantidad y calidad de datos disponibles para eventos extremos hacen que los modelos numéricos y experimentales sean herramientas fundamentales para analizar y comprender fenómenos complejos como la evolución del flujo, la socavación local o fuerzas sobre estructuras. La validación cruzada entre modelos numéricos y experimentos físicos es clave para proponer soluciones de mitigación y diseño de infraestructura más robusta. Es por ello que se han utilizado diversos métodos para replicar el comportamiento de tsunamis en laboratorio. Uno de los enfoques más comunes ha sido el uso de olas solitarias generadas mediante sistemas de tipo pistón (Schendel et al., 2024), los cuales permiten una representación matemática sencilla, pero resultan poco representativos de las características reales de los tsunamis, especialmente debido a su limitada longitud de onda y su imposibilidad de controlar de manera independiente altura y período (Goseberg et al., 2013; Madsen et al., 2008). Por otro lado, los métodos de tipo “dam-break”, donde se libera repentinamente un volumen de agua, han sido ampliamente utilizados para estudiar impactos de tsunami (Lavictoire et al., 2014; Rajaie et al., 2023; Shafiei et al., 2016), pero presentan limitaciones para representar de forma adecuada la variación temporal del flujo y, especialmente, la fase de retiro. Finalmente, los sistemas de generación neumática han mostrado ventajas significativas en la reproducción de ondas de tsunami de largo período (McGovern et al., 2018; Rossetto et al., 2011), permitiendo un control preciso del perfil de elevación de la superficie libre. No obstante, estos sistemas aún enfrentan dificultades para simular de manera realista el flujo de retorno o drawdown.

Frente a estas limitaciones, el presente trabajo tiene como objetivo mostrar un nuevo sistema experimental de generación de flujo de tsunami bidireccional, denominado Complex Tsunami Modeller (CTM), implementado recientemente en el canal de olas de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC). Este sistema, basado en un conjunto de bombas controladas y compuertas sincronizadas, permite reproducir condiciones de flujo realistas tanto para la fase de inundación como de retirada del tsunami, con control independiente de profundidad y velocidad del flujo. En la sección 2 de metodología, se caracterizan primero las ondas de tsunami a partir de simulaciones numéricas, y luego se describen las partes del sistema y su funcionamiento para reproducir el flujo de tsunami en el canal de olas. La sección de Resultados presenta la validación experimental bajo condiciones bidireccionales con mediciones simultáneas de amplitud y velocidad, destacando

su potencial como herramienta para estudios de socavación, transporte de sedimentos y validación de modelos numéricos. Finalmente se presentan las conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización de ondas de tsunami para experimentos de laboratorio

Tradicionalmente se ha utilizado ondas solitarias para estudiar los tsunamis en laboratorio, pero la duración de la inundación generada por este tipo de ondas dura tan solo un par de segundos. Por lo tanto, la definición de condiciones hidrodinámicas realistas es esencial para el estudio experimental de los efectos de tsunamis en laboratorio. En este trabajo, se utilizaron resultados de simulaciones numéricas probabilísticas para caracterizar ondas de tsunami representativas, las cuales fueron reproducidas en laboratorio. Para ello, se utilizó una base de datos de escenarios sintéticos de tsunami desarrollada por Aránguiz et al. (2024) y Ramos et al. (2024), que combina la expansión de Karhunen–Loève con el modelo estocástico de orden reducido (SROM), permitiendo representar una amplia gama de posibles eventos tsunamigénicos a lo largo de la costa chilena (Aránguiz et al., 2024). Luego, se seleccionaron 9 localidades de interés (Arica, Iquique, Chañaral, Coquimbo, Viña del Mar, San Antonio, Constitución, Talcahuano y Coronel) y en cada una se ubicó un mareógrafo virtual en la línea de costa, desde el cual se extrajeron series temporales de nivel del mar y velocidad de corriente. En cada sitio, se identificó la onda asociada a la máxima profundidad de inundación (h_{max}), así como la evolución de la velocidad durante las fases de avance y retiro del tsunami. Considerando sólo las profundidades máximas, se realizó un análisis probabilístico siguiendo la metodología implementada en Aránguiz et al. (2024). La Figura 1-a muestra las curvas de probabilidad de excedencia de la profundidad de flujo para cada localidad. A partir de estas curvas, se construyó la relación entre período de retorno y profundidad (Figura 1b), considerando como referencia el umbral de diseño de 2.475 años (2% probabilidad de excedencia en 50 años) sugerido por la norma ASCE 7-22. Se observó una alta variabilidad entre localidades; por ejemplo, mientras Coronel presenta un h_{max} de aproximadamente 4.5 m, Chañaral alcanza valores cercanos a 10.5 m para el mismo período de retorno. Por lo tanto, en lo que sigue del trabajo, se analizará una onda de tsunami con profundidad de inundación 10.5 m en la línea de costa a una escala 1:50.

