

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EFFECTO DE LA PRESENCIA DE GRANIZOS EN LA REOLOGÍA DE FLUJOS ALUVIONALES Y METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE DAÑO POTENCIAL**

**ALEX GARCES C.<sup>1</sup>**  
**JORGE ROMERO M.<sup>2</sup>**  
**GERMAN AGUILAR M.<sup>3</sup>**  
**ALDO TAMBURRINO T.<sup>4</sup>**  
**SANTIAGO MONTSERRAT M.<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

La resistencia al escurrimiento de flujos aluvionales esta dominada por la composición relativa de agua, sedimento fino y sedimento grueso. Entre los días 29 y 31 de enero de 2021, un evento de precipitación gatilló flujos aluvionales en la localidad de Cantarrana, Región de O'Higgins. Los flujos aluvionales tuvieron una importante presencia de granizos, lo que se evidenció en sus depósitos. Por otra parte, los flujos de barro generaron daños a la infraestructura presente en los conos aluvionales. En este estudio se caracteriza el efecto de la presencia de granizos en la resistencia al escurrimiento de la mezcla sólido (sedimento+granizo)-líquido. Con este resultado, se generaron mapas de daño potencial basados en un criterio de intensidad desarrollado en Suiza. Se espera que este criterio de daño potencial, y en especial los mapas asociados, ayuden a mejorar la percepción de riesgo para habitantes asentados en conos aluvionales.

---

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado, Departamento de Ingeniería Civil e Investigador. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: [agarces@uchile.cl](mailto:agarces@uchile.cl)

<sup>2</sup> Estudiante de doctorado, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Manchester. – email: [jorge.romeromoyano@manchester.ac.uk](mailto:jorge.romeromoyano@manchester.ac.uk)

<sup>3</sup> Investigador Asociado. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: [german.aguilars@amtc.cl](mailto:german.aguilars@amtc.cl)

<sup>4</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil e Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: [atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)

<sup>5</sup> Investigador Asociado. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: [santiago.montserrat@amtc.cl](mailto:santiago.montserrat@amtc.cl)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Entre los días 29 y 31 de enero 2021, un evento de precipitación en Chile Central (33-36°S) gatilló la generación de flujos aluvionales en un cordón montañoso de baja altura en la zona de Malloa, Región de O'Higgins. Una de las características del evento fue la ocurrencia de granizos. Los granizos se caracterizan por una mayor energía cinética respecto de una gota de agua por lo que su impacto en el suelo es más erosivo (Coppus y Imeson, 2002). Estas precipitaciones gatillaron la erosión de las laderas de las quebradas y el arrastre de suficiente sedimento y granizos para generar los aluviones que afectaron a las comunidades de Cantarrana, Corcolén y Caracoles. En Chile Central, los eventos aluvionales son comunes en la Cordillera de los Andes y en la Precordillera, incluyendo eventos con granizos. Sin embargo, eventos aluvionales que afecten la Cordillera de la Costa son escasos o están poco reportados en la literatura. En particular para la zona de Malloa, no existe registro previo de un evento con similares características.

La reología de un fluido es aquella relación entre su tasa de deformación angular y el esfuerzo necesario para dicha deformación. En mecánica de fluidos, la ley de resistencia es la ley constitutiva que relaciona la reología con el comportamiento macroscópico de un flujo. En la literatura existen escasos reportes que aborden la presencia de granizos en los flujos aluvionales. Por ejemplo, Hübl y Steinwendtner (2001) reportan un evento aluvional en Austria con presencia de granizos, pero no analizan su efecto sobre la ley de resistencia en el flujo aluvional. La ley de resistencia para este tipo de flujos se compone de 5 esfuerzos principales: (1) el esfuerzo de fluencia (2) esfuerzo de corte Mohr-Coulomb, (3) esfuerzos viscosos, (4) esfuerzos turbulentos y (5) esfuerzos dispersivos. O'Brien y García (2009) indican que la viscosidad de la matriz fluida es función del tipo y porcentaje de sedimento fino y de la temperatura de la matriz. Flujos de detritos viscosos presentan altas concentraciones de sedimento y, en consecuencia, altos valores de esfuerzo de fluencia y viscosidad. Por el contrario, flujos de detritos más diluidos pasan a tener escurrimientos turbulentos donde el esfuerzo turbulento y dispersivo domina la resistencia al flujo (Takahashi, 2014).

En este estudio se caracterizará el efecto que tienen los granizos en la reología de la mezcla y su importancia al momento de calibrar los parámetros del modelo reológico. Para ello se estudian los flujos aluvionales que afectaron a la localidad de Cantarrana, gatillados por la tormenta de lluvia y granizos ocurrida del 30 de enero 2021. Calibrada la reología, se propone un criterio de intensidad de flujo para estimar el daño potencial que estos eventos son capaces de producir basado en la experiencia internacional (Hürlimann et al., 2008). Finalmente se concluye sobre la aplicabilidad de este criterio para las viviendas de la localidad de Cantarrana.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO**

Cantarrana es una pequeña localidad en la Región de O'Higgins ubicada a los pies de un cordón montañoso cuya cima más alta corresponde al Cerro Negro (555 msnm). Este cordón montañoso varía en altura desde 200 hasta 500 metros respecto de la planicie aluvial del Río Claro. Sus laderas en la zona de interés presentan pendientes que van de 50% a 150%, mientras que los conos aluvionales presentan pendientes de 10% hasta 45%.

