

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA ALUVIONAL Y EJEMPLO DE APLICACIÓN EN
QUEBRADA BOLOSCHI, CAJÓN DEL MAIPO.**

ALEX GARCÉS CATALÁN¹
MARTÍN IGNACIO RÍOS ESPÓSITO²
SANTIAGO RAFAEL MONTSERRAT MICHELINI³
MARISOL LARA CASTILLO⁴
SOFIA REBOLLEDO LEMUS⁵
JAIME GONZALEZ CANALES⁶
DIEGO ALEJANDRO PINTO GARAY⁷
MARCIA ALEJANDRA PAREDES ARAVENA⁸

RESUMEN

Este estudio presenta cómo evaluar la zonificación de la amenaza aluvional, aplicada a la Quebrada Boloschi en el Cajón del Maipo. Se comparan dos enfoques para representar el aluvión de diseño: (1) un modelo combinado que incorpora la crecida líquida y aluvional mediante una concentración volumétrica variable, y (2) un modelo separado que simula la crecida líquida y el flujo de detritos de forma independiente, aplicando leyes de resistencia específicas para cada tipo de escurrimiento. Ambos enfoques fueron implementados mediante el software FLO-2D para eventos con periodos de retorno de 30, 100 y 300 años. Los resultados indican que el enfoque combinado tiende a sobreestimar los niveles de amenaza, al no permitir la correcta caracterización de la intensidad del flujo. En cambio, el modelo separado entregó resultados más consistentes con la evidencia observada durante el evento de 2021, reduciendo significativamente las áreas clasificadas con amenaza media. Esta diferencia resalta la importancia de una modelación diferenciada según el tipo de flujo para apoyar correctamente la planificación territorial en zonas expuestas a flujos aluvionales.

¹Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: agarces@uchile.cl

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

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

⁴Profesora Adjunta, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: mlarac@uchile.cl

⁵Profesora Adjunta, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: srebolle65@gmail.com

⁶Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile - email: jaigonzalez@ug.uchile.cl

⁷Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: diego.pinto@amtc.uchile.cl

⁸Investigadora Asociada, Advanced Mining Technology Center (AMTC) - email: marcia.paredes@amtc.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La falta de estándares metodológicos para la zonificación de la amenaza representa un desafío para tomadores de decisiones ya que distintas metodologías pueden producir resultados disímiles. El presente estudio muestra el efecto que tienen decisiones sobre cómo modelar el evento aluvional en la zonificación de la amenaza.

Para comprender el análisis realizado en el presente estudio y sus resultados, es necesario definir los siguientes conceptos:

- **Crecida líquida:** Evento hidrológico caracterizado por un aumento de caudal, donde el sedimento no es capaz de modificar las condiciones de escurrimiento.
- **Crecida aluvional:** Evento hidrológico de transporte de una mezcla de agua y sedimento con características distintas a las del agua sin sedimentos (comportamiento reológico no-Newtoniano).
- **Aluvión de diseño:** Un flujo de detritos de cierta magnitud, asociado a un período de retorno específico, cuya caracterización se basa en un hidrograma de crecida que incluye tanto el caudal líquido como el gasto sólido. Su magnitud se define a partir de variables como el caudal máximo, su duración y concentración volumétrica de sedimentos, la cual puede variar durante la crecida. El volumen total del aluvión debe estar asociado a un escenario de amenaza representado por una probabilidad de excedencia o un escenario específico de aporte de sedimentos.
- **Zonificación de la amenaza aluvional:** Proceso de delimitar espacialmente áreas con distintos niveles de amenaza (alta, media, o baja) en función de la magnitud y recurrencia de aluviones (Varnes, 1984; Hürlimann et al., 2008). Esta se basa en la combinación de “aluviones de diseño” asociados con periodos de retorno representativos (por ejemplo, 30, 100 o 300 años), los cuales son clasificados en función de su intensidad. La distribución espacial de la intensidad se obtiene a partir de la simulación numérica de flujos de detritos.

La modelación numérica del aluvión de diseño se realizó mediante dos metodologías distintas, cuya diferencia radica en cómo se define la condición de borde de entrada (hidrograma). La primera consiste en una modelación combinada que utiliza una concentración volumétrica variable para representar conjuntamente la crecida líquida y la crecida aluvional. La segunda, en cambio, modela ambos fenómenos por separado, permitiendo una representación más específica y diferenciada de sus respectivas dinámicas.

Las implicancias de esta decisión metodológica son identificables en los mapas de amenaza resultantes. Además, dichas implicancias se cuantifican en función de las áreas clasificadas con distintos niveles de amenaza y del número de viviendas que quedarían zonificadas bajo un nivel de amenaza media. A partir del evento aluvional de 2021 registrado en quebrada Boloschi, Cajón del Maipo, se discute qué enfoque parece más razonable y se recomienda para definir la condición de borde adecuada para el estudio de la amenaza aluvional.

2. ZONA DE ESTUDIO

La quebrada Boloschi se encuentra ubicada en la comuna de San José de Maipo, localidad de San Alfonso (Figura 1). La quebrada presenta parámetros físicos que propician una respuesta hidrológica rápida, de acuerdo a un área de 0,3 km², desnivel de 850 m s.n.m., pendiente promedio de 1,09 m/m (Tabla 1) y tiempo de concentración de alrededor de 6 minutos.

Tabla 1: Caracterización física de la quebrada Boloschi.

Parámetro	Valor
Área (km ²)	0,29
Elev. Mínima (m s.n.m.)	1272
Elev. Máxima (m s.n.m.)	2122
Pendiente promedio (m/m)	1,09
Largo del cauce principal (km)	1,26
Índice de Melton	1,43
Densidad de drenaje (km ⁻¹)	9,32
Tiempo de concentración (min)	6

Los cauces de quebrada Boloschi presentan tramos con diversas pendientes, tal como se presentan en la Figura 1, El tramo A, correspondiente a cauce en la zona media de la cuenca, presenta una pendiente de 0,64 m/m; mientras que el tramo B, correspondiente a una ladera, posee una pendiente de 0,91 m/m. En los tramos C a E, las pendientes decrecen hacia aguas abajo con pendientes de 0,32 m/m, 0,26 m/m y 0,14 m/m, respectivamente.

