

XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016

MODELACIÓN CFD DE ONDAS TSUNAMI EN RESERVORIOS, LAGOS Y
MINAS CAUSADAS POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS

José A. Vásquez¹, Guilherme de Lima²

¹Northwest Hydraulic Consultants (NHC), Canadá, jvasquez@nhcweb.com

²NHC Brasil Consultores; Sao Paolo, Brasil. glima@nhcweb.com

RESUMEN:

Los deslizamientos de laderas en cuerpos de agua como ríos, bahías, lagos, reservorios o minas a tajo abierto inundadas, pueden generar ondas de impulsión tipo tsunami de gran altura, con valores registrados de hasta 524 metros de altura. Estos eventos, aunque infrecuentes pueden causar daños a infraestructura y pérdida de vidas humanas, como ha sido trágicamente demostrado en el Perú y varios países del mundo. Las terribles consecuencias que estas ondas pueden causar hacen imperativo contar con métodos prácticos y confiables (comprobados) que permitan predecir las características hidrodinámicas de estas ondas, como su altura máxima de remonte (*runup*) y velocidad de propagación. Con dicho fin, hemos verificado las capacidades del modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) Flow-3D usando mediciones realizadas en un modelo físico. Los resultados muestran que Flow-3D es capaz de simular de manera muy realista las fases de generación, propagación y remonte (*runup*) de ondas tsunami causadas por deslizamientos de laderas. Las predicciones de Flow-3D del remonte (*runup*) de las ondas cayeron dentro del rango de $\pm 10\%$ respecto a los valores medidos en el modelo físico. A manera de demostración, presentamos también algunos ejemplos ilustrativos de aplicaciones prácticas de Flow-3D en proyectos reales en minas a tajo abierto inundadas.

ABSTRACT:

Landslides falling into water bodies such as rivers, bays, lakes, reservoirs or water-filled mine pits can generate impulse waves, known as tsunami waves, which have been observed to reach up to 524 m in height. Although landslide-generated wave events are not frequent, their effects can be devastating, as has been demonstrated by tragic events in Peru and other parts of the world. Considering the terrible consequences that these types of waves may cause, it is very important to have reliable methods to predict the hydrodynamic characteristics of the waves especially to predict wave run-up heights and its propagation velocity. In this article we use physical model data to demonstrate that the computational fluid dynamics (CFD) model Flow-3D is capable of simulating landslide-generated waves quite realistically. Wave run-up heights predicted by Flow-3D were found to be within $\pm 10\%$ of experimental measurements. Additionally, we show how we have applied Flow-3D in real engineering projects involving landslide-generated waves in mine pit lakes.

PALABRAS CLAVES: tsunamis; ondas; CFD; deslizamientos; Flow-3D; minas; lagos

INTRODUCCIÓN

Es muy conocido que la actividad tectónica submarinas pueden generar ondas de gran altura conocidas como tsunamis (Wikipedia 2016), la cuales pueden generar daños devastadores en zonas costeras. Sin embargo, algo menos conocido es que este tipo de ondas de impulsión también pueden generarse por avalanchas o deslizamientos de laderas, que ocurren cuando estos deslizamientos impactan a gran velocidad un cuerpo de agua. Según Heller et al. (2009), las ondas tsunami generadas por deslizamientos de laderas en cuerpos de agua (*landslide-generated waves*) experimentan las tres fases ilustradas en la Figura 1:

1. **Generación de la onda**, causada por el impacto del deslizamiento con en el cuerpo de agua
2. **Propagación de la onda**, en dirección radial desde el punto de impacto
3. **Remonte (*runup*) de la onda** en la orilla opuesta o presa, y con la posibilidad de desborde

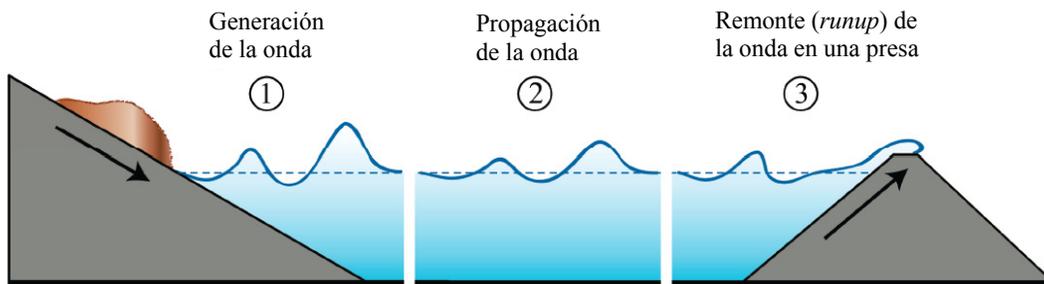


Figura 1.- Las tres fases de una onda tsunami causada por un deslizamiento aéreo (Heller et al. 2009).

Cuando el material sólido del deslizamiento impacta el agua, la desplaza y le transfiere parte de su energía cinética, generando una sobreelevación súbita en el nivel de agua (Figura 1). Esta onda inicial se propaga radialmente desde la zona de impacto, usualmente con muy poca disipación de energía. Cuando la onda llega a la orilla opuesta, parte de su energía cinética se transforma en energía potencial haciendo que la onda remonte el talud de la orilla (*runup*). En el caso de que el deslizamiento suceda en un reservorio, la onda podría sobrepasar la cresta de la presa causando inundación aguas abajo, como en el caso de Vaiont en Italia (Tabla 1). En el caso de presas de tierra, también existe el riesgo adicional que la onda pueda causar la rotura de la presa. A diferencia de las ondas tsunami clásicas de origen tectónico, las cuales típicamente alcanzan alturas del orden de 10 m (Wikipedia 2016); las ondas de tsunami causadas por deslizamientos pueden alcanzar alturas de decenas o cientos de metros. La Tabla 1 muestra algunos ejemplos históricos de ondas causadas por deslizamientos en diversos cuerpos de agua; incluyendo el número de personas que perecieron en dichos eventos.