El área de estudio se compone de 4 quebradas, CR1 a CR4 (Figura 1). La quebrada ubicada más al norte, CR1, posee un área de 0.18 km<sup>2</sup> e inundó 3 casas en su cono aluvional, sin destruirlas. En la quebrada CR2, cuya área es de 0.12 km<sup>2</sup>, el principal impacto que sufrieron sus pobladores consistió en la destrucción de bodegas e infraestructura apícola que fueron arrasados por los flujos aluvionales, además de la entrada de flujos al interior de las viviendas. En la quebrada CR3, cuya área es de 0.16 km<sup>2</sup>, una casa ubicada prácticamente en el ápice del cono aluvional fue destruida por los flujos aluvionales. El cono aluvional asociado a la quebrada CR4 es el área más poblada con alrededor de 25 casas, donde los flujos inundaron varias de las viviendas. El área de la quebrada CR4 asciende a 0.36 km<sup>2</sup>, siendo la quebrada más grande de las cuatro.

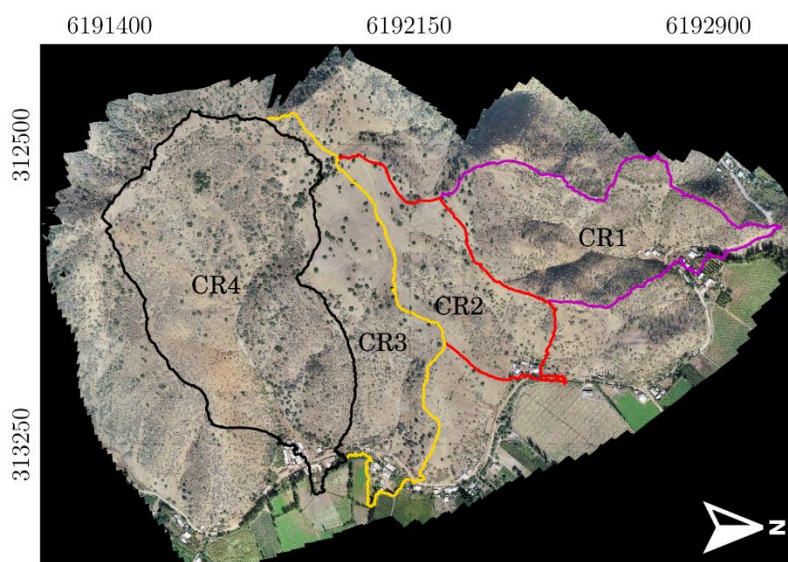


Figura 1. Área de estudio. Los polígonos describen los límites de las 4 quebradas activadas en la localidad de Cantarrana.

## 2.1 Antecedentes

Posterior al evento de tormenta que gatilló los flujos aluvionales se realizó una campaña de terreno en la cual se identificaron las zonas afectadas y se entrevistó a los pobladores de las 4 quebradas en estudio. Los habitantes de la zona registraron el evento en imágenes y videos que resultan muy útiles para entender las principales características de estos flujos aluvionales (Figura 2). Si bien no existen mediciones adecuadas de la velocidad que estos flujos alcanzaron, se logró inferir la velocidad en los abanicos aluvionales, al pie de las quebradas, por medio de los videos proporcionados por los habitantes de la zona. En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos para la velocidad del flujo.

Tabla 1. Estimaciones de velocidad de flujos aluvionales en la zona del cono aluvional. Datos estimados a partir de registros audiovisuales de los propios habitantes.

Quebrada	Velocidad estimada [m/s]
CR1	3.0
CR2	Sin Información
CR3	4.0
CR4	2.0

La reología de los flujos aluvionales está dominada por la presencia relativa de agua, sedimento fino y sedimento grueso (O'Brien y García 2009). Para determinar la concentración relativa de sedimento fino respecto del sedimento grueso, se levantaron muestras de sedimento en los distintos depósitos. El tamaño que diferencia el sedimento fino del sedimento grueso se definió igual a 0.5 mm, lo cual corresponde a arena media (Wentworth, 1922).

Durante la campaña de terreno, el porcentaje de granizo presente en los depósitos no pudo ser medido directamente debido a que éste ya se había derretido. El porcentaje de granizos fue estimado a partir de imágenes del depósito donde se observa cierto grado de segregación. Es decir, debido al tamaño de los granizos, el depósito presenta una mayor concentración de granizos cerca de la superficie de éste. Es importante considerar este fenómeno ya que una simple inspección de la superficie del depósito puede resultar en una sobreestimación de la cantidad de granizos. La concentración volumétrica de granizos se estimó en un 15% del depósito.



Figura 2. Depósitos de granizos en Cantarrana.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Modelo numérico

Para abordar el problema se utilizó el software comercial FLO-2D. Éste es un modelo de conservación basado en volúmenes finitos capaz de resolver la propagación de ondas de crecida, tanto para agua como para flujos detríticos en topografías complejas (O'Brien y García, 2009). El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad (ecuación (1)) y momentum (ecuación (2)) promediadas en la vertical. Es decir, se trata de un modelo bidimensional.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (2)$$

$$Sf_y = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t}$$

En la ecuación previa,  $h$  y  $V$  corresponden a la altura y la velocidad de escurrimiento, respectivamente. Los subíndices  $x$  e  $y$  indican las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente.  $g$  es la aceleración de gravedad y  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía. Para estimar este último término es necesario adoptar una ley de resistencia. En el caso de escurrimientos de agua, donde el sedimento no afecta la reología del fluido, se utiliza la ecuación de Manning. Por otro lado, cuando la carga de sedimentos es suficiente para afectar la reología de la mezcla, FLO-2D adopta el “modelo cuadrático” de la ecuación (3). Esta ecuación considera los esfuerzos de fluencia, viscosos, dispersivos (colisiones) y turbulentos (O’Brien et al., 1993; O’Brien y García., 2009; Naef et al., 2006).