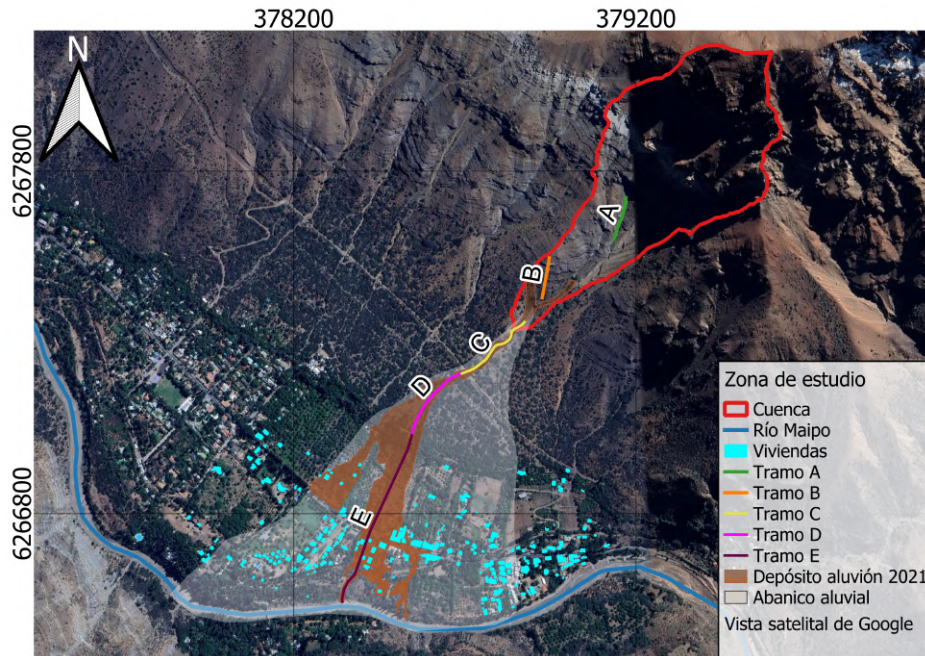


Figura 1: Zona estudio de la Quebrada Boloschi. SRC: UTM 19S.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio busca evaluar la implicancia de modelar la inundación y el flujo de detritos en una misma simulación o por separado. En este sentido, se da por hecho el trabajo necesario para lograr un modelo numérico que represente correctamente los eventos de crecida que pueda generar la quebrada en estudio. En consecuencia, no se discute en este artículo el procedimiento realizado para obtener los mapas de velocidad y altura de escurrimiento resultantes del modelo numérico. Para fines del presente estudio, basta mencionar que los resultados se obtuvieron a partir del modelo comercial FLO-2D (monofásico bidimensional), donde se modelaron inundaciones (crecidas líquidas) mediante la tradicional ecuación de Manning y flujos de detritos mediante la ley de resistencia “cuadrática” (O’Brien et al., 1993; O’Brien & García, 2009), cuyos parámetros fueron calibrados mediante análisis retrospectivo (*back-analysis*) del evento ocurrido en 2021 en quebrada Boloschi.

3.1. Zonificación de la amenaza

La zonificación de la amenaza aluvional e inundación se basa en la combinación entre la intensidad del flujo y su probabilidad de ocurrencia, permitiendo estimar su daño potencial. Esta metodología se fundamenta en los criterios propuestos por (BUWAL, 1997), una guía suiza ampliamente reconocida para la elaboración de mapas de amenaza. La Tabla 2 presenta los rangos de intensidad, diferenciando entre crecidas líquidas y aluviones, considerando tres niveles de probabilidad de ocurrencia: alta, media y baja. Este estudio propone asociar los periodos de retorno a 30, 100 y 300 años, respectivamente (Raetzo et al., 2002).

Los niveles de intensidad se interpretan cualitativamente según su potencial de daño. Un nivel alto implica riesgo de lesiones a personas incluso dentro de edificaciones y daños graves o destrucción de infraestructura. El nivel medio representa riesgos fuera de edificaciones, con posibilidad de daños menores en las construcciones. En el nivel bajo, las amenazas para personas son leves incluso al aire libre, y sólo se esperan daños menores en las edificaciones. Esta clasificación permite priorizar medidas de mitigación según el nivel de amenaza involucrada.

Para construir los mapas de amenaza, se desarrollan modelos hidráulicos para cada escenario que se desea estudiar. Cada uno de estos mapas clasifica los valores de altura y velocidad en categorías de intensidad según los umbrales definidos en la Tabla 2. Finalmente, los mapas de intensidad asociados a las distintas probabilidades se combinan píxel a píxel para generar un único mapa de amenaza, asignando en cada píxel el nivel más desfavorable observado.

3.2. Métodos de modelación del aluvión de diseño

Tradicionalmente las tormentas de diseño estudiadas en hidrología corresponden a eventos de 24 horas, por lo que sus hidrogramas de crecida corresponden a caudales en función del tiempo que superan las 24 horas de duración. En este sentido parece razonable estudiar el aluvión de diseño mediante el hidrograma obtenido del estudio hidrológico, asignándole cierta concentración volu-

Tabla 2: Zonificación de la amenaza según tipo de flujo, rango de intensidad, y probabilidad de ocurrencia.

