

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS ALUVIONALES MEDIANTE ENFOQUE
EMPÍRICO Y NUMÉRICO: APLICACIÓN EN QUEBRADA LAS TONINAS**

MARTÍN RÍOS ESPÓSITO¹
ALEX GARCÉS CATALÁN²
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI³
JAIME GONZALEZ CANALES⁴
MARISOL LARA CASTILLO⁵
SOFIA REBOLLEDO LEMUS⁶

RESUMEN

La generación de hidrogramas aluvionales es fundamental para evaluar la amenaza aluvional, siendo el caudal máximo su principal característica. Este varía significativamente según si el aluvión se origina por escorrentía o por deslizamientos superficiales. El presente estudio compara dos enfoques para generar hidrogramas aluvionales asociados a deslizamientos en la quebrada Las Toninas, Región de Los Lagos. El primer enfoque es empírico, mientras que el segundo corresponde a una simulación numérica con el modelo bidimensional r.avaflow. El método empírico relaciona el volumen de sedimentos movilizados con el caudal máximo, mediante una expresión que incorpora un coeficiente de calibración c dependiente del tipo de flujo. En cambio, el enfoque numérico simula el deslizamiento superficial considerando leyes de resistencia y datos topográficos, ofreciendo una representación con mayor sustento físico. Los resultados muestran que la adecuada calibración del coeficiente c es crítica para obtener buenos resultados en el enfoque empírico, aunque su valor puede variar hasta en órdenes de magnitud según el tipo de flujo. Finalmente, se concluye que la aplicación de uno u otro enfoque debe responder al nivel de detalle del estudio, siendo recomendables en etapas distintas según los objetivos específicos del análisis.

¹Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: martin.rios@amtc.cl

²Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: agarces@uchile.cl

³Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: santiago.montserrat@amtc.cl

⁴Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: jaigonzalez@ug.uchile.cl

⁵Profesora Adjunta, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: mlarac@uchile.cl

⁶Profesora Adjunta, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: srebolle65@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La modelación numérica de flujos aluvionales es ampliamente utilizada para la zonificación de la amenaza, la planificación territorial y el diseño de medidas estructurales y no estructurales orientadas a reducir el riesgo. Sin embargo, esta herramienta todavía presenta limitaciones importantes debido a la complejidad de los procesos físicos que dominan el movimiento de estas mezclas sólido-líquido. En particular, la determinación de hidrogramas aluvionales constituye un desafío crítico, ya que los resultados del modelo numérico son altamente sensibles a la definición y construcción de esta condición de borde. Al no existir metodologías estandarizadas para la generación de hidrogramas aluvionales, se pueden producir diferencias significativas en términos de alcance, intensidad y potencial destructivo del flujo simulado.

Los flujos de detritos suelen iniciarse por procesos de remoción en masa –como caídas de rocas o deslizamientos- en las cabeceras o por la inestabilidad de segmentos del cauce en tramos de alta pendiente (Argentino et al., 2007; Hungr et al., 2014). En función del mecanismo de inicio, los aluviones pueden clasificarse en dos categorías principales: aquellos generados por deslizamientos superficiales y aquellos generados por escorrentía superficial. En el primer caso, el flujo se desencadena por la incorporación súbita de grandes volúmenes de material al canal debido a movimientos en masa provenientes de laderas inestables, lo que puede también inducir procesos de erosión y aporte de sedimentos hacia aguas abajo (Gertsch et al., 2012). Este tipo de inicio es especialmente relevante en cuencas donde la disponibilidad de sedimento suelto en el cauce es limitada. En contraste, los aluviones generados por escorrentía superficial ocurren cuando hay una abundancia de sedimentos en el lecho del canal, y el incremento del caudal es suficiente para movilizarlos sin requerir un deslizamiento inicial. La identificación del mecanismo de inicio es clave para definir una condición de borde realista en la modelación numérica, ya que determina tanto el caudal como las propiedades del flujo simulado.

En este estudio se aborda específicamente el caso de aluviones desencadenados por deslizamientos superficiales. Para ello, se comparan dos metodologías orientadas a la generación de hidrogramas aluvionales: un enfoque empírico y uno numérico. El primer método se basa en la formulación propuesta por Rickenmann (1999), que relaciona el caudal máximo del evento con el volumen del deslizamiento superficial, utilizando coeficientes de calibración c dependientes del tipo de flujo. El segundo método corresponde a una simulación bidimensional mediante el modelo *r.avaflow* (Mergili et al., 2017), diseñado específicamente para representar fenómenos de remoción en masa y flujos gravitacionales.

Mediante la comparación entre ambas metodologías se evalúa críticamente la aplicabilidad y las limitaciones del enfoque empírico respecto al modelo numérico, el cual incorpora una representación de los procesos físicos involucrados. Para ello, se utiliza como caso de estudio la quebrada Las Toninas (Región de Los Lagos), donde se espera que los eventos aluvionales estén asociados principalmente a deslizamientos superficiales, como el ocurrido en 2023. Esta comparación permitirá establecer recomendaciones sobre el potencial y restricciones de cada método, así como su utilidad en la generación de condiciones de borde para modelos hidráulicos posteriores y en estudios detallados de la amenaza aluvional.