Tabla 1.- Ejemplos de deslizamientos históricos que causaron tsunamis (Flacker e Eyzaguirre 1979; NHC 1983b; Lee y Duncan 1975; SFU 2011; Wikipedia 2016).

Año	Nombre y Ubicación	Volumen del deslizamiento [x10 ⁶ m ³]	Altura de onda [m]	Cuerpo de agua	Numero de fallecidos
2007	Lago Chehalis, Canadá	3	35	lago	-
1978	Mayunmarca, Rio Mantaro, Perú	1600	?	rio	-
1973	Attachie, Rio Peace, Canadá	14	25	rio	-
1971	Chungar, Perú	0.1	30	lago	400-600
1963	Vaiont, Italia	240	260	reservorio	2000
1958	Bahía de Lituya, Alaska, EEUU	30	524	bahía	2
1936	Lago Loen, Noruega	1	70	lago	73
1934	Tafjord, Noruega	1.5	62	fjord	44
1905	Lago Loen, Noruega	0.4	40	lago	61
1880	Haney, Rio Fraser, Canadá	1	20	rio	1
1792	Shimabara, Japón	535	100	bahía	15000+

La mayor onda de tsunami registrada hasta la fecha fue la provocada por un deslizamiento de 31 millones de metros cúbicos (Mm^3) que cayó desde 915 m de altitud en la bahía de Lituya en Alaska y generó un mega-tsunami de 524 m de altura (Miller 1960; Fritz et al. 2009). Otro ejemplo trágico sucedió en 1963 en la presa de Vaoint en Italia, donde un deslizamiento de $240 Mm^3$ que cayó desde una altura de 500 m desplazó un volumen de agua de $50 Mm^3$. La onda generada remontó en la orilla opuesta destruyendo una villa localizada a 260 m por encima del reservorio; a la vez que pasó por encima de la cresta de la presa de arco y destruyó otras villas situadas aguas abajo, matando aproximadamente 2000 personas (Flacker e Eyzaguirre 1979; Wikipedia 2016).

El 18 de marzo de 1971 se deslizaron $100,000 m^3$ de rocas en la laguna Yanahuin, localizada en la sierra central del Perú (Slingerland y Voight 1982). El deslizamiento, que incluyó bloques individuales de hasta 70 toneladas, cayó desde una altura de 400 m generando ondas de 30 m de altura, las cuales destruyeron por completo el campamento de la Compañía Minera Chungar (Figura 2), cobrando la vida de entre 400 a 600 trabajadores (Flacker e Eyzaguirre 1979). Uno de los mayores deslizamientos registrados en tiempo históricos, con un volumen de $1600 Mm^3$, ocurrió cerca del poblado de Mayunmarca en el Perú (Lee y Duncan 1975). Este deslizamiento bloqueó el río Mantaro formando una presa de 170 m de altura. Aunque no existen registros de ondas (el deslizamiento ocurrió de noche en una zona remota), dada la magnitud del deslizamiento y las experiencias en otros ríos (Tabla 1), es lógico suponer que se formaron ondas de varias decenas de metros de altura.

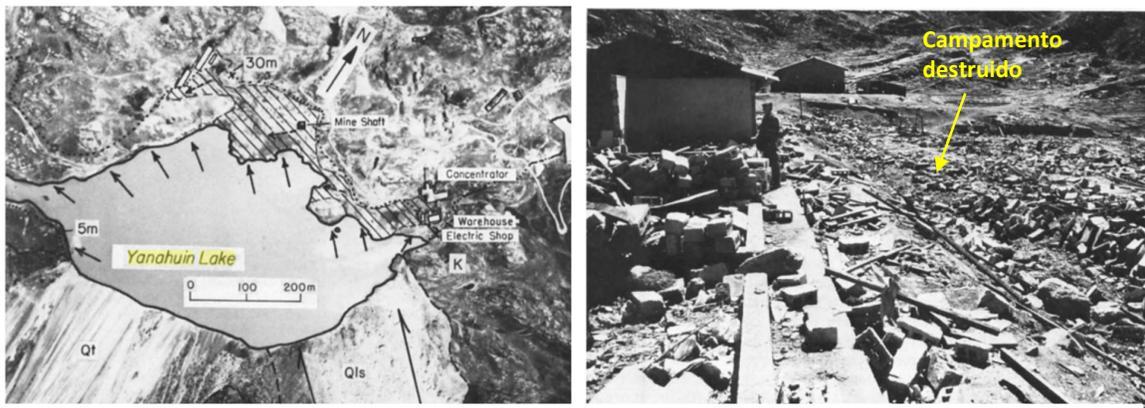


Figura 2.- Fotos del deslizamiento en la laguna Yanahuin, Perú (Flacker e Eyzaguirre 1979).

Además de reservorios y lagos naturales, otros cuerpos de agua continentales muy susceptible a ondas tsunami por deslizamiento son las minas a tajo o cielo abierto (*open pit mines*). Minas a tajo abierto que han cumplido su vida útil y ya no son explotadas pueden ser inundadas ya sea por agua subterránea o superficial, que en muchos casos llevan a la formación de lagos artificiales (Figura 3). El riesgo de tsunamis en minas abandonadas puede ser bastante alto debido a que durante la explotación de la mina y con el propósito de maximizar la extracción de mineral, los taludes excavados suelen estar muy próximos al ángulo de reposo del material, generando inestabilidades de taludes mucho mayor a los que se tendrían en taludes naturales (Figura 3).