		Tipo de flujo		Probabilidad de ocurrencia		
		Inundación	Aluvión	Alta	Media	Baja
Intensidad	Alta	$h \geq 2 \text{ m}$ o $h \cdot v \geq 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h \geq 1,0 \text{ m}$ o* $v \geq 1,0 \text{ m/s}$	Alta	Alta	Media
	Mediana	$0,5 \leq h < 2 \text{ m}$ o $0,5 \leq h \cdot v < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h < 1,0 \text{ m}$ y* $v < 1,0 \text{ m/s}$	Media	Media	Baja
	Baja	$h < 0,5 \text{ m}$ y $h \cdot v < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	—	Baja	Baja	Muy baja
	Muy baja	Áreas no afectadas		Muy baja	Muy baja	Muy baja

*En BUWAL (1997) la conjunción (y) y la disyunción (o) se encuentran al revés. Sin embargo, aquí se propone utilizar la disyunción para el rango de intensidad alto debido a que es un criterio más conservador.

métrica para representar la carga de sedimentos del aluvion de diseño (ver Método 1 en la sección 3.2.1).

Sin embargo, este razonamiento presenta una dificultad relevante al momento de zonificar la amenaza aluvional. En base a los resultados de la modelación hidráulica, ¿qué criterio de la Tabla 2 se debe utilizar para definir los rangos de intensidad del flujo?. Para solucionar esto, se propone el Método 2 (ver sección 3.2.2), el cual modela por separado el evento de crecida líquida (flujo de agua), respecto del la modelación del flujo de detritos y sus resultados son categorizados por separado en función de la Tabla 2.

3.2.1. Método 1: Modelación combinada

A partir de un estudio hidrológico se determinaron los hidrogramas de crecida en la quebrada Bologoschi. Para esto se utilizaron los hidrogramas unitarios sintéticos (HUS) de Linsley, Gray y SCS. El hietograma de la tormenta de diseño de 24 horas se construyó mediante el método de bloques alternados, el cual maximiza la intensidad de precipitación en el centro del hidrograma. Se optó por utilizar el hidrograma de crecida obtenido a partir del método HUS SCS, debido a que éste resultó en el mayor caudal líquido instantáneo máximo.

Debido a que los flujos de detritos están asociados a procesos de remociones en masa, su caudal máximo puede aumentar significativamente respecto del caudal líquido obtenido a partir del estudio hidrológico. Por esta razón, la normativa austriaca (ONR 24802:2011, 2011) propone que los flujos aluvionales consideren un factor de amplificación (FA) de al menos 3.5 veces el caudal líquido (Q_{liq}) (Ecuación 1).

$$Q_{Aluvion} = Q_{liq}^{Ampl} = F A Q_{liq} \quad (1)$$

Este caudal líquido amplificado (Q_{liq}^{Ampl}) representa un pulso aluvional ($Q_{Aluvion}$). Para este estudio, el pulso aluvional considera una concentración volumétrica de sedimentos constante de $C_V = 0,54$ en torno al instante de caudal máximo. Considerando que dicho pulso debe reproducir el volumen de sedimentos correspondiente al aluvión de diseño, la duración del pulso aluvional puede determinarse a partir de la integral del hidrograma aluvional en función del tiempo.

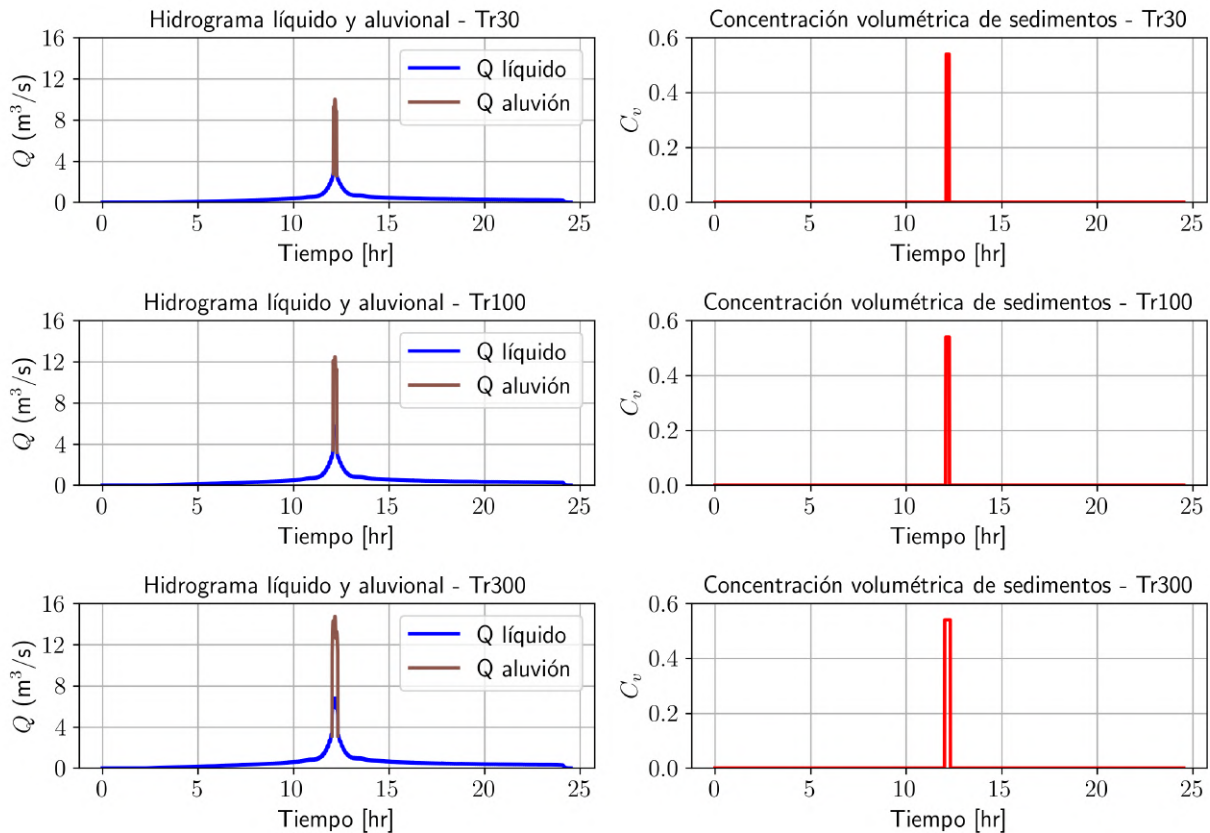


Figura 2: Hidrogramas de crecida y concentración volumétrica variable para Método 1.