2. ZONA DE ESTUDIO - QUEBRADA LAS TONINAS, REGIÓN DE LOS LAGOS

La quebrada Las Toninas se encuentra en la comuna de Puerto Montt, Región de Los Lagos, y desemboca en el seno de Reloncaví. El clima en esta área se caracteriza por ser húmedo, con temperaturas moderadas que varían entre frías en invierno y más cálidas en verano. La precipitación y temperatura anual promedio son de 3,088 mm y 10,5 °C respectivamente, con máximas de 25 °C en enero y mínimas de 1 °C en julio, lo que indica la posibilidad de precipitaciones tanto líquidas como sólidas durante el invierno.

La cuenca abarca aproximadamente 1 km², y se caracteriza por un canal angosto de orientación este-oeste, con laderas de pendiente pronunciada y cubiertas de densa vegetación. La Figura 1 muestra su delimitación, junto con el trazado de las curvas de nivel cada 50 metros. Adicionalmente, la Tabla 1 presenta los parámetros morfométricos de la cuenca, la cual se clasifica como pequeña (menor a 2 km²) según la clasificación de quebradas de la normativa austriaca (ONR 24800:2009, 2009).

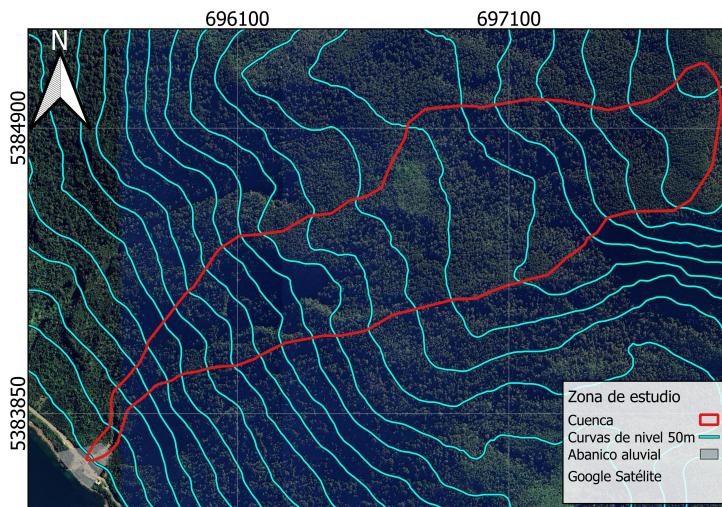


Figura 1: Zona de estudio - Quebrada Las Toninas.

Tabla 1: Parámetros morfométricos - Quebrada Las Toninas.

| Parámetro | Valor |
|---|---------|
| Latitud centroide (°) | -41,67 |
| Longitud centroide (°) | -72,64 |
| Área (km ²) | 1,08 |
| Altura máxima (m.s.n.m.) | 1061,00 |
| Altura mínima (m.s.n.m.) | 22,00 |
| Altura media (m.s.n.m.) | 707,00 |
| Pendiente promedio (%) | 0,38 |
| Pendiente cauce principal (%) | 0,40 |
| Largo cauce principal (km) | 2,72 |
| Índice de Melton | 1,00 |
| Densidad de drenaje (km ⁻¹) | 6,43 |
| Tiempo de concentración (hr) | 0,49 |

3. METODOLOGÍA

La construcción del hidrograma asociado a aluviones generados por deslizamientos se abordó mediante dos enfoques: un ajuste empírico basado en la ecuación de Rickenmann (1999) y otro numérico mediante el uso del modelo *r.avaflow*. El primero permite representar el hidrograma mediante una forma triangular simplificada, mientras que el segundo consiste en la simulación de un escenario de deslizamiento cuyo resultado permite obtener hidrogramas aluvionales en zonas de interés. Los resultados de ambos métodos son comparados para identificar diferencias en el caudal máximo resultante.

3.1. Hidrograma triangular empírico

El hidrograma aluvional triangular es una representación simplificada del caudal de un aluvión en función del tiempo. Este consiste en un incremento lineal de dicho caudal hasta alcanzar un valor máximo, seguido de un decrecimiento, también lineal, hasta volver a cero.

Cabe mencionar que, si bien el hidrograma aluvional triangular puede emplearse para modelar aluviones originados tanto por escorrentía como por deslizamientos superficiales, en la quebrada Las Toninas se espera que los eventos se asocien a este último proceso. Esta distinción es relevante, ya que en aluviones generados por escorrentía el caudal máximo se estima a partir del caudal líquido máximo de la crecida, mientras que en aquellos generados por deslizamientos se calcula en función del volumen de remoción.

La construcción del hidrograma triangular requiere definir tres parámetros clave: (1) el caudal aluvional máximo ($Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}}$), (2) la duración del evento de crecida (t_D) y (3) el tiempo al caudal máximo (t_p) (Figura 2).

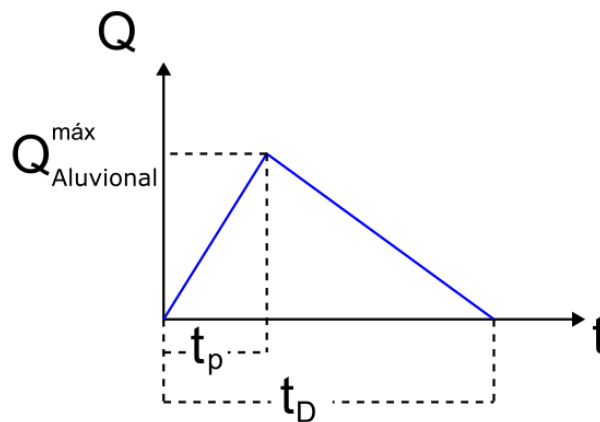


Figura 2: Componentes del hidrograma aluvional triangular.