Paralelamente, se construyó una relación empírica entre profundidad y velocidad de flujo a partir de todos los sitios considerados (excluyendo Viña del Mar y Constitución, por presentar comportamientos atípicos) dada por la siguiente ecuación:

$$U = 0.1764h^{1.2968} \quad (1)$$

Esta relación, mostrada en la Figura 1c, fue ajustada mediante una ley potencial y permite estimar la velocidad asociada a cualquier profundidad obtenida de manera probabilística, lo cual facilitó la definición de condiciones de frontera sin necesidad de realizar un análisis probabilístico de la velocidad.

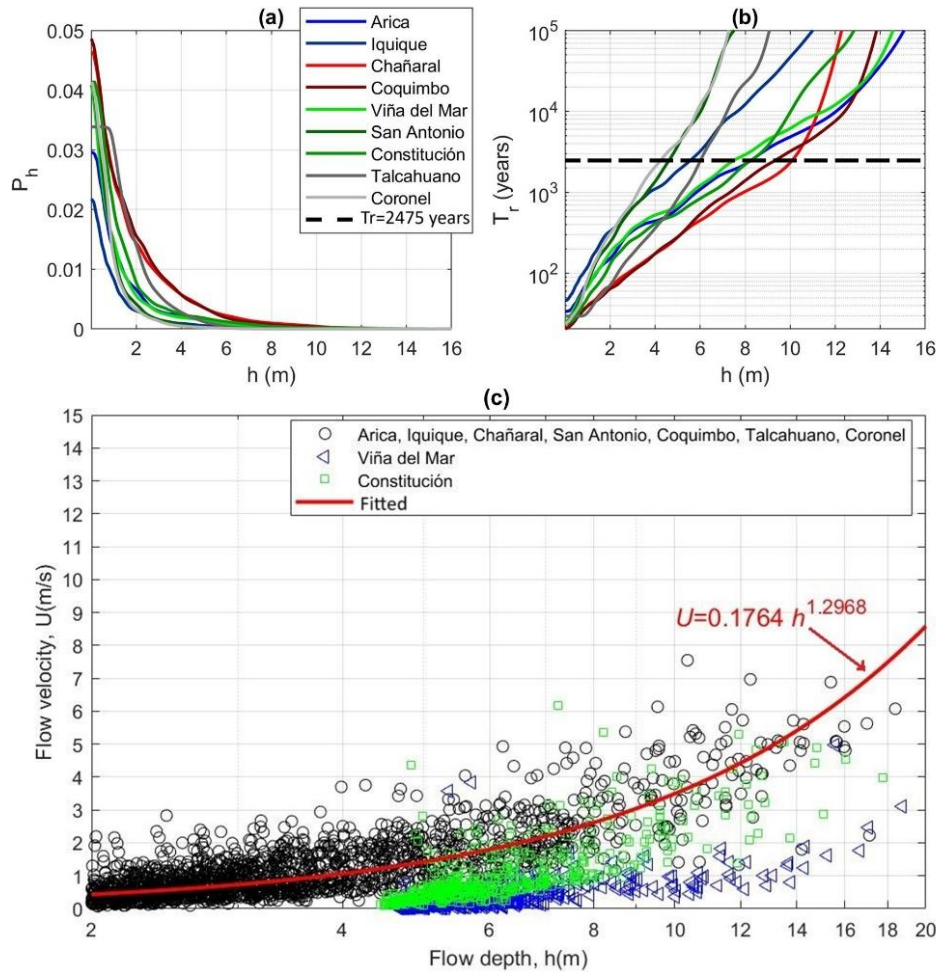


Figura 1. Análisis probabilístico de series de tiempo de tsunamis para 9 localidades chilenas. a) Curvas de probabilidad de excedencia. b) Curvas de periodo de retorno. c) Relación entre profundidad máxima y velocidad máxima del flujo para todos los datos analizados.

Además del análisis probabilístico, se caracterizaron las formas de onda temporales extraídas de los registros numéricos. La Figura 2a-c presenta ejemplos de series temporales de nivel del mar registradas en el mareógrafo virtual de Coquimbo. Este mareógrafo virtual se localizó en la línea de costa, pues el objetivo es caracterizar las variables hidrodinámicas en esta línea para poder reproducirlas en laboratorio. Si bien se observa variabilidad en los tiempos de arribo y número de ondas, se identificó que las ondas de mayor amplitud tienden a originarse en eventos del segmento sísmico 2 (Mejillones-Coquimbo) definido por Aránguiz et al. (2024). Para facilitar su comparación y posterior reproducción en laboratorio, las ondas fueron normalizadas en amplitud y tiempo, utilizando la mitad del período de la onda ($0.5 T$). Como se muestra en la Figura 2-d, las formas de onda resultantes se aproximan a una función senoidal, lo cual concuerda con observaciones previas de McGovern et al., (2019), particularmente con la onda TL49. Este comportamiento justificó la elección de un perfil senoidal como forma base para la generación de flujos en el canal experimental. Del mismo modo, respecto a la velocidad se observaron características importantes, tal como ilustra la Figura 2-e. En este caso, la velocidad máxima no coincide con el momento de máxima profundidad, sino que ocurre en promedio en $1/3$ del tiempo de inundación, cuando la altura