Figura 3.- Ejemplo de una mina a tajo abierto en Brasil inundada por agua (foto José Vásquez).

Considerando las terribles consecuencias en términos de pérdida de vidas humanas (Tabla 1) y destrucción de infraestructura (Figura 2) que estas ondas pueden causar; la evaluación y gestión de sus riesgos requieren la determinación de las características hidrodinámicas de la onda, como su altura máxima de remonte (*runup*) y velocidad de propagación en cuerpos de agua (ríos, lagos, reservorios o minas a tajo abierto) donde estas ondas pudieran generarse.

Existen tres métodos posibles para evaluar la dinámica de estas ondas de impulsión: métodos analíticos (Slingerland y Voight 1982; Hughes y Berry 1991; Heller et al. 2009), modelos físicos (NHC 1976, 1983a, 1983b, 2005; Ataie-Ashtani y Nik-Khah 2008) y modelos numéricos (Raney y Butler 1975; Basu et al. 2009; Biscarini 2010; Heller et al. 2016). Las ecuaciones analíticas requieren simplificaciones importantes en las características del deslizamiento y del cuerpo de agua, que pueden no ser realistas en muchos casos prácticos, por lo que tradicionalmente se han empleado modelos físicos a escala reducida para determinar las características de las ondas en casos complejos (Figura 4). En años recientes se han empezado a usar con más frecuencia métodos numéricos, especialmente modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD), como los descritos en el presente artículo.

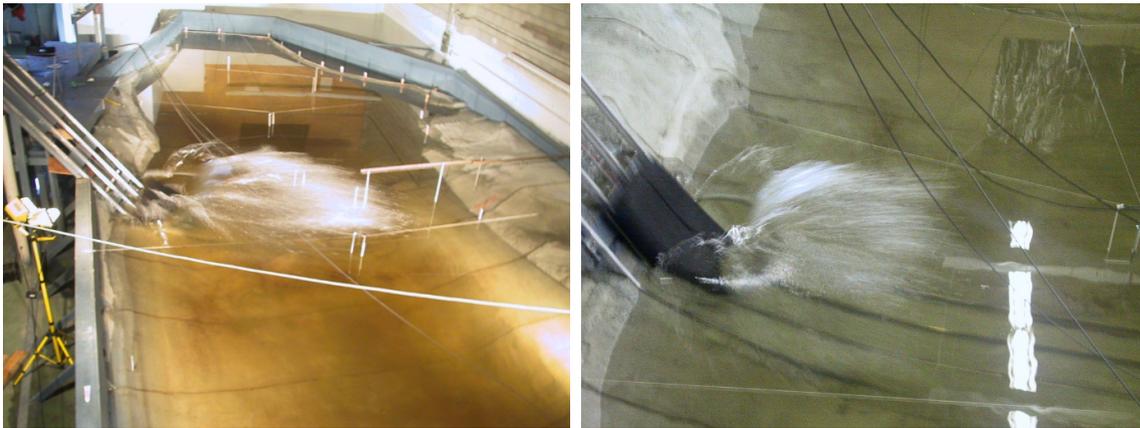


Figura 4.- Ejemplo de modelo físico de ondas causadas por deslizamientos en un lago (NHC 2005).

MODELOS NUMÉRICOS

Aunque la fase de propagación de una onda tsunami (Figura 1) puede en principio simularse usando algunos modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) de aguas poco profundas (Horsburgh et al. 2008); dichos modelos 2D convencionales no pueden simular la fase de generación de la onda causada por el impacto del deslizamiento (Figura 1), ya que carecen de un mecanismo de transferencia de momento entre el deslizamiento sólido y el agua líquida (interacción fluido-sólido). Sin embargo, un trabajo pionero en este campo fue realizado por Raney y Butler (1975).

Raney y Butler (1975) desarrollaron un modelo 2D en el plano vertical para simular la generación y propagación de ondas causadas por deslizamientos. El deslizamiento se modelaba como una deformación transitoria del fondo del cauce, el cual transmitía fuerzas de presión y viscosas al cuerpo líquido, modeladas mediante el uso de ecuaciones empíricas de arrastre. Las ondas predichas por el modelo calibrado reprodujeron muy bien las mediciones hechas en un modelo físico. A pesar de los resultados tan prometedores de este modelo especializado, su uso no llegó a ser generalizado.

En este momento las dos metodologías numéricas más empleadas para simular las tres fases de la onda tsunami (Figura 1) son modelos CFD y modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*). En los modelos SPH, el agua y el sólido son representados mediante partículas discretas que interactúan entre sí, sin el uso de mallas de cómputo. SPH se ha sido aplicado con éxito para modelar ondas tsunami (Das et al. 2009b, Heller et al. 2016); pero como es una técnica que aún está en plena etapa de investigación y desarrollo, su aplicabilidad práctica es limitada. Por otro lado, los modelos CFD se encuentran en un mayor estado de madurez y aplicación práctica. Los modelos CFD Fluent (Biscarini 2010) y Flow-3D (Basu et al. 2009b) se han aplicado a modelar el mega-tsunami de la

Bahía Lituya (Tabla 1); aunque ambos modelos sobrestimaron la altura de remonte de la ola. Das et al. (2009a) verificaron Flow-3D usando datos experimentales de ondas causadas por un deslizamiento submarino. Flow-3D ha sido el modelo elegido para realizar las simulaciones presentadas en este artículo, una breve descripción de este modelo sigue a continuación.