En línea con lo señalado anteriormente, los componentes del hidrograma guardan una relación directa con el volumen del aluvión de diseño. Este volumen se determina a partir de tres parámetros: (1) el volumen geométrico de sedimentos calculado para distintos escenarios, (2) la concentración volumétrica en equilibrio de sedimentos (Takahashi, 1981) y (3) una porosidad representativa del suelo (se asume 30%). El volumen geométrico de sedimentos corresponde al volumen del deslizamiento superficial, el cual resulta de multiplicar el área de remoción del suelo y su profundidad media. De esta forma, el volumen del aluvión de diseño se estima mediante la ecuación 1:

$$V_{\text{Aluvión}} = V_{\text{sed}} \frac{1-p}{C_v} \quad (1)$$

Donde V_{sed} es el volumen geométrico de sedimentos, p la porosidad y C_v la concentración volumétrica en equilibrio de sedimentos según Takahashi (1981).

Para la estimación del caudal aluvional máximo del hidrograma triangular se propone utilizar la Ecuación 2 (Rickenmann, 1999). Esta relación proviene de un análisis dimensional mediante el cual se mantiene el número de Froude, es decir, la Ecuación 2 se fundamenta en el principio de similitud hidrodinámica para flujos aluvionales de distinta magnitud.

$$Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = c \cdot V_{\text{Aluvión}}^{\beta} \quad (2)$$

Donde $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}}$ es el caudal aluvional máximo, $V_{\text{Aluvión}}$ el volumen del aluvión de diseño, y c y β son coeficientes de calibración que dependen del tipo de flujo considerado. A partir de su análisis dimensional, Rickenmann (1999) determinó los valores de $\beta = 5/6$ y $c = 0,1$, los cuales fueron ajustados en base a los caudales máximos más altos observados en terreno. Se incorporaron al análisis distintos ajustes empíricos disponibles en la literatura para representar diferentes tipos de flujo aluvional. Estos incluyen flujos granulares, flujos con alto contenido de barro, y lahares en Indonesia y Japón. La Tabla 2 presenta los tipos de flujo evaluados, la fórmula utilizada y su respectiva referencia.

Tabla 2: Ajustes empíricos considerados para comparación de hidrogramas aluvionales. Fuente: (Rickenmann, 1999)

| Tipo de flujo | Fórmula | Referencia |
|----------------------------|--|--------------------------|
| Flujo aluvional granular | $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = 0,135 \cdot V_{\text{det}}^{0,780}$ | (Mizuyama et al., 1992) |
| Flujo aluvional de barro | $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = 0,0188 \cdot V_{\text{det}}^{0,790}$ | (Mizuyama et al., 1992) |
| Flujo lahárico (Indonesia) | $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = 0,00558 \cdot V_{\text{det}}^{0,831}$ | (Jitousono et al., 1996) |
| Flujo lahárico (Japón) | $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = 0,00135 \cdot V_{\text{det}}^{0,870}$ | (Jitousono et al., 1996) |

El volumen del aluvión de diseño puede representarse como el área bajo la curva del hidrograma (Ecuación 3). Al tratarse de un hidrograma triangular, el área bajo la curva sólo depende del caudal máximo y la duración del hidrograma. Por lo tanto, una vez calculado el caudal aluvional máximo $Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}}$, la duración del evento de crecida t_D puede despejarse de la condición presentada en la Ecuación 4.

$$V_{\text{Aluvión}} = \int_0^{t_D} Q(t) dt \quad (3)$$

$$V_{\text{Aluvión}} = \frac{Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} \cdot t_D}{2} \quad (4)$$

Finalmente, para completar la construcción del hidrograma triangular, se establece que el caudal máximo ocurre a un tiempo $t_p = 0,2 \cdot t_D$, es decir, al 20% del tiempo total del hidrograma (Mitchell et al., 2022).

3.2. Hidrograma triangular numérico

En esta sección se describe la implementación del modelo numérico *r.avaflow* (Mergili et al., 2017), empleado para calibrar el coeficiente c del hidrograma aluvional triangular. *r.avaflow* es un modelo numérico de código abierto, ejecutado mediante línea de comandos en sistemas Linux, utilizado para el ruteo de avalanchas y flujos detríticos sobre topografías complejas. Se implementa como un módulo ráster de GRASS GIS y combina rutinas en Python, C y R. El modelo cuenta con la formulación bifásica de Pudasaini (2012) y destaca por: (i) tratar explícitamente las fases sólida y fluida, (ii) considerar los procesos de erosión (*entrainment*) y depósito que modifican la topografía basal, (iii) admitir múltiples condiciones de borde, y (iv) ofrecer utilidades internas para validación, optimización de parámetros y análisis de sensibilidad. *r.avaflow* resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momentum mediante el método de volúmenes finitos, imponiendo un paso de tiempo adaptativo en función de la condición Courant–Friedrichs–Lewy (CFL). Esta aproximación conserva rigurosamente masa y cantidad de movimiento, y resulta adecuada para las dinámicas hiperbólicas propias de los flujos de detritos asociados a deslizamientos superficiales.