es cercana a $2/3$ de h_{max} . Esta desincronización, reconocida en la normativa ASCE 7-22 (ASCE, 2022), representa un aspecto clave a replicar en condiciones experimentales. Para ello, se definió una función de velocidad adimensional compuesta por dos tramos: un ascenso parabólico durante la fase de avance y un descenso cúbico en la fase de retiro, partiendo de velocidad cero en el punto de máxima inundación. Esta formulación permite reproducir perfiles de velocidad consistentes con observaciones numéricas y de campo, manteniendo sincronía con la evolución de la profundidad. Las curvas azules en las figuras 2d y 2e son usadas para construir las funciones objetivos utilizadas para comparar los resultados experimentales.

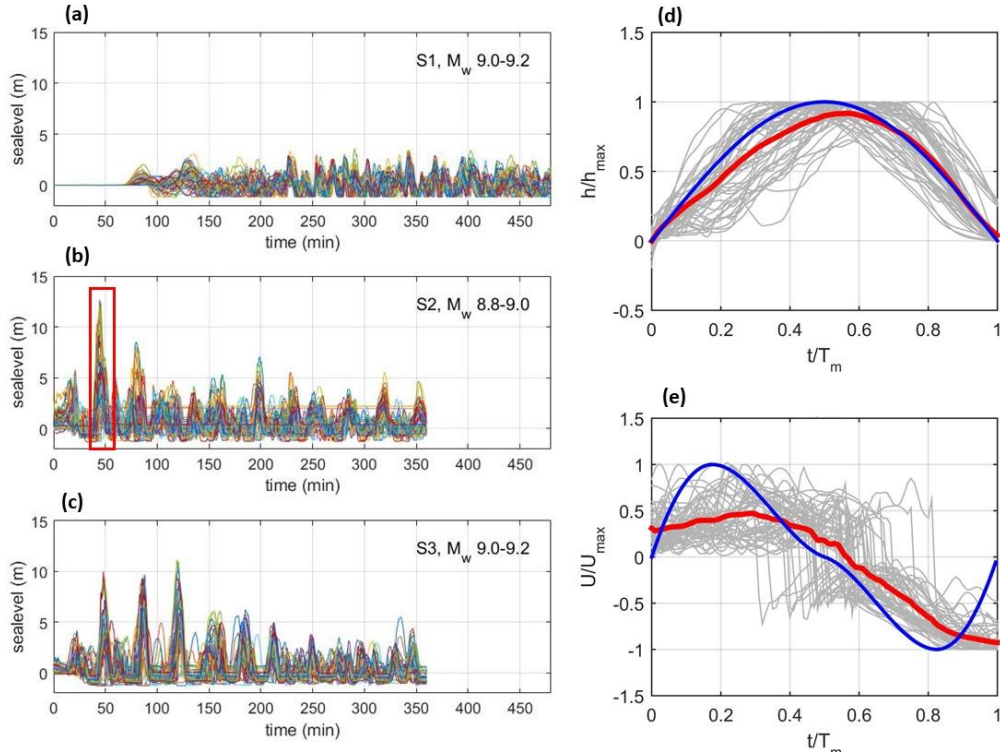


Figura 2. Análisis de series de tiempo de tsunami en mareógrafo virtual localizado en la línea de costa en Coquimbo. a) Simulaciones de eventos de magnitud 9.0 a 9.2 en segmento sísmico 1 (Pisco-Mejillones), b) Simulaciones de eventos de magnitud 8.8 a 9.0 en segmento sísmico 2 (Mejillones-Coquimbo), c) Simulaciones de eventos de magnitud 9.0 a 9.2 en segmento sísmico 3 (Coquimbo-Arauco), d) Profundidad adimensional, líneas grises representan los eventos individuales, línea roja es un valor promedio, y línea azul es la aproximación usada en este estudio. e) Velocidad adimensional.