Modelo CFD Flow-3D

Flow-3D es un modelo CFD comercial desarrollado por la compañía *Flow Science Inc*, particularmente útil para aplicaciones en ingeniería hidráulica que requieren el cálculo de flujos con superficie libre, para lo cual Flow-3D emplea el método del volumen de fluido (VOF). A diferencia de la mayoría de modelos CFD que utilizan mallas de computo ajustadas a las fronteras físicas de los sólidos (*boundary-fitted mesh*), Flow-3D emplea una malla estructurada ortogonal en la cual los sólidos son representados usando el método Fraccional Área/Volumen de Representación de Obstáculos (FAVOR), el cual permite bloquear parcialmente las celdas de la malla según un sólido esté presente o no. Esto da mucha flexibilidad para modelar cuerpos sólidos móviles, como el caso de los deslizamientos, sin tener que regenerar la malla continuamente. Con este fin Flow-3D también cuenta con otro sub-modelo llamado Objeto Móvil General (GMO) que permite modelar objetos en movimiento. GMO permite definir en el tiempo las tres componentes espaciales de los vectores velocidad lineal (traslación) y velocidad angular (rotación) del objeto en movimiento, con lo cual se puede simular el movimiento de un sólido rígido indeformable.

COMPARACIÓN DE MODELO CFD CON UN MODELO FISICO

El modelo físico empleado para verificar Flow-3D se construyó en el laboratorio de hidráulica de *Northwest Hydraulics Consultants* (NHC), ubicado en Vancouver, Canadá. Desde hace décadas NHC ha venido realizando estudios en modelo físico de ondas generadas por deslizamientos (NHC 1976, 1983b, 2005; Hughes y Berry 1991); aunque recientemente se ha enfocado más en el uso de modelos CFD con el mismo fin (NHC 2012, 2013, 2016). Sin embargo, dado que el limitado estado de avance de la modelación CFD en este campo genera incertidumbre en los resultados, NHC (2013) construyó un modelo físico simplificado con el objetivo específico de verificar la capacidades del modelo Flow-3D para simular las tres fases de ondas generadas por deslizamientos (Figura 1). La configuración y dimensiones del modelo físico se observan en la Figura 5, el cual trata de representar aproximadamente las condiciones en un lago pequeño, ya sea natural (Figura 2) o formado por una mina abandonada (Figura 3), en el cual la onda puede remontar y reflejarse en la orilla opuesta, creando un patrón bastante complejo de ondas viajando en varias direcciones.

El modelo físico incluye una superficie inclinada a 30 grados por donde pueden deslizarse las masas sólidas que representan los deslizamientos y una orilla opuesta inclinada 45 grados (Figura 5). Los deslizamientos se simulaban usando dos bloques sólidos de diferentes longitudes, un bloque corto de 0.305 m y un bloque largo de 1.220 m (Figura 6). Cada bloque contaba con un acelerómetro más una cuerda conectada a un potenciómetro para medir el desplazamiento en el tiempo. Los niveles de agua en el canal se medían con una frecuencia de 100 Hz usando tres sondas electrónicas, mientras que el remonte de la onda (*runup*) en la orilla opuesta se medía con una sonda de resistencia inclinada (Sonda 4). El bloque era liberado al accionar un interruptor electrónico sincronizado con todos los otros instrumentos de medición, los cuales a su vez estaban conectados a un sistema digital de adquisición de datos. Los experimentos con cada bloque se repitieron 5 veces y los valores promediados se emplearon para comparación con los resultados de Flow-3D (Figura 6).

La Figura 6 muestra (en línea roja punteada) los primeros 6 segundos de los resultados experimentales de las alturas de ondas medidas en las tres Sondas 1, 2 y 3. El patrón de niveles de agua es bastante complejo y distinto de los resultados observados en experimentos en canales largos (Heller et al. 2016), donde el deslizamiento genera una única onda solitaria. Un resultado inesperado en los experimentos fue que al alejarse de la zona de impacto (Sondas 2 y 3), la onda de mayor altura

resultó ser la segunda onda generada y no la primera. De igual forma, las máximas alturas de remonte (*runup*) mostradas en la Tabla 2 fueron generadas por el arribo de la segunda onda.