En el presente estudio se optó por representar el flujo como una mezcla equivalente de agua y sedimentos, considerando una ley de resistencia para fluidos no newtonianos. Esta decisión responde al objetivo de mantener una concentración volumétrica de sedimentos fija y facilitar la comparación de los resultados con los hidrogramas generados mediante la metodología empírica (sección 3.1).

3.2.1. Ecuaciones gobernantes

La propagación del flujo se modela mediante el sistema de ecuaciones promediado en su profundidad propuesto por Savage & Hutter (1989), el cual fue extendido e implementado por Wang et al. (2004). Con este enfoque se introduce un sistema de coordenadas ortogonal curvilíneo $Oxyz$, definido y alineado con la pendiente local del terreno. De este modo, el ángulo local de inclinación ζ varía en función de la coordenada x , definida como la dirección de máxima pendiente. La topografía tridimensional del lecho se describe mediante su elevación $z = z^b(x, y)$ sobre la superficie de referencia, lo que permite modelar la transición del flujo desde la pendiente inicial hasta la zona de depósito sobre una geometría compleja (Wang et al., 2004).

Las ecuaciones 5 a 7 representan la conservación de masa y momentum para flujos monofásicos en *r.avaflow*. Estas corresponden a las ecuaciones de primer orden, promediadas en profundidad, descritas por Wang et al. (2004):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = h s_x - \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_x \frac{h^2}{2} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = h s_y - \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_y \frac{h^2}{2} \right). \quad (7)$$

Donde h corresponde al espesor del flujo, u y v son las componentes de la velocidad media en las direcciones tangencial y transversal, respectivamente, y β_x , β_y son coeficientes que dependen de la pendiente del terreno, del criterio de Mohr–Coulomb a través de los coeficientes de presión activa/pasiva (K_x y K_y), y de la razón de aspecto ε del flujo. Para mayores detalles sobre los coeficientes β_x y β_y , se recomienda consultar Wang et al. (2004).

Los términos fuente s_x y s_y representan las aceleraciones netas en las direcciones longitudinal y transversal al flujo, respectivamente. Estos se expresan como:

$$s_x = S_{o_x} - S_f, \quad s_y = S_{o_y} - S_f,$$

Donde S_{o_x} y S_{o_y} son las pendientes del terreno en cada dirección y S_f corresponde a la pendiente de fricción.

La ventaja de resolver este sistema de ecuaciones (Savage & Hutter, 1989; Wang et al., 2004) es que el escurrimiento se resuelve alineado respecto a la superficie tridimensional del terreno. En consecuencia, a diferencia de programas como HEC-RAS, la corrección por pendiente del término de presión se encuentra incorporada en las ecuaciones gobernantes a través del término $(\beta_{\{x,y\}} h^2/2)$. Para el caso de la quebrada Las Toninas, esto es especialmente relevante ya que la zona de estudio presenta pendientes máximas del orden de 35–40 %, por lo que su influencia sobre la dinámica del flujo debe ser considerada.

La pendiente de la línea de energía (también conocida como pendiente de fricción S_f debido a que refleja la pérdida de energía por fricción) es calculada mediante una ley de resistencia. La ley de resistencia seleccionada es la responsable de representar el comportamiento no lineal de flujos aluvionales en función de su dinámica y composición. Existen múltiples leyes de resistencia para estimar S_f , donde la elección de una u otra va a depender del modelo numérico que se utilice. Para el caso del modelo monofásico en *ravaflow*, la pendiente de fricción se determina mediante el modelo de Voellmy (ecuación 8), el cual es ampliamente utilizado para simular aluviones generados por deslizamientos superficiales (Yang et al., 2019).

$$S_f = \mu \cos(\zeta) + \frac{(u^2 + v^2)}{\xi h} \quad (8)$$

Donde el primer término se asocia a la fricción seca de Coulomb y el segundo a la fricción turbulenta (Salm et al., 1990; Salm, 1993). Los coeficientes μ y ξ corresponden a parámetros de calibración que representan, respectivamente, la fricción interna (coulómbica) y turbulenta del flujo.

Adicionalmente, *r.avaflow* incorpora un tratamiento explícito de los procesos de detención del flujo, mediante un enfoque basado en el balance de energía para estimar si el flujo se detiene en una celda (Mergili et al., 2017). Esta estimación se realiza a través del cálculo de la distancia de detención s_{stop} , la cual se compara con la resolución espacial del modelo (Δs). Si se cumple que $s_{\text{stop}} \leq \Delta s$, entonces se considera que el flujo se detiene en esa celda.

El balance energético para estimar dicha distancia considera que la energía cinética inicial y el cambio de energía potencial del flujo se transforman completamente en energía disipada por fricción (Mergili et al., 2017). La expresión resultante se presenta en la Ecuación 9.

$$s_{\text{stop}} = \frac{U_0^2}{2g (\tan \delta - \tan \beta_v) \cos \beta_v} \quad (9)$$

Donde U_0 es la velocidad inicial del flujo, δ es el ángulo de fricción basal, β_v corresponde a la pendiente del terreno en la dirección del movimiento, y g es la aceleración de la gravedad. Esta ecuación indica que el flujo solo puede detenerse si la resistencia basal (controlada por δ) supera la componente del peso en la dirección de la pendiente, es decir, cuando $\delta > \beta_v$ (Mergili et al., 2017).