3.2.2. Método 2: Modelación separada

El método 2 considera la modelación de una crecida líquida, asociada a una tormenta de diseño de 24 horas, mediante la ley de resistencia tradicional para escurrimientos de agua, es decir, mediante la ecuación de Manning (comportamiento reológico Newtoniano). Los hidrogramas de crecida líquida (Figura 3) corresponden a los mismos hidrogramas del método 1, sin factor de amplificación.

Por otra parte, el método 2 considera la modelación del flujo de detritos con comportamiento reológico no-Newtoniano debido al efecto de las altas concentraciones de sedimento en la mezcla

sólido-líquido. El hidrograma del aluvión se define triangular, por lo que su forma se puede caracterizar a partir de su caudal máximo $Q_{\text{Aluvión}}^{\text{max}}$, tiempo de duración t_D y tiempo instantáneo de caudal máximo t_p .

El caudal máximo del aluvión corresponde al mismo caudal máximo obtenido en el método 1 mediante el factor de amplificación (ecuación 1). La duración del hidrograma triangular es tal que su integral en función del tiempo recupera el volumen del aluvión de diseño. El tiempo al instante de caudal máximo se definió arbitrariamente como un 20% de la duración del hidrograma ($t_p = 0,2 t_D$).

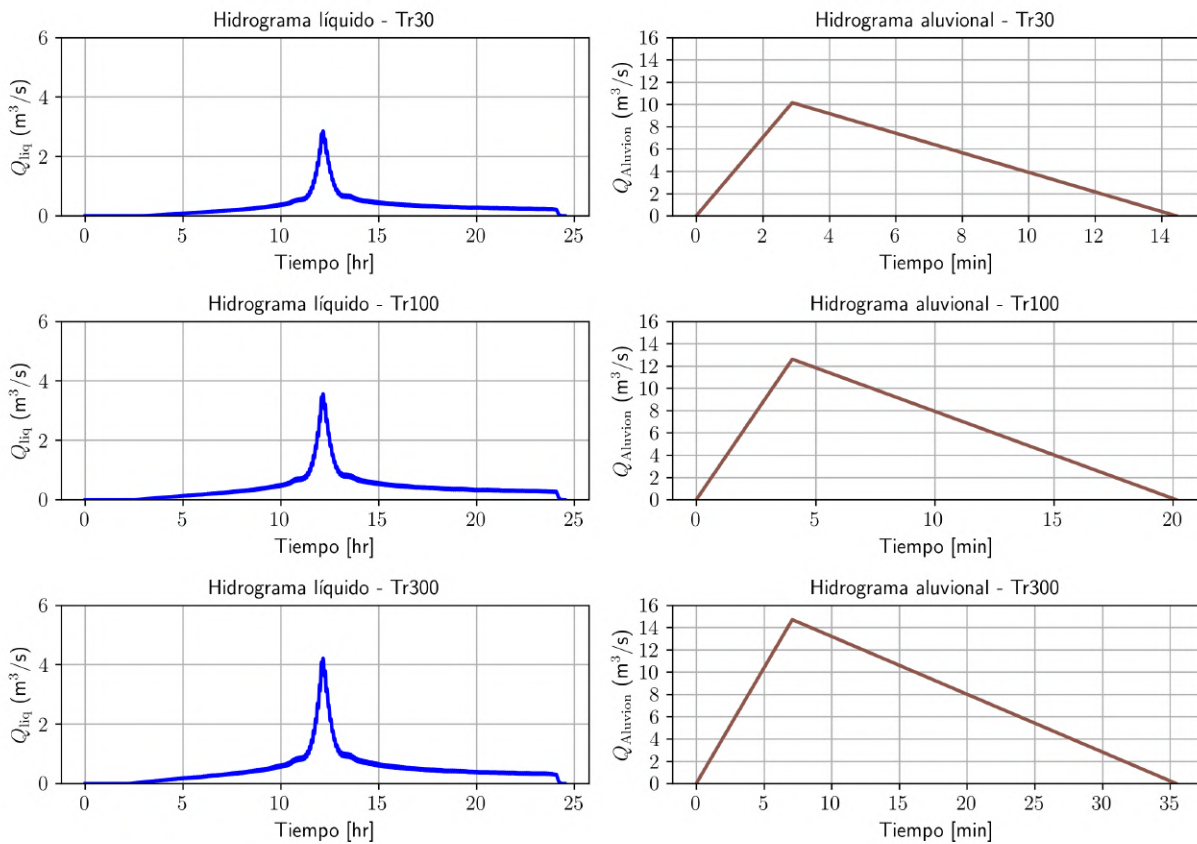


Figura 3: Hidrogramas de crecida líquida (izquierda) y crecida aluvional (derecha) para Método 2. Los hidrogramas de aluvión consideran una concentración volumétrica constante $C_V = 0.54$.

4. RESULTADOS

4.0.1. Método 1: Modelación combinada

El método 1 consiste en tres simulaciones numéricas asociadas a los tres periodos de retorno ($Tr = 30, 100$ y 300 años). Los resultados de altura y velocidad de escurrimiento fueron categorizados en niveles de intensidad de aluvión según la Tabla 2. La Figura 4 presenta los mapas de intensidad

resultantes para los tres periodos de retorno. No se observan diferencias significativas en cuanto a variaciones de la extensión de la mancha de inundación entre Tr 30 y 100 años.