Finalmente, para asegurar viabilidad experimental, se adoptó un período representativo de 43 minutos (escala prototipo), el cual se encuentra dentro del rango de períodos naturales observados en bahías chilenas, como por ejemplo la Bahía de Concepción (28–98 min; Aránguiz et al., 2019). Este período fue escalado para su implementación en el canal de olas, permitiendo reproducir de forma realista las características principales del flujo, incluyendo su asimetría temporal y su carácter bidireccional. De este modo, es posible definir una profundidad de flujo en el prototipo de 10.5 m (representativo de un tsunami con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años) y una velocidad de flujo de 3.7 m/s a partir de la ecuación 1. Sin embargo, se puede observar que la velocidad de flujo varía en un rango 2.5-5.5 m/s. Considerando similitud de Froude y una escala 1:50, se obtienen las variables hidrodinámicas mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables hidrodinámicas del tsunami en el prototipo y en el modelo a escala

Variable	Escala prototipo	Escala modelo
Profundidad	10.5 m	0.21 m
Velocidad	3.7 m/s	0.53 m/s (0.35-0.78 m/s)
Periodo	45 min	368 s

2.2 Sistema de generación bidireccional Complex Tsunami Modeller (CTM)

Para simular de forma realista los procesos de inundación y retiro de un tsunami en un entorno controlado, se desarrolló un nuevo sistema experimental denominado Complex Tsunami Modeller (CTM). Este sistema fue implementado en el canal de olas de 20 m de largo, 0.77 m de ancho y 1.2 m de profundidad de la (UCSC). El CTM permite generar flujos bidireccionales con control independiente de la profundidad y velocidad del flujo, mediante la combinación de un sistema mecánico de bombas y compuertas, y un sistema automatizado de control de procesos. Un esquema representativo del sistema se muestra en la Figura 3.

El sistema mecánico está compuesto por dos bombas centrífugas de 30 HP (Figura 3b) con variador de frecuencia, conectadas a un estanque de 10 m³ que alimenta el canal mediante dos entradas de flujo opuestas. Cada entrada cuenta con secciones rectificadoras de flujo (Figura 3c) para reducir las perturbaciones en el flujo y obtener un flujo más uniforme a la entrada de la sección de medición de variables hidrodinámicas. Cuatro compuertas motorizadas complementan el sistema: dos compuertas emergentes ubicadas en los extremos de la sección de prueba controlan el nivel del agua y funcionan mediante la acción de un motor stepper (Figura 3g), mientras que otras dos compuertas de descarga están operadas mediante un sistema neumático para abrir o cerrar y permitir el flujo de retorno al estanque (Figura 3h).

Para controlar todos los elementos del canal, se implementó un sistema de control de procesos. Este sistema se desarrolló usando una plataforma Siemens TIA Portal V17, y consiste en un PLC S7-1200 con pulsos de salida de alta velocidad para operar los 2 motores stepper, dos drivers Sinamics G120X de 24kW con interfase PROFINET para controlar las bombas con caudal variable, un ET200SP para recibir señales desde los instrumentos de medición, y un computador con Windows 10 Pro de 16Gb RAM y 1Tb de SSD para operar y sistema de control de procesos (Figura 3e). También se utilizó una aplicación SCADA desarrollada en la plataforma WinCC Profesional TIA Portal, la que se instaló en el notebook y conectó mediante ethernet al PLC S7-1200.

El sistema CTM permite, además, generar trenes de ondas de tsunami mediante la repetición secuencial de eventos con diferentes combinaciones de amplitud y período. Esta capacidad de reproducir condiciones de flujo reversibles y programables, constituye una innovación relevante en el estudio experimental de tsunamis, particularmente para investigaciones sobre socavación, transporte de sedimentos y validación de modelos numéricos hidrodinámicos bajo condiciones transientes.