3.2.2. Condiciones de borde

La modelación se realizó utilizando un modelo de elevación digital (DEM) derivado exclusivamente de datos satelitales ALOS PALSAR, con una resolución espacial de $12,5 \text{ m} \times 12,5 \text{ m}$: © JAXA/METI, ALOS PALSAR L1.0 2007. El dominio de cálculo considerado abarca desde la zona de inicio del deslizamiento, ubicada en la parte alta de la quebrada, hasta la totalidad del abanico aluvial. La Figura 3 ilustra el mapa de sombras del modelo digital de elevación satelital, el cual incluye un canal artificial a lo largo del abanico aluvial. Este se incorporó siguiendo el trazado y el ancho promedio del canal observado en terreno, con el objetivo de representar adecuadamente la morfología del sector. Adicionalmente, se muestra la ubicación de la sección transversal en la cual se registró la evolución temporal del caudal aluvial para cada escenario modelado.

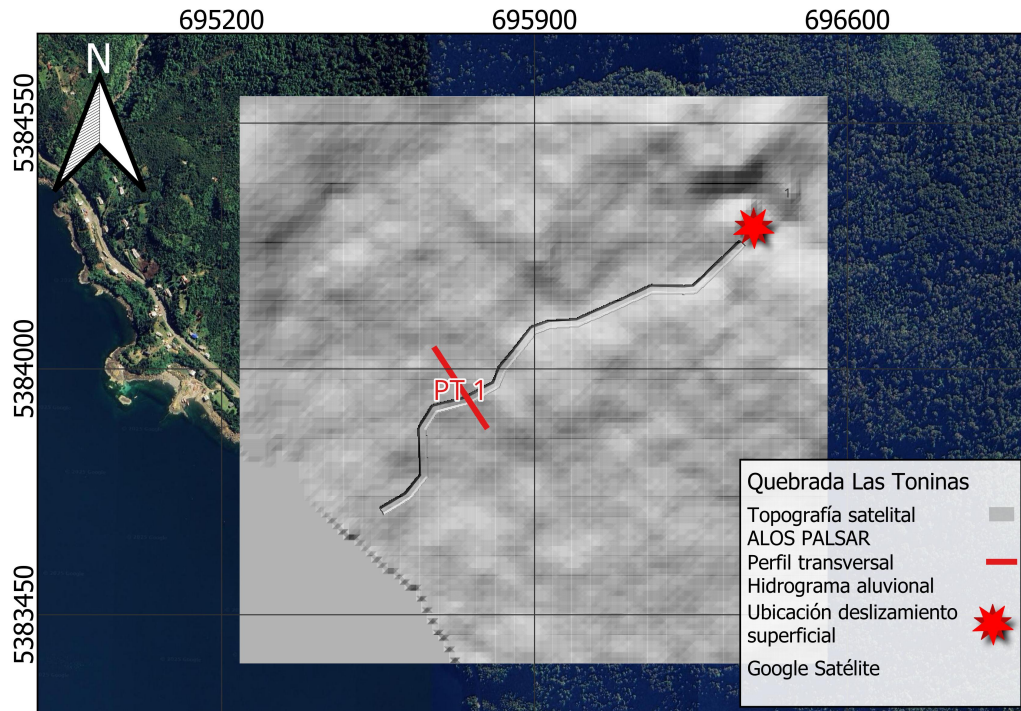


Figura 3: Topografía satelital ALOS PALSAR implementada en modelación *r.avaflow*.

La Tabla 3 resume los parámetros físicos de entrada definidos para el modelo, los cuales se mantienen constantes en todas las simulaciones. Estos corresponden a la densidad de la mezcla (ρ_m), el ángulo de fricción interna (ϕ), el ángulo de fricción basal (δ) y la fricción turbulenta (ξ). En esta línea, cabe señalar que el parámetro μ (utilizado en la formulación de ley de resistencia de Voellmy), se calcula como $\mu = \tan(\phi)$, representando la fricción seca de tipo coulombico.

Tabla 3: Parámetros físicos de entrada utilizados en *r.avaflow*.

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-------|
| ρ_m (kg/m ³) | 1.890 |
| ϕ (°) | 35 |
| δ (°) | 20 |
| ξ (s ² /m) | 3,0 |

3.3. Escenarios Simulados

El modelo numérico fue utilizado para simular tres escenarios de generación de flujos aluvionales en la quebrada Las Toninas, los cuales fueron definidos en función de distintas fuentes de sedimentos y probabilidad de ocurrencia. A partir de la identificación de las zonas más susceptibles a generar deslizamientos superficiales, los escenarios corresponden a la remoción en masa de depósitos aluviales locales (más probable) y a distintos porcentajes de las áreas de alta susceptibilidad

(con probabilidad de ocurrencia media o menos probable según porcentaje de área susceptible), suponiendo un espesor de deslizamiento de un metro de profundidad.

