

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE MODELOS FLO-2D Y HEC-RAS 2D EN EVENTOS ALUVIONALES
PARA LA CUENCA ESTERO SAN ALFONSO, REGIÓN METROPOLITANA**

GABRIELA PACHECO V.¹
FRANCISCO MARTÍNEZ C.²
VICTOR CUEVAS V.³

RESUMEN

Los flujos detríticos son fenómenos naturales relevantes para Chile dado su alto poder destructivo y capacidad para generar daños sobre la infraestructura y en las comunidades. La complejidad de su estudio deriva de su comportamiento no newtoniano, lo que ha impulsado el uso creciente de softwares de modelación computacional capaces de representar con precisión esta dinámica. El presente estudio compara el desempeño de los modelos bidimensionales FLO-2D y HEC-RAS 2D en la simulación de un evento aluvional ocurrido el 25 de febrero de 2017 en la cuenca del estero San Alfonso (RM), considerando diferentes periodos de retorno. Se realiza una comparación detallada de las ecuaciones de gobierno y los resultados expresados en términos de velocidad, profundidad máxima, área de inundación y longitud de escorrentía. Ambos programas proporcionan estimaciones similares en gran parte de las variables analizadas, aunque con diferencias atribuibles a las formulaciones internas, manejo de condiciones de borde y elección de parámetros. HEC-RAS destaca por su interfaz intuitiva y capacidades gráficas, mientras que FLO-2D ofrece estimaciones sólidas. Esta comparación aporta criterios relevantes para seleccionar herramientas según los objetivos de simulación y gestión del riesgo.

¹ Ingeniera Hidráulica, AMTC, Universidad de Chile – email: gabriela.pacheco@amtc.uchile.cl

² Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil, P. Universidad Católica de Valparaíso – email: francisco.martinez@pucv.cl

³ Profesor Asistente, Departamento Obras Civiles, Universidad Andrés Bello – email: victor.cuevas@unab.cl

1. INTRODUCCIÓN

En entornos montañosos, como los que predominan en Chile, los flujos de detritos, entre ellos las corrientes aluvionales, constituyen una amenaza geológica frecuente y de gran impacto, capaces de provocar daños severos sobre la infraestructura, los asentamientos humanos y el medioambiente (Sepúlveda, 1998). Estos eventos se caracterizan por la movilización súbita de grandes volúmenes de agua y sedimentos que descienden por pendientes pronunciadas, favorecidos por factores climáticos, geológicos y morfológicos propios de zonas cordilleranas (Takahashi, 1981; Iverson, 1997). La mayoría de los modelos hidráulicos convencionales se fundamentan en las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento. Sin embargo, unos pocos consideran los procesos de erosión y depósito que alteran activamente la morfología del lecho del canal. Este aspecto resulta relevante en los flujos de mezclas hiperconcentradas, las que se sitúan en un estado intermedio entre un flujo de lodo y un flujo común, y se caracterizan por concentraciones volumétricas de sedimentos (C_v) que varían entre un 20 % y un 60 %, los límites exactos y las denominaciones varían según la literatura (Pierson et al., 1970; HEC, 2025) .

A diferencia de flujos de fluidos newtonianos, los flujos hiperconcentrados presentan un comportamiento no lineal, condicionado por su naturaleza viscoplástica, que implica la existencia de un esfuerzo de cedencia que debe superarse para que el material comience a fluir. Su dinámica está influida por múltiples factores, como la fricción interna, los choques entre partículas y la cohesión entre sedimentos finos (Brea y Spalletti, 2003). En este contexto, los flujos hiperconcentrados pueden modelarse mediante leyes reológicas de tipo viscoplástico. En particular, el modelo cuadrático propuesto por O'Brien y Julien (1988) representa el esfuerzo cortante total (τ) como la suma de tres componentes: un esfuerzo de cedencia (τ_y), un término viscoso asociado al flujo laminar (τ_v) y un componente cuadrático (τ_D) vinculado a efectos de tipo dispersivo-inercial. Esta formulación permite capturar con mayor realismo el comportamiento transicional entre régimen sólido y fluido que caracteriza a estos fenómenos. Ante la complejidad física y geomorfológica de los flujos aluvionales, la modelación hidráulica ha recurrido a enfoques empíricos, ensayos de laboratorio y herramientas numéricas avanzadas. En este contexto, los modelos bidimensionales FLO-2D y HEC-RAS 2D se han consolidado como plataformas ampliamente utilizadas, al resolver las ecuaciones de conservación de masa y momento en forma acoplada.