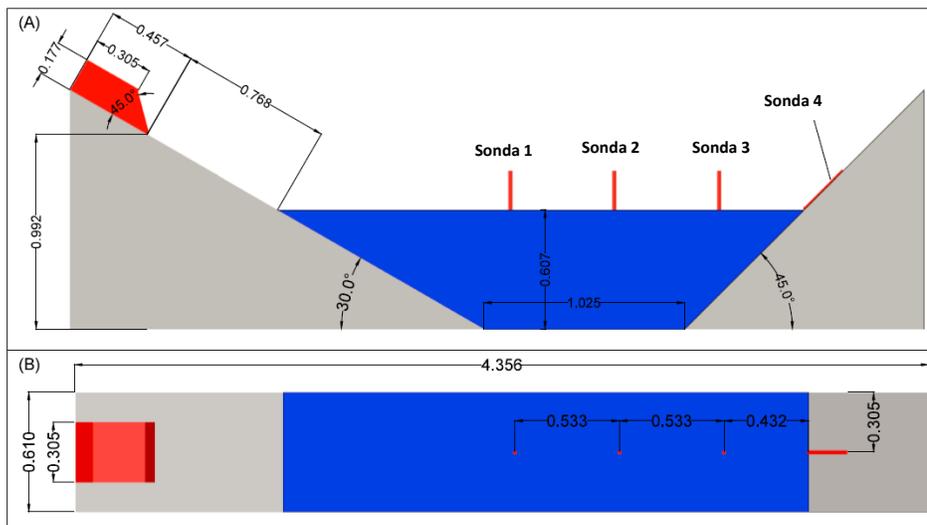
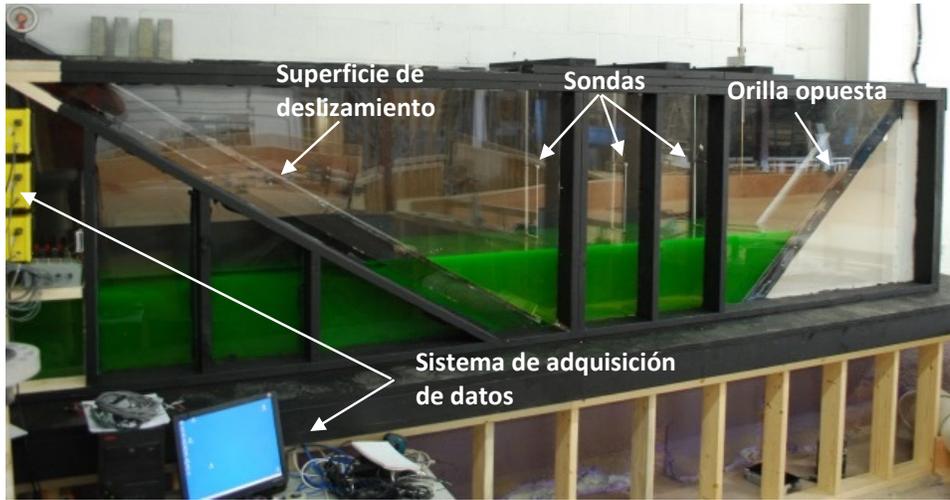


Figura 5.- Modelo físico usado para verificar Flow-3D (NHC 2013).

En modelo Flow-3D se empleó una malla con celdas cubicas de 0.01 m y el modelo de turbulencia k- ϵ RNG. En el modelo GMO se ingresaron como series de tiempo las tres componentes del vector velocidad medidas en el experimento para cada uno de los bloques. Los resultados de altura de onda predichas por Flow-3D en las tres primeras sondas se muestran en la Figura 6 (línea negra); mientras que la Tabla 2 contiene los valores del *runup* calculado. Como se puede observar en la Figura 6, los resultados de Flow-3D fueron excelentes, siendo capaz de reproducir muy bien los complejos patrones de niveles de agua observados. Respecto a las predicciones del *runup*, los resultados de Flow-3D cayeron dentro de un rango relativo de $\pm 10\%$ respecto a los valores medidos; lo cual es perfectamente aceptable para aplicaciones prácticas, por lo que puede considerarse que las capacidades de Flow-3D fueron verificadas con éxito.

Tabla 2.- *Runup* máximo de la onda medidos en experimentos (Sonda 4) y calculados por Flow-3D.

Bloque sólido	<i>Runup</i> experimento [m]	<i>Runup</i> Flow-3D [m]	Error relativo [-]
Corto	0.119	0.130	+8%
Largo	0.136	0.125	-9%