La Tabla 4 resume las principales características de los escenarios considerados, incluyendo volúmenes estimados y supuestos asociados. El escenario más probable está vinculado principalmente a la movilización de depósitos aluviales locales, con un volumen estimado de 3.004 m^3 de sedimentos. Este valor es comparable al evento registrado en agosto de 2023, el cual desembocó aproximadamente 4.000 m^3 de material en el mar (Mella et al., 2023). Por otra parte, los escenarios de probabilidad media y menos probable consideran la ocurrencia de deslizamientos en zonas con alta susceptibilidad a procesos de remoción en masa. El escenario de probabilidad media asume un aporte de sedimentos equivalente al 10 % del área clasificada como de alta susceptibilidad, con un espesor de deslizamiento de 1 metro, lo que representa un volumen 1,7 veces mayor al del evento de 2023. Para el escenario menos probable, se delimitaron zonas propensas a deslizar considerando tanto la susceptibilidad como criterios geomorfológicos. La zona con mayor extensión se estimó con un volumen similar al que resultaría de movilizar el 25 % del área de alta susceptibilidad, también con un espesor promedio de 1 metro.

Con base en lo anterior, se obtienen tres volúmenes geométricos de sedimentos disponibles al ápice. Cabe mencionar que para estimar el volumen del aluvión de diseño, se aplicó la corrección de la Ecuación 1, incorporando una porosidad del 30 % y una concentración volumétrica de sedimentos de $C_V = 54 \%$. La Tabla 4 resume los escenarios y volúmenes del aluvión de diseño obtenidos.

Tabla 4: Volumen del aluvión considerado para cada escenario.

| Fuente de sedimentos para la generación de aluviones | Escenario | Volumen de sedimentos $V_{\text{sed}} \text{ (m}^3\text{)}$ | Volumen aluvión $V_{\text{Aluvión}} \text{ (m}^3\text{)}$ |
|---|--------------------|---|---|
| Sedimentos sueltos disponibles (depósitos aluviales locales) | Más probable | 3.004 | 3.894 |
| 10 % del área con alta susceptibilidad a deslizamientos superficiales, con espesor de 1 m | Probabilidad media | 6.761 | 8.764 |
| 25 % del área con alta susceptibilidad a deslizamientos superficiales, con espesor de 1 m | Menos probable | 16.911 | 21.922 |

4. RESULTADOS

Los resultados de la modelación numérica con *r.avaflow* se obtuvieron a partir de los parámetros físicos de entrada expuestos en la Tabla 3 y los volúmenes aluvionales definidos para cada escenario (Tabla 4).

La Figura 4 muestra, a la izquierda, los mapas de profundidad máxima del flujo, y a la derecha, la comparación entre los hidrogramas generados por *r.avaflow*, los ajustes empíricos de la literatura (Tabla 2) y el ajuste propuesto en este estudio basado en los resultados del modelo numérico (Ecuación 10).

$$Q_{\text{aluvional}}^{\text{máx}} = 0,036 \cdot V_{\text{Aluvión}}^{0,830} \quad (10)$$