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (3)$$

En la ecuación (3),  $\tau_y$  es el esfuerzo de fluencia,  $\gamma_m$  es el peso específico de la mezcla agua-sedimentos,  $\eta$  la viscosidad dinámica,  $K$  un parámetro de resistencia laminar y  $n_{td}$  un número de Manning modificado.

La concentración volumétrica de sedimentos,  $C_V$ , tiene un importante efecto sobre los parámetros  $\tau_y$ ,  $\eta$ , y  $n_{td}$  (ecuaciones 4,5 y 6). O’Brien y García (2009) proponen las siguientes relaciones empíricas para estimar dichos parámetros en función de la concentración volumétrica de sedimentos ( $C_V$ ):

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_V} \quad (4)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_V} \quad (5)$$

$$n_{td} = n b e^{m C_V} \quad (6)$$

En las ecuaciones (4), (5), y (6),  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  ( $i = 1,2$ ) son coeficientes que deben ser calibrados. (O’Brien et al., 1993; O’Brien y García, 2009). Basta con revisar el manual de FLO-2D para notar que existe una gran cantidad de autores que reporta valores para estos coeficientes en función de datos de laboratorio y/o datos de terreno. Zegers et al. (2020) realizaron un análisis de sensibilidad sobre los principales parámetros que dominan la ley de resistencia utilizada por FLO-2D. Los autores destacan cuáles son los parámetros más sensibles para los resultados de las variables de estado, las cuales son la altura y velocidad de escurrimiento, y el área y profundidad del depósito.

Además de los parámetros reológicos, FLO-2D utiliza como variables de entrada el caudal líquido ( $Q_L$ ) y la concentración volumétrica de sedimentos ( $C_V$ ) para generar el caudal detrítico ( $Q_D$ ), el cual considera el efecto del volumen de los sedimentos en el volumen de la mezcla (ecuación (7)). La concentración volumétrica media  $C_V^{mean}$  se estimó a partir de los volúmenes depositados medidos en terreno ( $V_{dep}$ ) y el volumen de agua total del hidrograma de crecida ( $V_W$ ) (ecuación (8)). Gracias a que los sedimentos se depositaron al pie de la quebrada, sin conexión al río Claro, la totalidad de los sedimentos movilizados pudo ser contabilizada. El volumen de agua se obtiene desde un análisis hidrológico.

$$Q_D = \frac{1}{1 - C_V} Q_L \quad (7)$$

$$C_V^{mean} = \frac{V_{dep}}{V_W + V_{dep}} \quad (8)$$

### 3.2 Hidrología

Para el evento de precipitación extrema que afectó a Chile Central entre los días 29 y 31 de enero de 2021, una imagen satelital Aqua/MODIS reveló la existencia de 3 núcleos de nubosidad dentro de los cuales el mayor se ubicó sobre la Cordillera de la Costa al oeste de Rancagua, en la Región de O'Higgins (Figura 3.a). En el área donde se ubicó el núcleo de nubosidad sobre la Cordillera de la Costa de la Región de O'Higgins se dispone de 4 estaciones meteorológicas: San Vicente, El Tambo, Quinta de Tilcoco y El Arenal. Estas estaciones demuestran que las precipitaciones se concentraron en 4 pulsos (Figura 3.b). El primer pulso acumuló una precipitación entre 23 y 35 mm en un periodo de 10 horas. Luego, un segundo pulso acumuló entre 0.4 y 3 mm en un periodo de 4 horas. El tercer evento, responsable de la generación de flujos aluvionales, acumuló entre 1.4 y 6 mm en un periodo menor a 2 horas. Según testigos, este tercer evento fue acompañado, además, de una intensa precipitación de granizos por un periodo de entre 5 y 10 minutos. Finalmente, un cuarto evento de precipitación acumuló entre 7 y 24 mm en un periodo de 24 horas sin generar nuevos flujos aluvionales.

Debido a que el tercer pulso fue el responsable de los flujos aluvionales, en este estudio se estima el hidrograma asociado sólo a este pulso de precipitación. Para la generación del hidrograma líquido se utilizó la metodología del hidrograma unitario sintético SCS (Chow et al., 1959). Se supuso que el suelo estaba saturado al ocurrir el pulso 3 debido a la precipitación registrada en los pulsos 1 y 2. En consecuencia, los 6mm de precipitación asociados al evento fueron considerados como precipitación efectiva. Los tiempos de concentración ( $T_c$ ), estimados por medio de la relación de Kirpich (1940), entrega valores de 6 a 7 minutos. Como el área bajo la curva el hidrograma unitario debería ser igual a una escorrentía directa de 10mm,  $q_p$  se calcula según la ecuación (9) (Chow et al., 1959). Finalmente, el caudal máximo asociado a cada quebrada se calcula considerando la precipitación efectiva en mm según la ecuación (10).

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (9)$$

$$Q_p = \frac{Pq_p}{10} \quad (10)$$

En las ecuaciones (9) y (10),  $A$  corresponde al área de la cuenca,  $C$  es un coeficiente igual a 2.08, y  $P$  es la precipitación efectiva en mm. El tiempo transcurrido desde el inicio del pulso hasta el caudal máximo ( $T_p$ ) se calcula según la relación presentada en la Tabla 2. Por otra parte, el tiempo de recesión del hidrograma, es decir, el tiempo desde la ocurrencia del caudal máximo hasta el término del programa se define igual a  $1.67 T_p$ . En la Tabla 2 se resumen

los valores obtenidos para los principales parámetros que describen el hidrograma sintético asociado a cada cuenca.