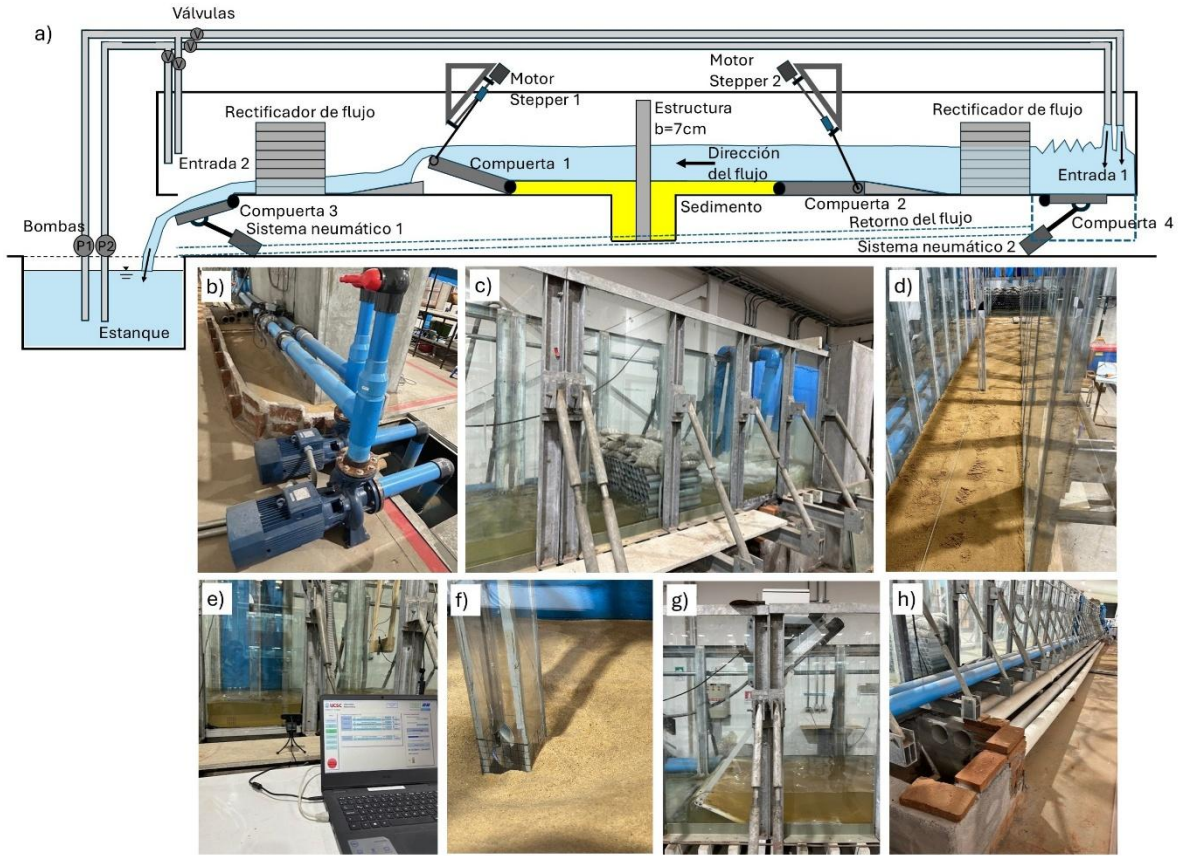


Figura 3. Esquema del sistema de simulación de flujo de tsunamis. a) Canal de olas y elementos que lo componen, b) Bombas y vista parcial del estanque de 10 m³, c) Vista de los rectificadores de flujo, d) Vista interior del canal, e) Zona de medición y notebook con software de operación, f) Ejemplo de columna de acrílico con arena para ensayos de socavación, g) Vista lateral de una compuerta emergente y motor stepper, h) Vista de las tuberías del flujo de retorno al estanque.

2.3. Fases de generación del flujo bidireccional

El sistema CTM fue diseñado para reproducir el comportamiento bidireccional del flujo de tsunamis en laboratorio, replicando tanto la fase de inundación como la de retiro (o drawdown), mediante un control sincronizado de caudal, profundidad y sentido del flujo. El proceso completo de generación del flujo tipo tsunami en el CTM podría dividirse en cinco fases:

i) Inicio de la inundación

El ciclo comienza con el accionamiento de las bombas, las cuales inyectan agua desde el estanque hacia el canal a través de la entrada ubicada en el extremo derecho de la sección de prueba (Entrada 1 en Figura 3a). En esta etapa, las compuertas emergentes 1 y 2 se encuentran en posición baja (alineadas con el lecho del canal), permitiendo el paso libre del flujo. Simultáneamente, la compuerta de descarga 3 (Compuerta 3 en Figura 3a), ubicada aguas abajo del flujo, se mantiene completamente abierta, facilitando el retorno del flujo al estanque y la recirculación del agua. A medida que el caudal se incrementa gradualmente conforme al perfil objetivo y que la compuerta emergente 1 sube, se va generando una onda creciente de profundidad y velocidad según la función objetivo dada en la figura 2d y e. Es decir, hay una

función objetivo para la profundidad (función sinusoidal con amplitud máxima de 0.21 m) y otra función objetivo para la velocidad (con velocidad máxima de 0.53 m/s).

ii) Acumulación de agua (fase de cierre posterior)