Resultados modelación r.avaflow y comparación de hidrogramas

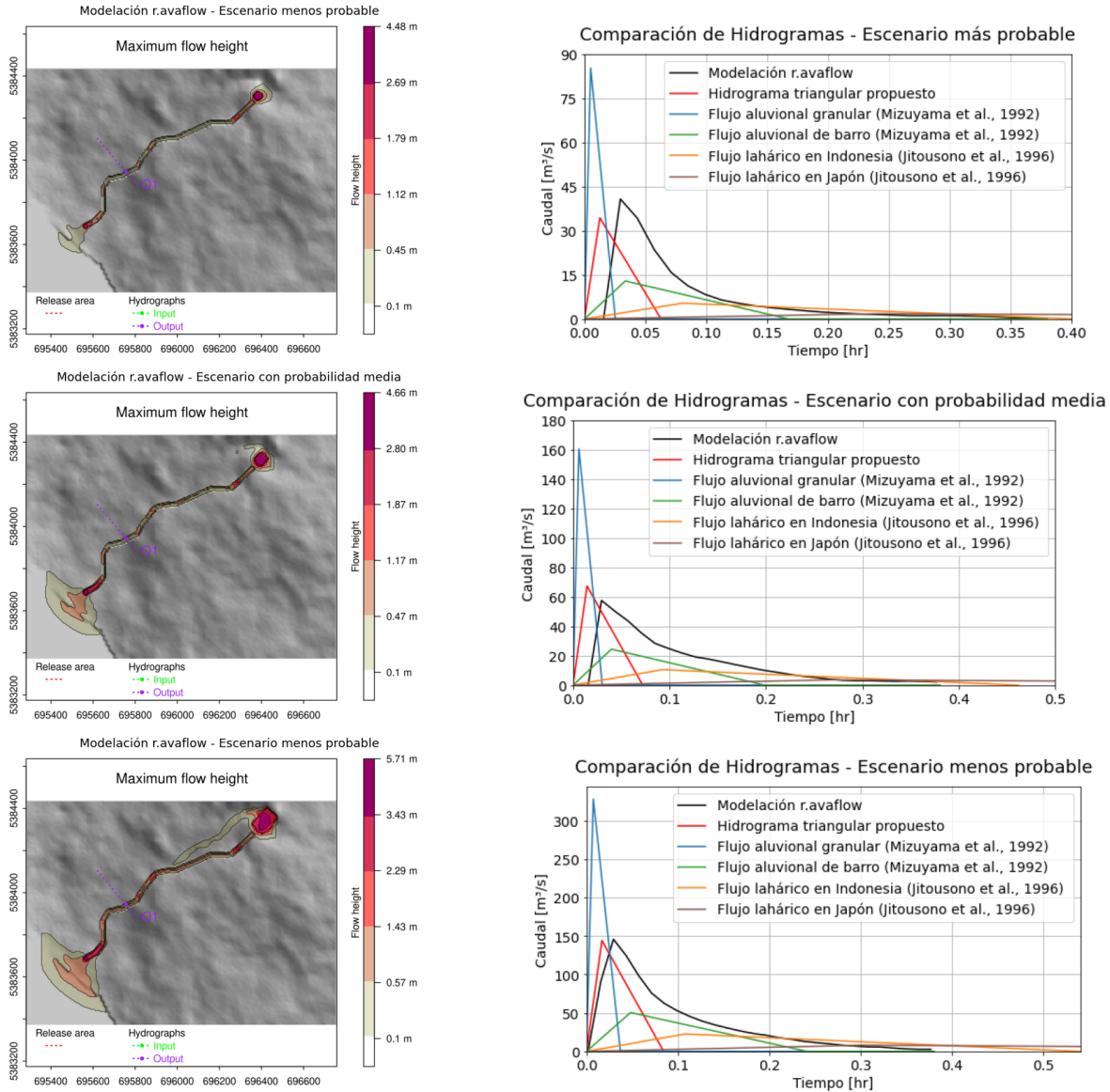


Figura 4: Comparación de hidrogramas. A la izquierda: mapa de altura máxima obtenido de la modelación *r.avaflow*. A la derecha: comparación de hidrogramas para ambos enfoques.

En cuanto a los mapas de inundación obtenidos, el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia (y menor volumen) no logra reproducir adecuadamente la zona impactada durante el evento de 2023, subestimando el área afectada. En contraste, los escenarios con probabilidad media y baja resultan en áreas afectadas mayores a dicho evento. Considerando que SERNAGEOMIN estimó que el volumen geométrico del deslizamiento superficial en aproximadamente 4000 m^3 , los resultados del modelo numérico parecen razonables.

La Tabla 5 resume los parámetros de los hidrogramas aluvionales generados mediante ambos enfoques. En ella se presentan los valores de caudal máximo $Q_{aluvional}^{m\acute{a}x}$, duración total del evento t_d , tiempo al caudal máximo t_p .

Las diferencias en los valores de caudal máximo alcanzados entre los distintos ajustes empíricos y la modelación con *r.avaflow* son evidentes. Estas se relacionan principalmente con el valor del coeficiente c , que determina en gran medida la magnitud del hidrograma. Ajustes con menor c generan hidrogramas de menor caudal y mayor duración, mientras que valores más altos concentran el flujo en periodos de tiempo más acotados.

Tabla 5: Parámetros principales de los hidrogramas aluvionales obtenidos.

| Fuente | T = 30 | | | T = 100 | | | T = 300 | | |
|---|---|------------|------------|---|------------|------------|---|------------|------------|
| | $Q_{aluvional}^{m\acute{a}x}$ [m ³ /s] | t_d [hr] | t_p [hr] | $Q_{aluvional}^{m\acute{a}x}$ [m ³ /s] | t_d [hr] | t_p [hr] | $Q_{aluvional}^{m\acute{a}x}$ [m ³ /s] | t_d [hr] | t_p [hr] |
| Flujo aluvional granular (Mizuyama et al., 1992) | 85,28 | 0,03 | 0,01 | 160,56 | 0,03 | 0,01 | 328,26 | 0,04 | 0,01 |
| Flujo aluvional de barro (Mizuyama et al., 1992) | 12,90 | 0,17 | 0,03 | 24,48 | 0,20 | 0,04 | 50,52 | 0,24 | 0,05 |
| Volcán Merapi, Indonesia (Jitousono et al., 1996) | 5,37 | 0,40 | 0,08 | 10,54 | 0,46 | 0,09 | 22,59 | 0,54 | 0,11 |
| Volcán Sakurajima, Japón (Jitousono et al., 1996) | 1,79 | 1,21 | 0,24 | 3,63 | 1,34 | 0,27 | 8,07 | 1,51 | 0,30 |
| Modelación <i>r.avaflow</i> | 40,76 | 0,38 | 0,08 | 57,57 | 0,38 | 0,08 | 145,85 | 0,38 | 0,08 |
| Hidrograma triangular propuesto | 34,38 | 0,06 | 0,01 | 67,41 | 0,07 | 0,01 | 144,29 | 0,08 | 0,02 |

5. DISCUSIÓN

Los resultados evidencian diferencias significativas entre los hidrogramas generados por el enfoque empírico y el modelo numérico *r.avaflow*, particularmente en el caudal máximo. Estas diferencias están fuertemente determinadas por el coeficiente c , cuyo valor influye directamente en la magnitud del caudal calculado mediante la Ecuación 2 de Rickenmann (1999). Ajustes con menor c , como los correspondientes a flujos laháricos, entregan caudales sustancialmente menores y eventos más prolongados, lo que podría subestimar la intensidad del fenómeno en quebradas como Las Toninas. A partir de la Tabla 2, se observa que el valor de c puede variar hasta en dos órdenes de magnitud. El ajuste propuesto en este estudio ($c = 0,036$ y $\beta = 0,83$) para la construcción del hidrograma triangular, resultó en un valor de c dentro del rango encontrado en la literatura (Tabla 2).