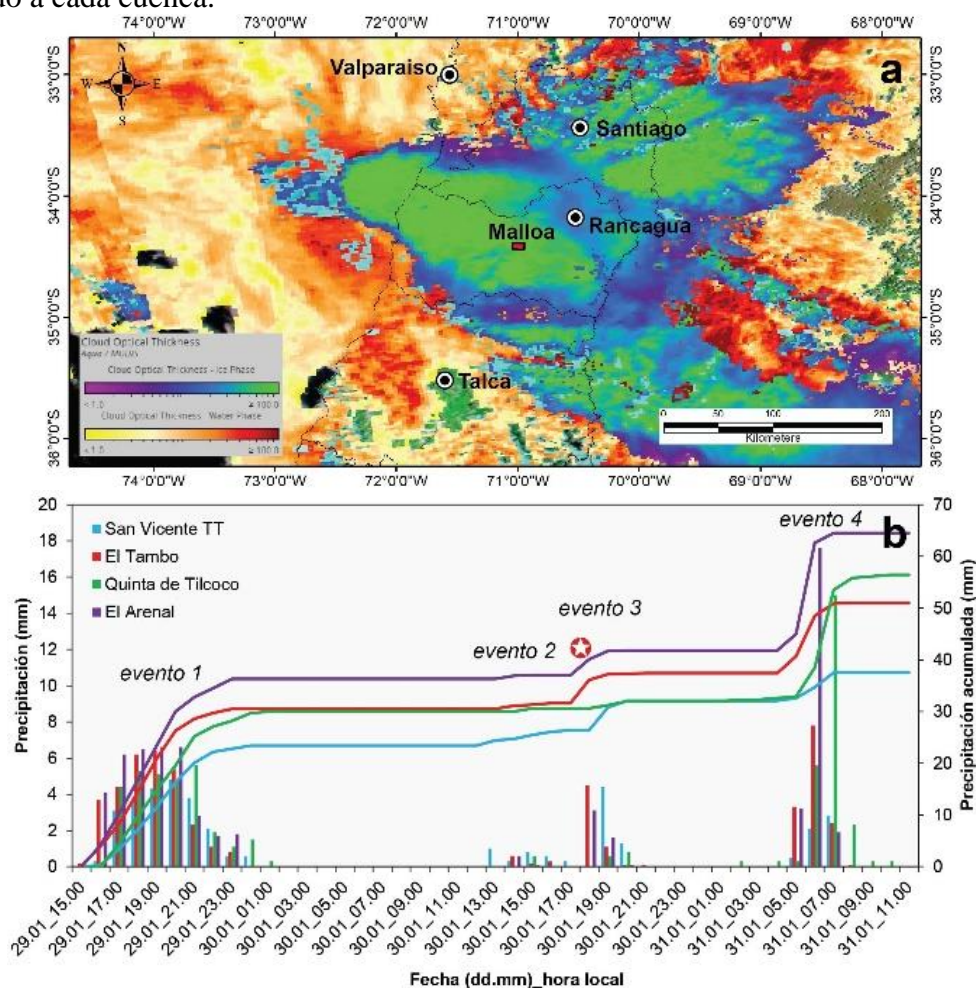


Figura 3. Evento de precipitación 29-31 de enero 2021. (a) Imagen satelital AQUA/MODIS. (b) Hietogramas de precipitación de las 4 estaciones meteorológicas más cercanas a Cantarrana. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Tabla 2. Parámetros del hidrograma unitario sintético.

Quebrada	Tiempo concentración (Kirpich) [min]	Duración precipitación [min]	Tiempo de retardo [min]	Tiempo a ocurrencia de $q_p$ [hr]	Caudal máx unitario [m3/s]	Caudal máx [m3/s]
	$T_c$	$t_{pp}$	$t_r = 0.6T_c$	$T_p = \frac{t_{pp}}{2} + t_r$	$q_p$	$Q_p$
1	6.2	6.0	3.7	0.11	4.2	2.49
2	6.1	6.0	3.7	0.11	2.2	1.32
3	7.0	6.0	4.2	0.12	2.1	1.25
4	6.7	6.0	4.0	0.12	6.3	3.79

Para mejorar la estabilidad de los modelos numéricos, se agregó un caudal base los hidrogramas unitarios. El hidrograma parte sin caudal en  $t = 0 \text{ hr}$ . Luego, para  $t = 0.1 \text{ hr}$  el caudal asciende al caudal base. A partir de ese momento inicia el hidrograma unitario

El hidrograma resultante de esta metodología se presenta en la Figura 4

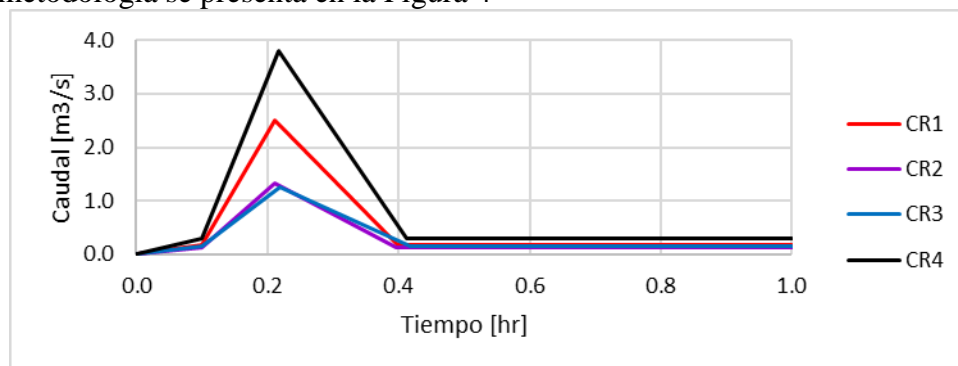


Figura 4. Hidrogramas sintéticos resultantes para las quebradas CR1 a CR4.