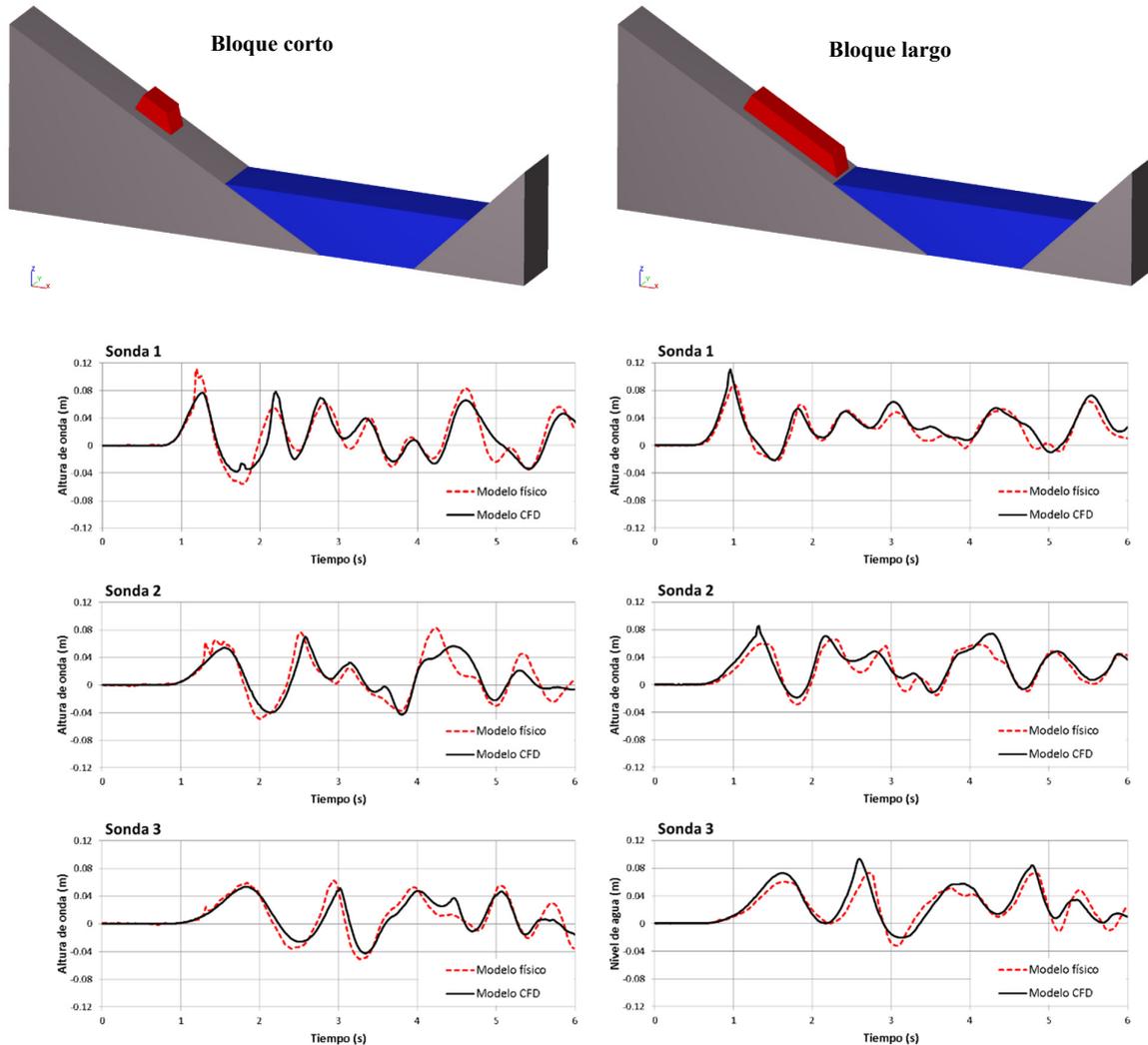


Figura 6.- Alturas de onda medidos en el modelo físico y calculados por modelo numérico CFD, para dos bloques sólidos de longitud corta y larga (NHC 2013).

APLICACIONES PRÁCTICAS EN PROYECTOS REALES

Desde que las capacidades de Flow-3D para modelar ondas tsunami en lagos fueron verificadas con éxito, NHC lo ha aplicado en varios proyectos de consultoría, especialmente en minas a tajo abierto inundadas. Estos son proyectos multidisciplinarios, donde especialistas en geotecnia proporcionan la información de la forma, dimensiones y velocidad del deslizamiento usados como datos de entrada en Flow-3D. Con la información de la masa deslizante, la batimetría del lago y los niveles iniciales de agua, se puede proceder a la simulación de la generación, propagación y remonte de las ondas en el lago.

La Tabla 3 muestra resultados típicos de alturas de remonte (*runup*) predichas por Flow-3D entre 19 y 42 m encontrados en diversos proyectos con volúmenes de deslizamientos que variaron entre 0.4 a 10 Mm³. La Figura 7 ilustra la complejidad de las ondas tsunami en el lago pequeño de una mina a tajo abierto inundada. La onda principal se propaga de manera radial a partir de la zona del deslizamiento; pero además de ella también se generan ondas secundarias que viajan a lo largo de la circunferencia del lago e interaccionan entre sí, en algunos casos generando interferencias positivas que causan ondas de gran amplitud. En este caso la orilla del lago presenta un punto de mínima elevación en la esquina sudoeste, por donde el agua podría verter fuera del lago en caso la onda lo supere, lo cual sería análogo a la cresta de una presa en un reservorio (Figura 1).

Tabla 3.- Ejemplos de alturas de onda predichas por Flow-3D en lagos mineros (NHC 2012, 2013, 2016).

Volumen del deslizamiento [x10 ⁶ m ³]	Espesor del deslizamiento [m]	Velocidad de impacto [m/s]	Profundidad de agua [m]	Runup de la onda [m]
0.4	19	11	18	32
0.6	24	15	18	42
2.2	47	24	64	30
2.3	30	25	160	20
10.0	30	35	61	19