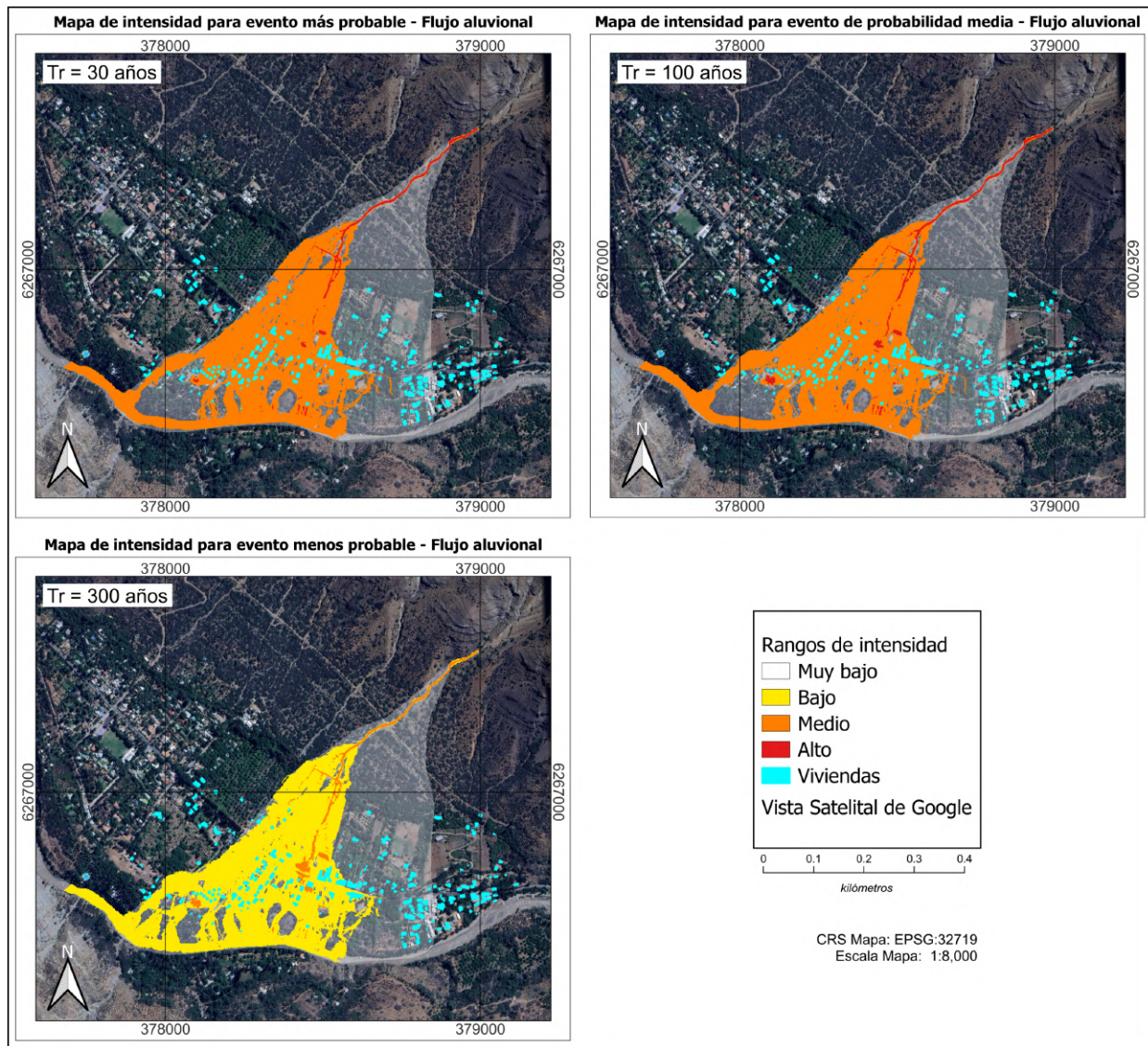


Figura 4: Mapas de intensidad resultantes del Método 1. Total: tres mapas de intensidad.

Debido a que los rangos de intensidad de la Tabla 2 no considera intensidad baja, los mapas de intensidad para los periodos de retorno 30 y 100 años no poseen zonas de amenaza baja. Por otra parte, para el escenario de baja probabilidad de ocurrencia (Tr = 300 años), una intensidad mediana se traduce en una amenaza de categoría baja. El mapa de amenaza asociado con el Método 1 se presenta en la Figura 5, donde se contabilizaron 74 casas están bajo un nivel de amenaza media. La zona identificada con blanco traslúcido, asociada con un nivel de amenaza muy bajo, corresponde a la delimitación del abanico aluvial.