### 3.3 Topografía

Durant la campaña de terreno se levantó una topografía de la zona afectada en Cantarrana por medio de la técnica de aerofotogrametría utilizando un vuelo de vehículo aéreo no tripulado (dron). La topografía abarca una zona de 1.65 km<sup>2</sup> que incluye las 4 principales cuencas aluvionadas y la zona de depósito al pie de estas. El vuelo se realizó a una altura fija del suelo de 150 metros gracias a la habilidad del plan de vuelo de seguir el relieve de la topografía. De este modo, se obtuvo una resolución en el mapa de elevación digital igual a 13cm/píxel. En la Figura 5.a se observa al operador del dron junto a los habitantes del abanico aluvial localizado al pie de la quebrada CR2 afectada por los flujos aluvionales.



Figura 5. Trabajo de terreno. (a) Operador del dron y habitantes de la zona afectada observan labores de levantamiento topográfico. (b) Habitantes de la zona retiran depósitos de sedimento alrededor de sus viviendas.

### 3.4 Daño potencial

Una de las preocupaciones que generan los flujos aluvionales en zonas pobladas es el potencial daño que pueden ocasionar. Se adoptó con este fin un criterio de intensidad/daño a partir de intervalos de altura y velocidad del flujo aluvional propuestos por Hürlimann (2008) (Tabla 3) para generar mapas de daño potencial sobre la infraestructura existente en el lugar. La intensidad asociada a la altura y velocidad del flujo de detritos en la Tabla 3 representa la potencial energía de impacto de estos flujos contra obstáculos. Los intervalos de intensidad

alto, medio y bajo de la Tabla 3 fueron definidos en función de la altura y velocidad de escurrimiento para infraestructura en Suiza, por lo que su aplicabilidad a la infraestructura de la localidad de Cantarrana será analizada y discutida en el presente estudio.

Tabla 3. Criterio para daño potencial de la infraestructura asociado con diferentes alturas y velocidades de escurrimiento. Adaptación de la tabla propuesta por Hürlimann (2008).

Intensidad	Daño Potencial
$h \geq 1\text{m}$ o $v \geq 1.5\text{ m/s}$	<b>Alto</b>
$h < 1\text{ m}$ y $0.4\text{m/s} \leq v < 1.5\text{m/s}$	<b>Medio</b>
$h < 0.4\text{ m}$ y $v < 0.4\text{ m/s}$	<b>Bajo</b>

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Calibración de los parámetros reológicos

Los hidrogramas triangulares generados alcanzan caudales líquidos desde los  $1.25\text{ m}^3/\text{s}$  hasta los  $3.8\text{ m}^3/\text{s}$ . Los tiempos de concentración para las 4 quebradas estudiadas van de los 6 a los 8 minutos, lo cual deja en evidencia la poca o nula capacidad de reacción de los habitantes a estas crecidas aluvionales. La concentración volumétrica media de sedimentos se mantiene en un rango acotado entre 45% y 47%. Las muestras levantadas de los depósitos encontrados arrojaron una composición de granizo (15%) sedimento fino (25%) y sedimento grueso (60%).

La selección de los parámetros reológicos se llevó a cabo basado en distintos autores compilados por O'Brien y García (2009) que reportan datos de terreno. Sin embargo, los parámetros propuestos por el manual de FLO-2D no son capaces de reproducir los flujos aluvionales apropiadamente debido a que sobreestiman la resistencia al flujo y, en consecuencia, ni la velocidad ni la zona afectada son reproducidas correctamente.

Debido a que ningún conjunto de parámetros compilados por O'Brien y García (2009) es capaz de reproducir los flujos aluvionales, se procedió a calibrar parámetros propios para los flujos aluvionales que afectaron la localidad de Cantarrana. Como punto de inicio, y debido a la alta concentración de finos, se eligió el conjunto de parámetros reológicos "Glenwood 4" (O'Brien y García, 2009), representativo de un aluvión altamente viscoso. Zegers et al. (2020) determinaron que la reología es más sensible ante los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  que a  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ . Por esta razón, se procedió a calibrar los parámetros reológicos  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , dejando fijos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ . Para la calibración de los parámetros reológicos se utilizó el sistema de soporte para la decisión de parámetros reológicos propuesto por Garcés et al. (2022), en el cual se iteran los parámetros reológicos hasta reproducir los flujos aluvionales tanto en velocidades máximas como en zonas inundadas.

Los valores que reproducen los flujos aluvionales apropiadamente son  $\alpha_1 = 0.000602$  poises,  $\alpha_2 = 0.00172\text{ dinas/cm}^2$ ,  $\beta_1 = 24$ ,  $\beta_2 = 27$ . A modo de comparación, los valores obtenidos para el esfuerzo de fluencia y viscosidad se comparan con los presentados por O'Brien y García (2009). Estos valores corresponden a los cuadrados grises de la Figura 6 y se presentan en la Tabla 4. Los parámetros reológicos se ubican claramente fuera de la nube de datos tanto para la viscosidad como para el esfuerzo de fluencia, indicando que los

parámetros recomendados por O'Brien y García (2009) en su compilación sobreestiman la resistencia al flujo de los aluviones observados en Cantarrana.