Un aspecto relevante es que, si bien ambos enfoques parten del mismo volumen inicial de sedimentos, el volumen total asociado al hidrograma extraído de *r.avaflow* resulta mayor. Por ejemplo, para el evento de probabilidad media, el volumen del hidrograma aluvional generado por *r.avaflow* alcanza aproximadamente $20.000 m^3$, es decir, más del doble del volumen inicial ($6.761 m^3$) (Tabla 4). Esta diferencia se debe a que el modelo numérico incorpora procesos de incorporación de sedimento a lo largo del flujo, lo que incrementa el volumen movilizado aguas abajo. Por lo tanto, dicho proceso presenta un desafío relevante al momento de ajustar el volumen del aluvión de diseño.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo comparó dos enfoques para la generación de hidrogramas aluvionales asociados con deslizamientos superficiales en la quebrada Las Toninas: uno empírico, basado en la ecuación de Rickenmann (1999), y otro numérico, mediante el modelo *r.avaflow*. Ambos enfoques permiten construir hidrogramas que representan la condición de borde de entrada para modelos hidráulicos de mayor detalle en el abanico aluvial.

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- El enfoque empírico, aunque más simple de implementar, requiere la calibración de los coeficientes c y β para reflejar adecuadamente la magnitud del evento. Basado en los valores presentados en la literatura, el coeficiente β muestra baja variabilidad y tiene un fundamento hidrodinámico sustentado en el análisis dimensional de Rickenmann (1999). En cambio, el coeficiente c puede variar hasta dos órdenes de magnitud según el tipo de flujo, lo que introduce una incertidumbre significativa en su aplicación.
- El modelo *r.avaflow* ofrece una representación del hidrograma del aluvión con mayor fundamento físico. Su capacidad para simular el desarrollo del flujo permite generar hidrogramas que incorporan las condiciones del terreno y la reología del flujo aluvional.
- Este estudio evidencia que la elección del enfoque para generar hidrogramas aluvionales debe estar alineada con el nivel de detalle requerido en el análisis. Mientras el enfoque empírico permite una aproximación rápida, su uso puede introducir errores considerables en la condición de borde, afectando la confiabilidad de los resultados en caso de requerir modelaciones numéricas de detalle.

El modelo *r.avaflow* permite implementar modelos multifásicos que distinguen explícitamente entre agua, sólidos finos y gruesos, y los esfuerzos dispersivos de cada fase. Además, permite calibrar los procesos de entrainment. Como trabajo futuro, se espera evaluar el impacto de estas funcionalidades, con el fin de determinar si su integración mejora la representación del fenómeno y las estimaciones obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Proyecto AFB230001 ANID y de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP-DOH).

REFERENCIAS

- Argentino, A. S. G. M., Andino, P. M., et al. (2007). Movimientos en masa de la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas.
- Gertsch, E., Lehmann, C., & Spreafico, M. (2012). *Methods for the estimation of erosion, sediment transport and deposition in steep mountain catchments*. CHR/KHR.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Jitousono, T., Shimokawa, E., & Tsuchiya, S. (1996). Debris flow following the 1984 eruption with pyroclastic flows in merapi volcano, indonesia. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 48(Special), 109–116.
- Mella, M., Duhart, P., Quiroz, D., & Salazar, E. (2023). Remoción en masa en estero toninas, ruta-7, comuna de puerto montt, región de los lagos. Unpublished technical report. Informe Técnico (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería: 14 p. Santiago.
- Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., & Pudasaini, S. P. (2017). r. avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), 553–569.
- Mitchell, A., Zubrycky, S., McDougall, S., Aaron, J., Jacquemart, M., Hübl, J., Kaitna, R., & Graf, C. (2022). Variable hydrograph inputs for a numerical debris-flow runout model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1627–1654.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., & Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. In *Internationales symposion: Interpraevent* (pp. 99–108).
- ONR 24800:2009 (2009). Schutzbauwerke der Wildbach- und Lawinenverbauung – Begriffe und ihre definitionen sowie Klassifizierung. <https://www.austrian-standards.at>. Austrian Standards International.
- Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural hazards*, 19, 47–77.
- Salm, B. (1993). Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Annals of Glaciology*, 18, 221–226.
- Salm, B., Burkhard, A., & Gubler, H. (1990). *Berechnung von fliesslawinen: eine anleitung für praktiker mit beispielen*. Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/Davos.
- Savage, S. B. & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of fluid mechanics*, 199, 177–215.
- Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual review of fluid mechanics*, 13(1), 57–77.
- Wang, Y., Hutter, K., & Pudasaini, S. P. (2004). The savage-hutter theory: a system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik: Applied Mathematics and Mechanics*, 84(8), 507–527.
- Yang, L., Wei, Y., Wang, W., & Zhu, S. (2019). Numerical runout modeling analysis of the loess landslide at yining, xinjiang, china. *Water*, 11(7), 1324.