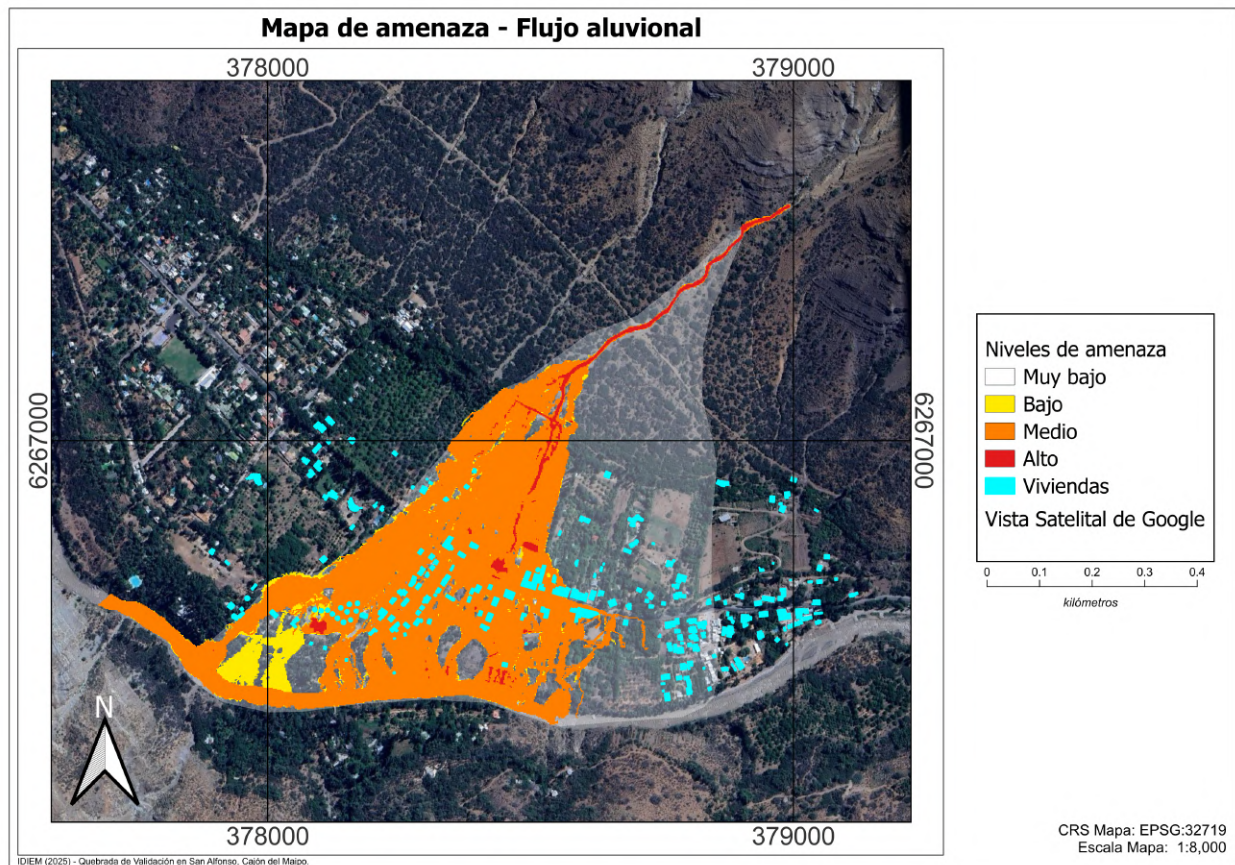


Figura 5: Mapa de amenaza resultante del Método 1 a partir de los tres mapas de intensidad.

4.0.2. Método 2: Modelación separada

El método 2, en cambio, se compone de seis simulaciones ya que considera dos tipos de flujo (inundación y aluvión) para cada periodo de retorno ($Tr = 30, 100, \text{ y } 300$ años). Los resultados de estas simulaciones se reflejan en los mapas de intensidad de la Figura 6.

Los mapas de intensidad para crecida líquida con $Tr = 30$ y 100 años sólo indican una amenaza nivel medio para el tramo donde el escurrimiento se encuentra canalizado, es decir, en la parte alta de la zona de estudio. Una vez que el flujo se desconfinan y esparce sobre el abanico y la terraza fluvial, su nivel de amenaza pasa a ser bajo, pero abarcando una zona de inundación similar al método 1. Por el contrario, los resultados de flujo aluvional para $Tr = 30$ y 100 años presentan áreas afectadas considerablemente menores. Esto evidencia la mayor resistencia al escurrimiento del aluvión. En los aluviones de diseño $Tr = 30$ y 100 años, su tramo canalizado alcanza un nivel de amenaza alto, mientras que la zona no confinada un nivel de amenaza medio.

Los niveles de intensidad para el aluvión de $Tr = 300$ años se ven castigados por su baja probabilidad de ocurrencia, resultando en un nivel de amenaza menor.