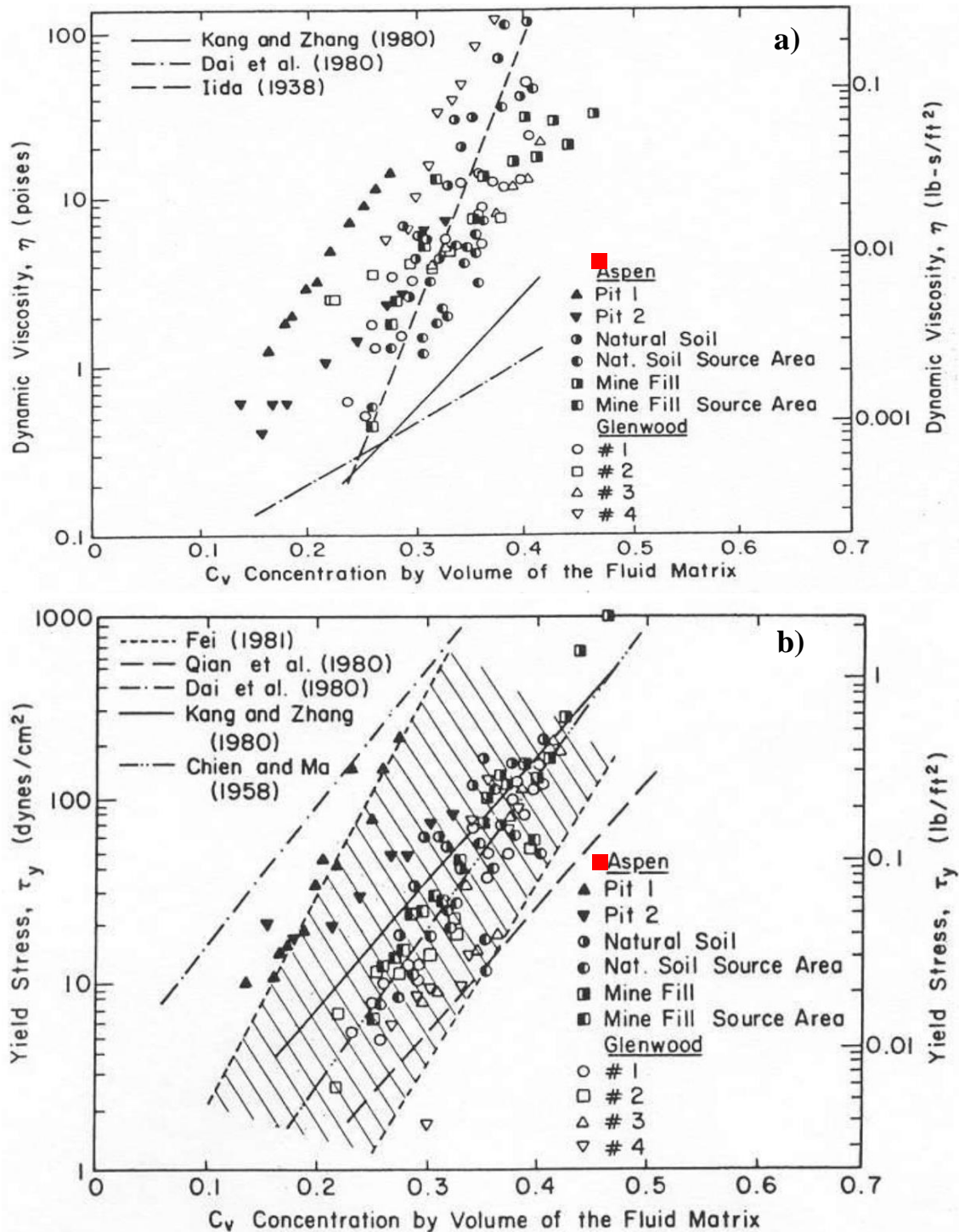


Figura 6. Valores para (a) viscosidad dinámica y (b) el esfuerzo de fluencia. Fuente: Figuras extraídas del manual FLO-2D (O'Brien y García, 2009). Cuadrados rojos indican los valores resultantes del procedimiento de calibración efectuado para los flujos aluvionales ocurridos en Cantarrana.

## 4.2 Reproducción de los flujos aluvionales

Los parámetros resultantes del procedimiento de calibración (Garcés et al., 2022) generan velocidades medias en las distintas quebradas que van de los 0.7 a los 2 m/s (Tabla 4). Los flujos modelados en CR4 presentan velocidades media y máxima similares, lo cual indica un flujo bien canalizado. Por el contrario, los flujos modelados en CR2 poseen velocidades de hasta 5.5 m/s debido a zonas de mayor pendiente en la cota de fondo del cauce principal.

Para evaluar el porcentaje de reproducción del área afectada, se asignaron índices a cada píxel del modelo numérico. Los píxeles que se encuentran dentro del área afectada vista en terreno se declaran como “Observados positivos” (OP) y los que están fuera del área afectada como “Observados negativos” (ON). Por otra parte, los píxeles inundados en la simulación numérica se declaran como “Simulado positivo” (SP) y los que no fueron inundados como “Simulado negativo”. De esta manera, los píxeles que la simulación reproduce correctamente corresponden a los “Verdaderos positivos” ( $VP=OP \wedge SP$ ). Los píxeles que la simulación reproduce incorrectamente corresponden a los “Falsos positivos” ( $FP=ON \wedge SP$ ). Los píxeles que la simulación no reproduce, pero sí son inundados en la realidad corresponden a “Verdaderos negativos” ( $VN=OP \wedge SN$ ). Este análisis de desempeño ha sido utilizado previamente por Garcés et al. (2022). Notar que  $\sum VP + \sum VN = \sum OP$ .