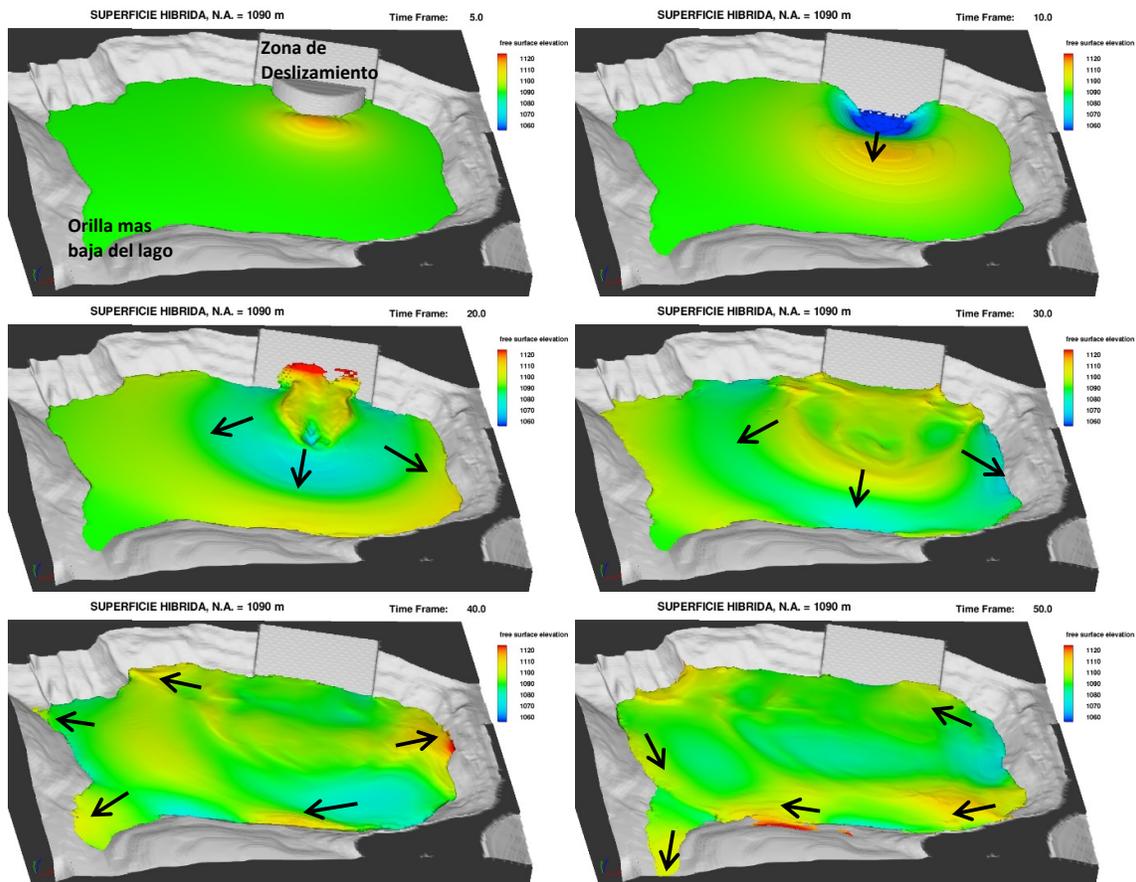


Figura 7.- Resultados de Flow-3D mostrando la generación, propagación y remonte de ondas generadas por un deslizamiento hipotético en el lago de una mina abandonada. En este caso la onda supera la elevación de la orilla más baja, produciéndose el vertido de agua fuera del lago.

Tanto en el modelo físico (Figura 6), como en los resultados de Flow-3D aplicados a casos reales se ha observado, en algunos casos, que las ondas reflejadas en una orilla cambian de dirección y empiezan a viajar en la dirección opuesta. Este comportamiento con ondas de retorno ha sido descrito en crónicas antiguas del tsunami en Shimabara de 1792 (Tabla 1) y más recientemente por testigos oculares del tsunami del lago Chehalis en 2007 (Tabla 1).

La información del *runup* en las orillas lago puede emplearse para determinar la altura de seguridad o borde libre (*freeboard*) alrededor del lago, por debajo de la cual no debería permitirse ninguna construcción o actividad humana, y así evitar una tragedia como la mostrada en la Figura 2.

En caso que se produzca el vertido de agua fuera del lago o reservorio, Flow-3D puede usarse también para determinar el caudal vertido en función del nivel de agua en el lago o reservorio. La Figura 8 muestra el caudal vertido fuera del lago en función del borde libre en el lago de la Figura 7.

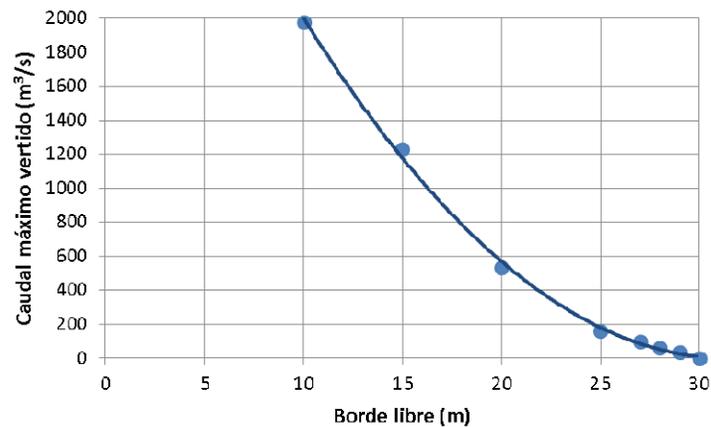


Figura 8.- Caudal máximo vertido fuera del lago en función del borde libre (distancia entre cresta de vertido y nivel de agua en el lago).

Una medida de mitigación contra el riesgo de vertido es aumentar el borde libre, ya sea bajando la cota del nivel de agua en el lago o reservorio, o elevando la cresta de la presa u orillas del lago (mediante la construcción de diques). Por ejemplo, los resultados de Flow-3D mostrados en la Figura 8 demuestran que es necesario un borde libre de al menos 30 m para absorber la altura de onda y evitar el vertido de agua y así evitar causar daños aguas abajo (como el caso de la presa Vaiont en la Tabla 1). En caso no fuera factible proporcionar los 30 m de borde libre y evitar el vertido, los resultados calculados en la Figura 8 podrían emplearse para determinar el caudal de vertido y evaluar la posible inundación aguas abajo. Es importante mencionar que las velocidades del flujo vertiente pueden ser extremadamente altas (mayores a 10 m/s), suficientes para erosionar una presa o dique de tierra, por lo que un deslizamiento de ladera que cause un tsunami en un reservorio podría también dar lugar a un evento de rotura de presa.

CONCLUSIONES

Los deslizamientos de laderas en cuerpos de agua pueden generar ondas tsunami de gran altura que son capaces de causar daños a infraestructura y pérdidas de vidas humanas, como ha sido demostrado en el Perú y varios países del mundo. La evaluación y mitigación de los riesgos causadas por estas ondas requiere predecir la alturas máximas de remonte (*runup*) y caudales en caso se produzca un vertido fuera del lago o reservorio; lo cual típicamente se ha realizado usando modelos físicos y más recientemente aplicando modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Hemos demostrado mediante validación con un modelo físico, que el modelo CFD Flow-3D es capaz de simular con alta fidelidad la generación, propagación y remonte de ondas tsunami causadas por deslizamientos de masas sólidas. Las predicciones de Flow-3D para el *runup* de las ondas cayeron dentro del rango de $\pm 10\%$ respecto a los valores medidos en el modelo físico.