La profundidad del flujo se midió mediante una cámara HD de 30fps y una regla transparente adosada al vidrio lateral, y simultáneamente se midió velocidad usando dos instrumentos distintos: Velocímetro Global Water FP111 y un velocímetro electromagnético Valeport 801. En ambos casos, la velocidad se midió a una distancia de 3cm desde el fondo. Como los instrumentos de velocidad muestran las mediciones instantáneas en una pantalla, también se utilizó una cámara HD de 30fps para registrar las mediciones de manera simultánea con las mediciones de profundidad mediante el software OBS Studio (Open Broadcaster Software). Las mediciones de profundidad y velocidad se realizaron en el centro del canal, donde posteriormente se instalará una columna transparente para medir socavación. A medida que se va desarrollando el perfil de profundidad y velocidad deseados, la compuerta de descarga 3 se cierra en determinado instante, interrumpiendo la salida del agua hacia el retorno. Esto provoca una acumulación progresiva de volumen en la sección izquierda del canal, generando un aumento controlado de la profundidad aguas arriba de la compuerta emergente 1. Durante esta fase, la velocidad del flujo comienza a disminuir, acercándose al punto de estancamiento a medida que las profundidades a ambos lados de la compuerta se van igualando.

iii) Momento de máxima inundación (estancamiento)

Cuando se detienen las bombas y cesa el caudal, la compuerta emergente 1 ha alcanzado su altura máxima, y el volumen acumulado al lado izquierdo de esta compuerta hace que el nivel de agua a ambos lados de la compuerta sea el mismo. El sistema alcanza la máxima profundidad de inundación, con velocidad nula en el centro del canal. Este instante corresponde al punto de transición entre la fase de avance y la de retroceso del flujo.

iv) Inicio del retorno

Una vez que se ha alcanzado la profundidad máxima, las válvulas cambian la dirección del flujo, tal que el agua ingresará ahora por la entrada opuesta (Entrada 2 en Figura 3a). Paralelamente, la compuerta emergente 2 se eleva hasta alcanzar el mismo nivel de la compuerta 1, y esta última compuerta desciende hasta el fondo del canal. Además, la compuerta de descarga 4 (Compuerta 4 en Figura 3a), ubicada en el extremo derecho del canal, se abre, permitiendo descargar el volumen acumulado al lado derecho de la compuerta emergente 2. Esta combinación de acciones prepara el flujo de retorno del tsunami.

v) Fase de vaciamiento

Durante la fase final del ciclo, el nivel de agua en el canal disminuye progresivamente, dado que la compuerta emergente 2 regula el flujo para mantener la sincronización con el perfil descendente de la función sinusoidal. Al mismo tiempo, las bombas inyectan flujo a través de la entrada 2 para regular tanto el nivel como la velocidad. El exceso de agua es evacuado por la compuerta de descarga 4 y vuelve al estanque para recirculación. Si se desea generar un tren de ondas, el sistema puede reconfigurarse automáticamente para repetir el ciclo con nuevas condiciones de amplitud o período.

Estas fases se programan y sincronizan mediante un reloj interno del sistema de control, el cual coordina la activación de cada componente mecánico (bombas y compuertas) en función

de las series temporales definidas durante la etapa de calibración. La capacidad del sistema CTM para controlar la profundidad y velocidad del flujo en ambas direcciones permite reproducir de buena manera las condiciones hidrodinámicas de un tsunami en laboratorio, incluyendo su comportamiento asimétrico y transiente.

3. RESULTADOS

Una vez calibrado el sistema CTM para reproducir un flujo de tsunami bidireccional, se realizaron experimentos sobre lecho fijo con el objetivo de validar su capacidad para reproducir los perfiles temporales de profundidad y velocidad definidos previamente. La Figura 4 presenta una comparación entre las señales objetivo (funciones de referencia) y los datos medidos en 7 repeticiones experimentales (2 mediciones de velocidad con FP111 y 5 con Valeport 801), incluyendo tanto la fase de inundación como reversa del flujo.

En la Figura 4-a se observa que la evolución temporal de la profundidad de flujo es reproducida con aceptable exactitud durante la primera mitad del ciclo (fase de inundación), con una concordancia muy cercana a la función senoidal impuesta. Sin embargo, durante la fase de retiro (alrededor de $t = 140\text{--}160$ s), se evidencia una disminución de la exactitud, ya que se produce una disminución de la profundidad más rápida de lo esperado, seguida por una profundidad residual que no retorna completamente a cero. Esta discrepancia se atribuye a las limitaciones geométricas del canal y al tiempo requerido para drenar completamente el volumen acumulado en el extremo izquierdo del canal. La Figura 4-b muestra el error medio absoluto (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), donde se puede observar que el error absoluto es menor a 2cm durante la fase de inundación, y entre 2 y 3cm en la fase de flujo retorno. De este modo, las siete repeticiones demuestran que el experimento tiene una exactitud aceptable y muy buena precisión, tanto de la fase de inundación como de retiro del flujo.