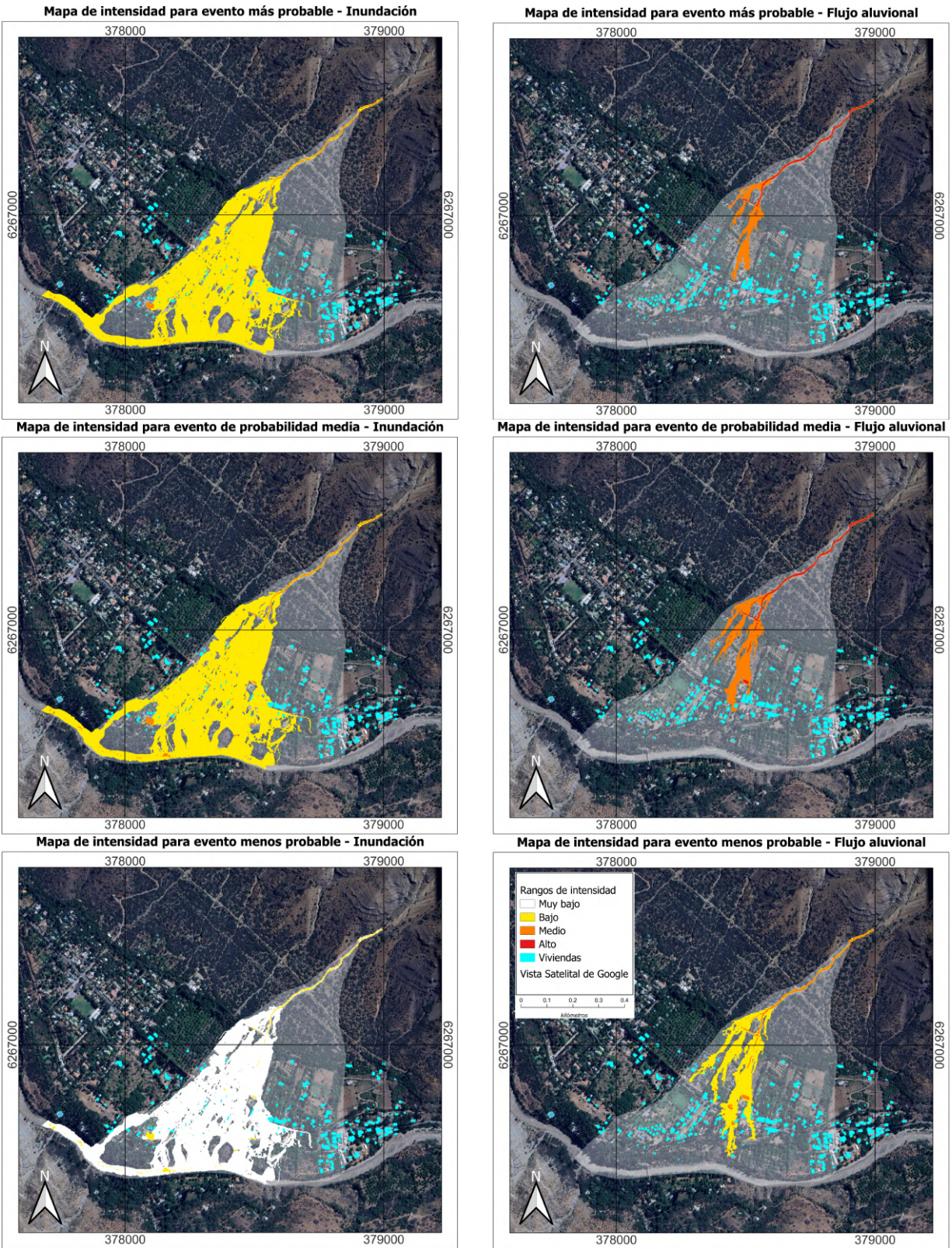


Figura 6: Mapas de intensidad resultantes del Método 2. (Izquierda) Crecida líquida. (Derecha) Aluvión. Total: seis mapas de intensidad.

A partir de la combinación de los mapas de intensidad de la Figura 6, se obtuvo el mapa de amenaza para crecida líquida y aluvional del método 2 (Figura 7). En este caso sólo 5 casas se encuentran en la zona de amenaza nivel medio.

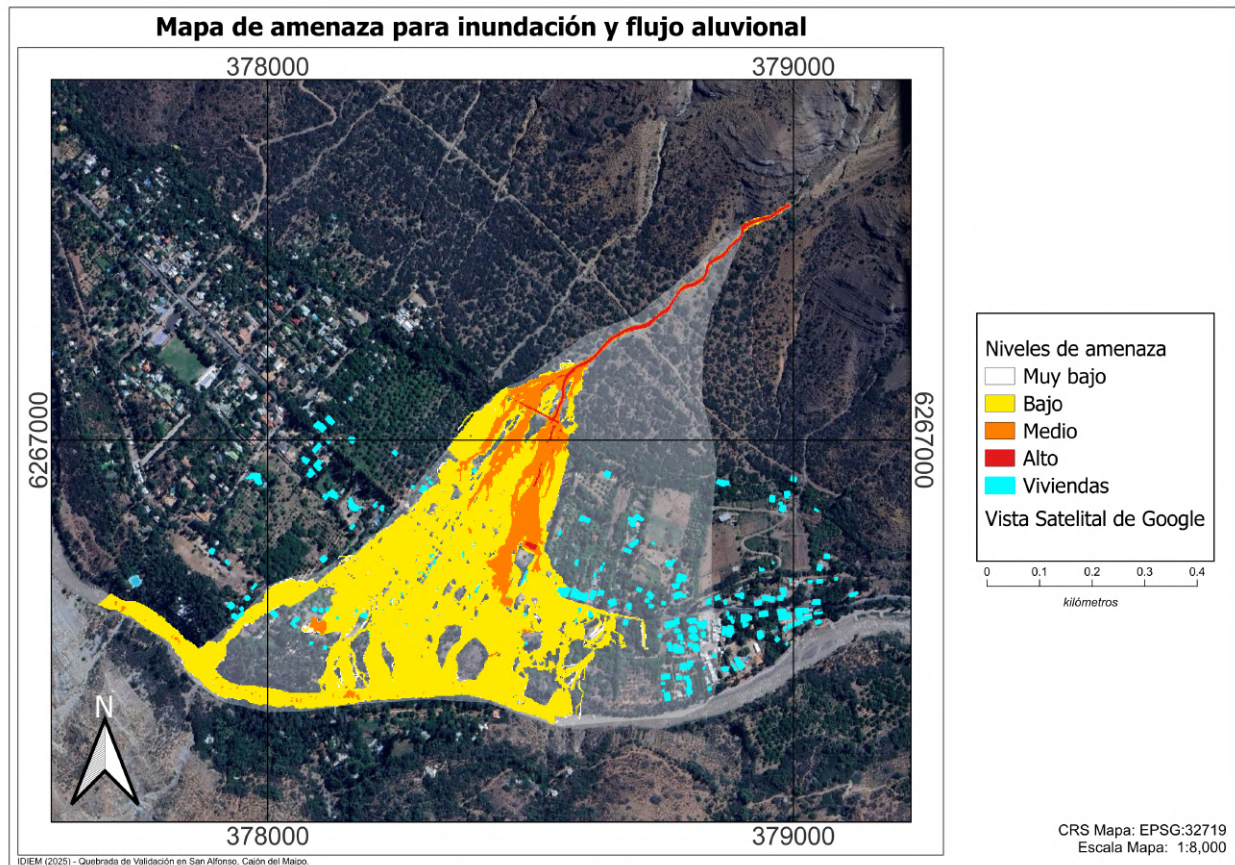


Figura 7: Mapa de amenaza resultante del Método 2 a partir de los seis mapas de intensidad.