Tabla 4. Valores seleccionados para la viscosidad dinámica y esfuerzo de fluencia. Velocidades simuladas versus velocidades observadas. Porcentajes de reproducción del área afectada correcta (VP) e incorrecta (FP).

Quebrada	$\eta$ [Pas]	$\tau_y$ [Pa]	$V_{mean}$ [m/s]	$V_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Vel. obs. [m/s]	$\frac{\sum VP}{\sum OP}$	$\frac{\sum FP}{\sum OP}$	$\frac{\sum VN}{\sum OP}$
CR 1	4.7	54.8	0.7	3.5	3.0	66%	20%	34%
CR 2	3.0	33.6	2.0	5.5	S/I	85%	26%	15%
CR 3	3.7	42.1	0.8	4.6	4.0	59%	0%	41%
CR 4	4.5	52.4	2.0	2.4	2.0	72%	0%	28%

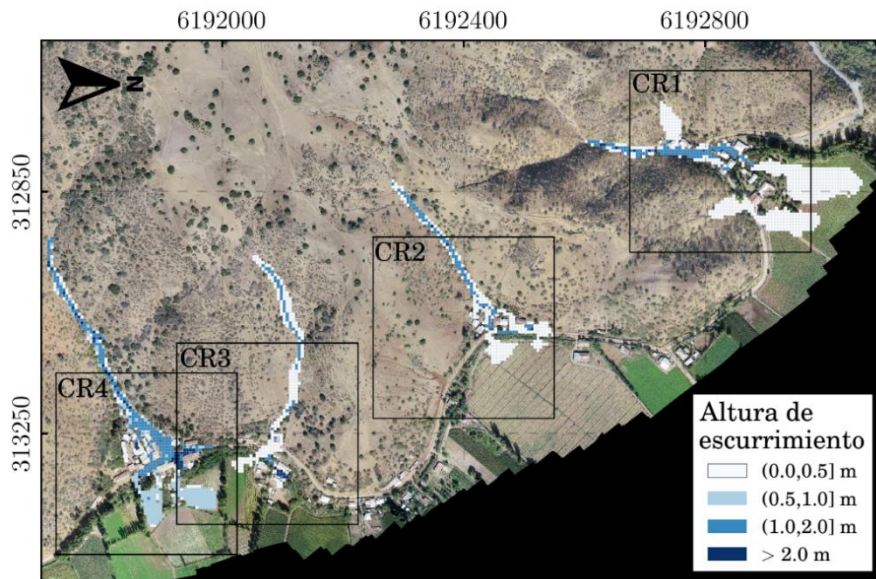


Figura 7. Mapas de inundación según modelo numérico. Los recuadros de la figura indican las zonas de zoom de la Figura 8, indexadas de CR1 a CR4.

El mapa de inundación resultante deja en evidencia el comportamiento de los flujos aluvionales ocurridos en Cantarrana (Figura 7). Al llegar a la planicie aluvial, las profundidades de escurrimiento caen por debajo del metro debido a la pérdida de confinamiento. A pesar de esto, los flujos son capaces de continuar escurriendo, especialmente en CR1 y CR4 donde los flujos alcanzaron distancias de 350 m y 250 m, medidas desde el ápice, hasta su depositación.

### 4.3 Daño potencial

Dado que la topografía fue obtenida por dron (aerofotogrametría), esta considera la infraestructura como parte del relieve. En consecuencia, los mapas de daño potencial se encuentran alterados por la infraestructura existente, donde los flujos aluvionales se ven encausados entre las casas, galpones, establos y por la ruta H-620. Las casas no fueron eliminadas de la topografía ya que inciden en el flujo, desviándolo ocasionalmente. Solo en casos específicos, se eliminó la vegetación arbórea cuyo follaje enmascara el verdadero camino que toma el flujo. Considerando la incertidumbre inherente al efecto de la infraestructura y vegetación como obstáculos para el flujo, se construyeron mapas de daño potencial según los criterios expuestos en la Tabla 3 (Figura 8). Los mapas de daño potencial demuestran que en las cuatro quebradas existen casas en zonas donde el flujo tiene la capacidad de destruirlas. En este sentido, los mapas de daño potencial y su difusión resultan útiles para mejorar la percepción de riesgo entre los habitantes de conos aluvionales.