En cuanto a la velocidad de flujo (Figura 4-c), los datos medidos capturan adecuadamente tanto la magnitud como el momento de ocurrencia de la velocidad máxima, la cual se alcanza aproximadamente a un tercio del tiempo hasta la inundación máxima, en línea con las condiciones hidrodinámicas observadas en tsunamis reales. Si bien se observa una buena precisión de las mediciones, la forma completa de la curva de velocidad presenta ciertas diferencias respecto a la función objetivo, especialmente durante la fase de desaceleración. Es importante notar que la velocidad máxima medida alcanzó los ~ 0.75 m/s en la fase de inundación, superior al valor esperado de 0.53 m/s. Sin embargo, la Figura 1-c muestra que la velocidad del flujo puede variar entre 2.5 y 5.5 m/s para una profundidad de 10.5 m en el prototipo, lo que equivale a 0.35 a 0.78 m/s en el modelo. Por lo tanto, la máxima velocidad medida en el experimento está dentro del rango posible de velocidad máxima del flujo durante la inundación. En cuanto a la velocidad máxima durante la fase de retirada del tsunami, se midieron valores entre 0.48 y 0.64 m/s, lo que concuerda mejor con el rango esperado. La figura 4-d muestra el error asociado a las mediciones de velocidad, donde se puede observar que durante la inundación, y en el momento de la máxima velocidad, el error es menor a 0.2 m/s ($t=11\text{--}32$ s). La diferencia entre los valores medidos y los esperados pueden deberse a interacciones entre el movimiento de compuertas y el flujo recirculante. Sin embargo, a pesar de estas discrepancias menores, los experimentos demostraron que el

sistema CTM es capaz de reproducir de forma consistente y repetible las condiciones hidrodinámicas prescritas en términos de profundidad y velocidad, lo que valida su aplicabilidad para estudios experimentales de procesos como socavación, transporte de sedimentos y validación de modelos numéricos bajo condiciones de flujo transientes.

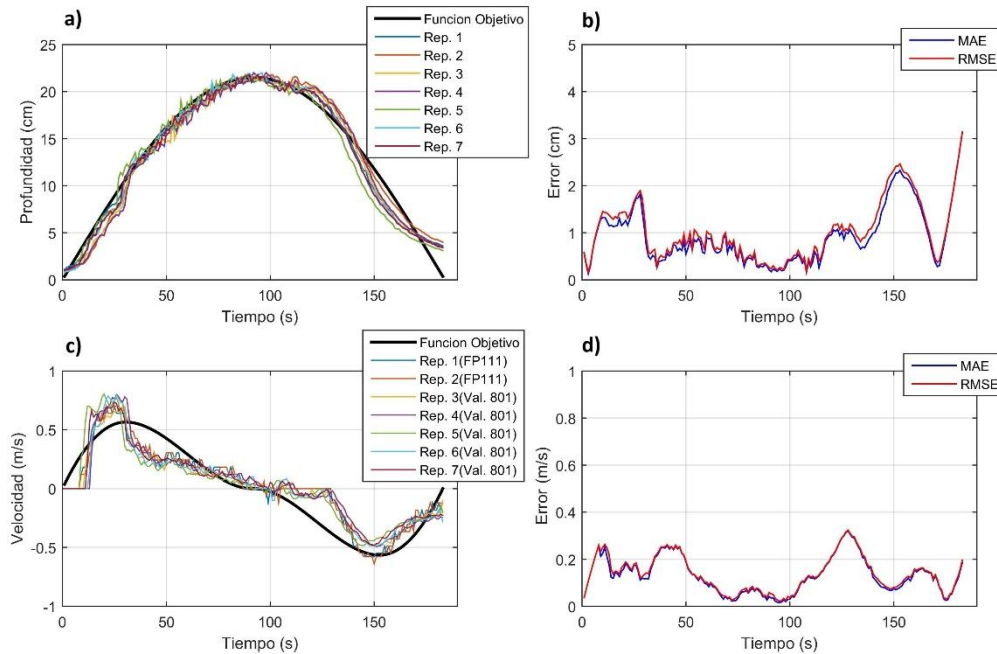


Figura 4. Comparación de variables medidas con funciones objetivo. a) Profundidad, b) Error asociado a la profundidad, c) Velocidad de flujo, d) Error asociado a la velocidad.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo presentó el diseño, implementación y validación experimental de un nuevo sistema de generación de flujo de tsunami bidireccional, denominado Complex Tsunami Modeller (CTM), instalado en el canal de olas de la UCSC. A partir de una caracterización probabilística de ondas de tsunami basada en simulaciones estocásticas, se definieron condiciones hidrodinámicas representativas, las cuales fueron reproducidas en términos de profundidad y velocidad. El sistema CTM demostró ser capaz de generar perfiles temporales realistas tanto para la fase de inundación como para el flujo de retorno, incluyendo el desfase característico entre los máximos de profundidad y velocidad. Estos resultados validan la capacidad del sistema como plataforma experimental versátil para estudios relacionados con amenaza de tsunamis.