5. DISCUSIÓN

A partir de la comparación de los mapas de amenaza de ambos métodos (Figura 5 vs Figura 7) se observa que, si bien el área total afectada es similar, existe una diferencia significativa en la distribución de los niveles de amenaza. El Método 1 presenta zonas bajo amenaza media para casi la totalidad de la mancha de inundación, mientras que la zona de amenaza media según el Método 2 corresponde a un área mucho más acotada. Estas diferencias se cuantifican en la Tabla 3, donde el área con amenaza media disminuye de 22,08 hectáreas (Método 1) a 2,95 hectáreas (Método 2), y el área con amenaza baja aumenta de 1,66 hectáreas a 17,96 hectáreas, respectivamente.

El motivo de esta diferencia radica en cómo se representa la condición de borde del aluvión de diseño. En el Método 1 (modelación combinada), se emplea un único hidrograma con concentración volumétrica variable, lo que implica distintas relaciones de agua y sedimentos a lo largo del tiempo y el espacio dentro de una misma simulación. Esto impide distinguir si los mapas de altura y velocidad utilizados para la zonificación de la amenaza corresponden a características de la crecida líquida

Tabla 3: Comparación de extensiones zonificadas para cada nivel de intensidad

Nivel amenaza	Extensión [há]	
	Método 1	Método 2
Área total	24,63	21,34
Bajo	1,66	17,96
Medio	22,08	2,95
Alto	0,89	0,43

o aluvional. En consecuencia, no se tiene claridad respecto de qué rangos de intensidad (altura y velocidad de escurrimiento) utilizar para la zonificación de la amenaza. A modo de ejemplo, en este trabajo se le asignaron criterios de aluvión a las simulaciones realizadas para el Método 1 resultando en una sobrestimación del nivel de amenaza.

Para entender mejor el problema de categorización del Método 1 es necesario recordar que los niveles de intensidad están asociados a su potencial daño. Es decir su clasificación en rangos de altura y velocidad de escurrimiento se relaciona con la presión de impacto ($p_{impacto}$) del flujo según la ecuación 2.

$$p_{impacto} = \rho h v^2 \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del fluido/mezcla, h la altura de escurrimiento y v su velocidad. La densidad del agua es de 1000 kg/m^3 , mientras que la de un flujo de detritos gira en torno a $1800 \text{ kg/m}^3 - 2300 \text{ kg/m}^3$. Esto significa que, para iguales condiciones de altura y velocidad de escurrimiento, un flujo aluvional puede incluso duplicar su presión de impacto en comparación con un flujo de agua. Por ello, utilizar los rangos de intensidad de aluvión en momentos donde en realidad corresponde a una crecida líquida exagera el daño potencial del flujo.

Además, la Tabla 2 establece que para aluviones no existe el nivel de intensidad bajo. Todo flujo de detritos se clasifica al menos con intensidad media, por lo que el Método 1 asigna amenaza media o alta a toda la mancha para $T = 30$ y 100 años. Por el contrario, el Método 2 evita este problema al representar por separado la crecida líquida y el aluvión. Este comportamiento guarda mejor relación con lo observado en el evento de 2021, el cual afectó una zona de 9 hectáreas de extensión.

6. CONCLUSIONES

Este estudio evidenció la relevancia de cómo se representa el aluvión de diseño en la modelación numérica para la zonificación de la amenaza. Se compararon dos enfoques: un modelo combinado, que incorpora la crecida líquida y aluvional en una única simulación, y un modelo separado, que distingue entre ambos tipos de flujo (agua y aluvión) mediante simulaciones independientes y leyes de resistencia específicas. Esta decisión metodológica impacta directamente en la definición de las condiciones de borde de entrada y en el número y tipo de simulaciones requeridas.

Los resultados muestran que el Método 1 tiende a sobrestimar los niveles de amenaza, debido a

la dificultad de aplicar correctamente los rangos de intensidad cuando se modela una mezcla con propiedades variables en el tiempo. En contraste, el Método 2 entregó resultados más consistentes con la evidencia empírica del evento aluvional de 2021, sugiriendo una mejor representación física del proceso.

Desde una perspectiva práctica, el Método 1 identifica 74 viviendas bajo amenaza media, mientras que el Método 2 reduce esa cifra a solo 5. Esto deja en evidencia que la elección de las condiciones de borde para representar el aluvión de diseño tiene implicancias directas en la planificación territorial y en la gestión del riesgo.

Adicionalmente, al vincular los rangos de intensidad con la presión de impacto del flujo, se concluye que la densidad es una variable clave. Sin embargo, esta no se considera explícitamente en la matriz de amenaza. Por ello, una modelación diferenciada según el tipo de escurrimiento permite obtener una zonificación más precisa y coherente con las propiedades físicas del fenómeno. En función de estos resultados, se recomienda que los estudios de amenaza aluvional se desarrollen mediante el Método 2.

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). A. Garcés agradece la beca Doctorado Nacional 21191593 ANID.

REFERENCIAS

- BUWAL (1997). Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt Für Umwelt, Wald Und Landschaft, Bundesamt Für Wasserwirtschaft, Bundesamt Für Raumplanung. 44.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., & Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, 102(3-4), 152–163.
- O'Brien, J. S. & García, R. (2009). *FLO-2D Reference Manual*. Available from: www.flo-2d.com.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244–261.
- ONR 24802:2011 (2011). Schutzbauwerke der Wildbach- und Lawinerverbauung – Gestaltung von Einlaufbauwerken. <https://www.austrian-standards.at>. Austrian Standards International.
- Raetzo, H., Lateltin, O., Bollinger, D., & Tripet, J. (2002). Hazard assessment in switzerland—codes of practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 263–268.
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO. Paris, 63pp.