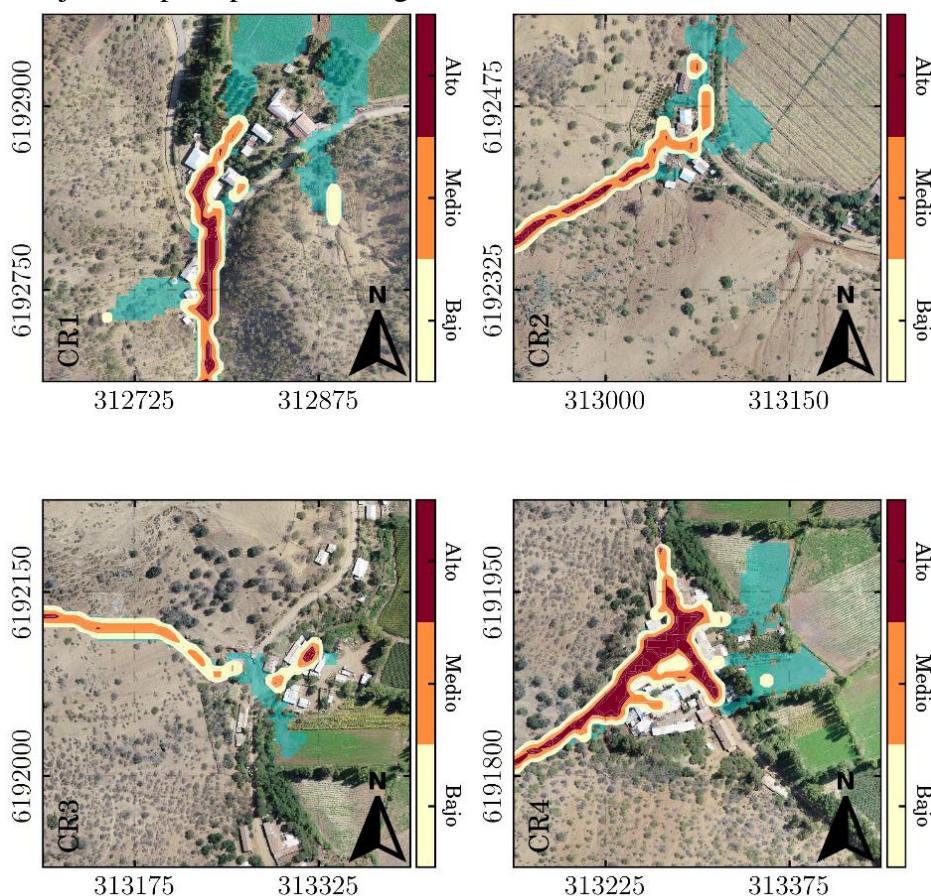


Figura 8. Daño potencial. Los valores bajo, medio, alto son resultado de la aplicación del criterio definido en la Tabla 3.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia un evento aluvional ocurrido en la localidad de Cantarrana, Región de O'Higgins. En particular, el efecto de la presencia de granizos sobre la reología de la mezcla -sólido líquido es caracterizada. A partir de registros audiovisuales, un levantamiento topográfico y el ortomosaico asociado, se calibraron parámetros reológicos de estos aluviones. A partir de estos parámetros se encontró que, para concentraciones de sedimento  $C_V \sim 0.45$ , el esfuerzo de fluencia y viscosidad caen bajo los valores usuales de eventos aluvionales con similares características sedimentológicas. Se concluye que esta reducción de la resistencia al flujo se debe a la presencia de granizos. Debido a su esfericidad y efecto lubricante de su superficie, los granizos reducen la fricción producto de las interacciones granizo-granizo y granizo-sedimento.

La poca o nula capacidad de reacción de los habitantes ante estos flujos aluvionales se debe a la cercanía de las viviendas respecto de la fuente de los aluviones en estas pequeñas quebradas. Los tiempos de concentración ( $\sim 6 \text{ min}$ ) dejan en evidencia tal cercanía. En efecto, los flujos aluvionales ocurrieron minutos después de sucedido el tercer pulso de precipitaciones que incluyó la precipitación de granizos por varios minutos según las conversaciones sostenidas con los lugareños. Por otra parte, la mayor fluidez de los flujos aluvionales debido a la presencia de granizos reduce aún más el tiempo disponible para reaccionar ante estos flujos. A pesar de esto, no se registraron víctimas fatales ni heridos de consideración.

En la quebrada CR3, una casa fue destruida en una zona estimada con un daño potencial medio-bajo. Esta condición indica que los intervalos de intensidad (altura y velocidad del flujo de detritos, Tabla 3) pueden estar subestimados para la materialidad de las casas en Cantarrana. El criterio propuesto por Hürlimann (2008) fue desarrollado para casas en Suiza cuya materialidad podría ser muy distinta por factores culturales y económicos que impactan en la materialidad de las viviendas. En consecuencia, este criterio debe ser estudiado para la materialidad de las casas de Cantarrana. Es probable que, dada su materialidad un criterio más conservador sea necesario. Por esta razón la recomendación más conservadora es que toda la zona afectada por el escurrimiento sea considerada como zona de daño potencial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al centro investigación para la minería (AMTC) y al proyecto ANID-PIA AFB180004. El primer autor agradece además la beca de Doctorado en Chile CONICYT-PCHA/DoctoradoNacional/2019 - 21191593.

## REFERENCIAS

Coppus, R., y Imeson, A. C. (2002). Extreme events controlling erosion and sediment transport in a semi-arid sub-Andean valley. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(13), 1365-1375.

Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A., & Montserrat, S. (2022). A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(2), 377-393.

Hübl, J., y Steinwendtner, H. (2001). Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(9), 639-644.

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., y Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, 102(3-4), 152-163.

Mergili, M., Emmer, A., Juřicová, A., Cochachin, A., Fischer, J. T., Huggel, C., y Pudasaini, S. P. (2018). How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1373-1389.

Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., y McArdell, B. W. (2006). Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), 155-165.

O'Brien, J. S., Julien, P. Y., y Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261.

O'Brien, J. S. y Garcia, R. (2008). FLO-2D Reference manual. Disponible en: <https://www.flo-2d.com/>

Takahashi, T. (2014). Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. CRC Press/Balkema -Taylor & Francis Group, 2nd edition.

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.

Zegers, G., Mendoza, P. A., Garces, A., y Montserrat, S. (2020). Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1919-1930.