Como líneas futuras de investigación, se contempla la aplicación del CTM en ensayos con lecho móvil para analizar la evolución de procesos de socavación en estructuras costeras. Asimismo, se explorará su uso en la evaluación experimental del impacto de escombros

flotantes sobre edificaciones y en la cuantificación de fuerzas hidrodinámicas en estructuras bajo condiciones de flujo transiente. Estos estudios permitirán avanzar en la comprensión física de los efectos de tsunami en entornos urbanos y contribuirán al desarrollo de criterios de diseño más seguros y resilientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento del Proyecto ANID/Fondecyt 1210496. También se agradece la contribución y apoyo constante de Rodrigo Pinto de la empresa RP Ingeniería Ltda. R.A agradece también el apoyo de Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo, CIGIDEN, ANID/1523A0009 FONDAP 2023.

REFERENCIAS

Aranguiz, R., Catalán, P. A., Cecioni, C., Bellotti, G., Henríquez, P., & González, J. (2019). Tsunami resonance and spatial pattern of natural oscillation modes with multiple resonators. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1029/2019jc015206>

Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P., A., Cienfuegos, R., Yagi, Y., Okuwaki, R., Urra, L., Contreras, K., Del Rio, I., & Rojas, C. (2016). The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, *173*(2), 333–348. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1225-4>

Aranguiz, Rafael, Ramos, M., Sepúlveda, I., & Villagra, P. (2024). A new generation of tsunami inundation maps of Chilean cities: tsunami source database and probabilistic hazard analysis. *Coastal Engineering Journal*, *66*(2), 361–379. <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2326269>

ASCE. (2022). *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE/SEI 7-22. ACSE.

Contreras, M., & Winckler, P. (2013). Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y Proyectos*, *14*, 6–19. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132013000200001>

Fritz, H., Petroff, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S., Meneses, G., Valderas-Bermedo, C., Ebeling, C., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Dominguez, J., & Synolakis, C. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, *168*, 1989–2010. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0283-5>

Goseberg, N., Wurpts, A., & Schlurmann, T. (2013). Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. *Coastal Engineering*, *79*, 57–74. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.006>

Klapp, J., Areu-Rangel, O. S., Cruchaga, M., Aránguiz, R., Bonasia, R., Godoy, M. J., & Silva-Casarín, R. (2020). Tsunami hydrodynamic force on a building using a SPH real-scale numerical simulation. *Natural Hazards*, *100*(1). <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03800-3>

Lavictoire, A., Nistor, I., & Rennie, C. O. (2014). Bore-induced local scour around a circular structure. In *MSc Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Ontario*.

Madsen, P. A., Fuhrman, D. R., & Schäffer, H. A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *113*(12). <https://doi.org/10.1029/2008JC004932>

McGovern, D. J., Robinson, T., Chandler, I. D., Allsop, W., & Rossetto, T. (2018). Pneumatic long-wave generation of tsunami-length waveforms and their runup. *Coastal Engineering*, *138*(March), 80–97. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.006>

McGovern, D. J., Todd, D., Rossetto, T., Whitehouse, R. J. S., Monaghan, J., & Gomes, E. (2019). Experimental observations of tsunami induced scour at onshore structures. *Coastal Engineering*, *152*(January), 103505. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103505>

Rajaie, M., Azimi, A. H., Nistor, I., & Rennie, C. D. (2023). Experimental Investigations of the Impact of Tsunami-Like Hydraulic Bores on a Square Vertical Structure. II: Local Scour. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *149*(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000732](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000732)

Ramos, M., Aranguiz, R., & Bull, M. (2024). Tsunami inundation limit based on probabilistic analysis of runup and inundation distance. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1–26.

Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I., & Robinson, D. I. (2011). Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator. *Coastal Engineering*, *58*(6), 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.012>

Schendel, A., Schimmels, S., Welzel, M., April-lequeré, P., Mohammadian, A., Krautwald, C., Stolle, J., Nistor, I., & Goseberg, N. (2024). Spatiotemporal Scouring Processes around a Square Column on a Sloped Beach Induced by Tsunami Bores. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, *150*(3). <https://doi.org/10.1061/JWPED5.WWENG-2052>

Shafiei, S., Melville, B. W., & Shamseldin, A. Y. (2016). Experimental investigation of tsunami bore impact force and pressure on a square prism. *Coastal Engineering*, *110*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.12.006>

Suppasri, A., Koshimura, S., Imai, K., Mas, E., Gokon, H., Muhari, A., & Imamura, F. (2012). Damage characteristic and field survey of the 2011 great east Japan tsunami in miyagi prefecture. *Coastal Engineering Journal*, *54*(1). <https://doi.org/10.1142/S0578563412500052>