Flow-3D puede aplicarse en problemas reales de generación de ondas tsunami en lagos, reservorios o minas inundadas. El modelo permite determinar completamente la dinámica tridimensional de las ondas, con lo cual se pueden determinar los niveles de impacto (*runup*), velocidades de ondas o caudales de vertido. Estas aplicaciones son especialmente relevante en zonas sísmicas montañosas, como los Andes Sudamericanos, donde la posibilidad de deslizamientos en laderas naturales o excavadas es significativa.

Sin embargo, debemos reconocerse que la geometría del canal de laboratorio que usamos para validar Flow-3D fue muy simplificada respecto a la de un lago o reservorio real; por lo que aún existe cierta incertidumbre en los resultados de Flow-3D en situaciones reales complejas, para lo cual un modelo físico podría ser necesario, especialmente si hay un elevado riesgo de pérdida de vidas humanas.

REFERENCIAS

- Ataie-Ashtani, B., Nik-Khah, A.** (2008). "Impulsive waves caused by subaerial landslides". *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 263-280.
- Biscarini, C.** (2010). "Computational fluid dynamics modelling of landslide generated water waves". *Landslides*, Vol. 7, pp. 117-124.
- Basu, D., Green, S., Das, K., Janetzke, R., and Stamatakos, J.** (2009a). "Navier-Stokes simulations of surface waves generated by submarine landslides: effects of slide geometry and turbulence". *2009 Society of Petroleum Engineers Americas Environmental & Safety Conference*, Santo Antonio, Texas, EEUU.
- Basu, D., Green, S., Das, K., Janetzke, R., and Stamatakos, J.** (2009b). "Numerical simulations of surface waves generated by subaerial landslide at Lituya Bay, Alaska". *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, EEUU.
- Das, K., Green, S., Basu, D., Janetzke, R., and Stamatakos, J.** (2009a). "Effect of slide deformation and geometry on waves generated by submarine landslides: A numerical investigation". *2009 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, EEUU.
- Das, K., Janetzke, R., Basu, D., Green, S., and Stamatakos, J.** (2009b). "Numerical simulations of Tsunami wave generation by submarine and aerial landslides using RANS and SPH". *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, EEUU.
- Flacker, G. and Eyzaguirre, V.R.** (1979). "Rock Avalanche and Wave at Chungar, Peru". *Rockslides and Avalanches, Vol. 2 Engineering Sites - Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company, the Netherlands.
- Fritz, H.M., Mohammed, F. and Yoo, J.** (2009). "Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary". *Pure Applied Geophysics*, Vol. 166 (2009), pp. 153-175.
- Heller, V., Hager, W. and Minor, H-E.** (2009). *Landslide-generated waves in reservoirs- Basics and Computation*. ETH – Universidad de Zurich.
- Heller, V., Bruggemann, M., Spinneken, J. and Rogers, B.D.** (2016). "Composite modelling of subaerial landslide-tsunami in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics". *Coastal Engineering*, Vol. 109, January 2016, pp. 20-41.
- Horsburgh, K. J., C. Wilson, B. J. Baptie, A. Cooper, D. Cresswell, R. M. W. Musson, L. Ottemöller, S., Richardson, and S. L. Sargeant** (2008). "Impact of a Lisbon-type tsunami on the U.K. coastline and the implications for tsunami propagation over broad continental shelves", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, C04007, doi: [10.1029/2007JC004425](https://doi.org/10.1029/2007JC004425).
- Hughes, B. R. and Berry, B.A.** (1991). "Landslide-generated waves". *Dam Safety 1991*.
- Lee, K. L. y Duncan, J.M.** (1975). *Landslide of April 25, 1974 on the Mantaro River, Peru*. Report of Inspection. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Miller, D.J.** (1960). *Giant Waves in Lituya Bay, Alaska*. Geological Survey Professional Paper 354-C.
- NHC** (1976). *Hydraulic Model Study of Wave from Downie Slide*. Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para British Columbia Hydro and Power Authority, Agosto 1976.
- NHC** (1983a). *Review of Landslide Generated Wave Analysis*, Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para British Columbia Hydro and Power Authority, Mayo 1983.
- NHC** (1983b). *Peace River, Site C Project, Model of Landslide Waves at Attachie and Bear Flat Areas*. Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para BC Hydro, Junio 1983.
- NHC** (2005). *Checkerboard Creek Landslide Generated Wave – Physical Model Study*. Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para British Columbia Hydro and Power Authority, Agosto 2005.
- NHC** (2012). *Análise Hidráulica de Movimentos de Massa nos Taludes da Mina de Águas Claras – CFD Simulation and Results*. Memorando técnico preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para POTAMOS Engenharia e Hidrologia Ltda., Julio 2012.
- NHC** (2013). *Questa Mine Hydraulic Modelling of Landslide-Generated Waves*. Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para Golder Associates Inc., Octubre 2013.
- NHC** (2016). *WSAP Mine Wave Hazard Assessment*. Informe preparado por Northwest Hydraulic Consultants (NHC) para Piteau Associates, Abril 2016.
- Raney, D.C and Butler, H.L.** (1975). *A Numerical Model for Prediction the Effects of Landslide-Generated Water Waves*. Hydraulics Laboratory, US Army Engineering Waterways Experiment Station. Report H-75-1.
- SFU** (2011). "Risky Ground" Newsletter of Center for Natural Hazards, Simon Fraser University, Canada.
- Slingerland, R. and Voight, B.** (1982). "Evaluating Hazard of Landslide-Induced Water Waves". *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE, Vol. 108, No. WW4, November 1982, pp. 504-512.
- Wikipedia** (2016). "Megatsunami". <https://en.wikipedia.org/wiki/Megatsunami>. 16 de marzo 2016.