El 25 y 26 de febrero de 2017, precipitaciones estivales de alta intensidad desencadenaron aluviones en el Cajón de Maipo, afectando diversas quebradas y localidades del sector, entre ellas el entorno del estero San Alfonso, ocasionando daños significativos a la infraestructura humana (Marín et al., 2017). Este estudio compara los resultados de los softwares FLO-2D y HEC-RAS en la simulación del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 en la cuenca del estero San Alfonso, modelando cinco escenarios con distintos periodos de retorno (10, 25, 50, 75 y 100 años), bajo condiciones equivalentes entre ambos. Esta comparación busca aportar herramientas técnicas para la toma de decisiones en la selección de modelos, orientadas a una gestión más eficiente del riesgo frente a eventos aluvionales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del estero San Alfonso se localiza en la Región Metropolitana de Santiago, comuna de San José de Maipo, tributando directamente al río Maipo a la altura del kilómetro 48 de la ruta G-25, en las inmediaciones del puente San Alfonso. Para la modelación se consideró únicamente el tramo final del estero San Alfonso, correspondiente a los últimos 800 m antes de su desembocadura (Fig. 1).



Figura 1: Ubicación de la cuenca del estero San Alfonso en la Región Metropolitana de Santiago.

El área de influencia abarca una superficie aproximada de 21 km², con un cauce principal de 11.37 km de longitud y un rango altitudinal que varía entre 1080 y 2631 m.s.n.m., configurando una pendiente longitudinal promedio de 29°, característica de entornos de alta montaña andina (Muñoz et al., 2018). En el entorno de San Alfonso, la ocupación del suelo es predominantemente residencial, con presencia significativa de comercio y actividades turísticas (Ilustre Municipalidad de San José de Maipo, 2010). Desde el punto de vista morfológico, predominan laderas de fuerte pendiente, relieves cóncavo-planares, suelos poco consolidados y escasa cobertura vegetal, condiciones que favorecen la ocurrencia de flujos aluvionales. Geológicamente, la cuenca presenta una litología heterogénea compuesta por rocas fracturadas, intrusivos como pórfidos andesíticos y filones mantos, y evidencia de alteración hidrotermal en la zona alta, y en la superficie se identifican depósitos aluviales, coluviales, glaciares y por deslizamiento, que han dado origen a abanicos, terrazas y conos de deyección (Muñoz M., 2018). Esta combinación de factores geomorfológicos, litológicos y de cobertura vegetal determina un nivel alto de susceptibilidad frente a flujos de detritos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Ecuaciones de Gobierno

La modelación de flujos detríticos en HEC-RAS y FLO-2D se basa en las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant 2D, las cuales consideran la conservación de masa y la cantidad de movimiento (Martínez, 2022). Su formulación general es la siguiente:

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

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

$$S_{f_y} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (3)$$

Donde V_x , V_y son las velocidades medias del flujo en las direcciones x y y , integradas en la profundidad h del escurrimiento. S_{ox} y S_{oy} representan las pendientes del terreno, mientras que S_{f_x} y S_{f_y} corresponden a las pendientes de fricción, responsables de modelar la resistencia hidráulica.

3.2. Modelado del término resistivo según HEC-RAS

A partir de la versión 6.0, HEC-RAS incorpora el módulo DebrisLib para modelar flujos no newtonianos mediante las ecuaciones DWE o SWE, el software admite el uso de mallas estructuradas y no estructuradas, facilitando la representación de geometrías complejas (Gibson et al., 2021; Martínez, 2022). Este módulo incluye diversas formulaciones reológicas, pero en el presente estudio se emplea exclusivamente el modelo cuadrático de O'Brien. El término de fricción total se descompone en una pendiente asociada al flujo newtoniano S_f , y otra correspondiente al lodo y escombros, definida como $S_{MD} = \tau_{MD} / \rho_m g R$. Expresándose la ecuación de momento como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (4)$$

Las pérdidas internas del fluido se expresan en términos de un esfuerzo cortante interno, en el caso del enfoque cuadrático de O'Brien (Floyd et al., 2025), se expresa como:

$$\tau_{MD} = \tau_y + \mu_m \left(\frac{dv_x}{dz} \right) + \rho_m l_m^2 \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^2 + c_{Ba} \rho_s \left(\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right)^{-2} d_s^2 \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^2 \quad (5)$$

Donde τ_{MD} es el esfuerzo cortante interno, τ_y el esfuerzo de fluencia, μ_m la viscosidad dinámica de la mezcla, y la tasa de deformación se estima como $dv_x/dz = 3\bar{u}/h$. La longitud de mezcla de Prandtl se define como $l_m = \kappa z$, donde κ es la constante de von Kármán y z la distancia media desde la pared. Este parámetro se fija por defecto según el manual de operación, en el valor $\kappa \cong 0.41$. Este valor es estándar para condiciones de agua clara; sin embargo, en flujos de alta concentración de sedimentos el valor efectivo de κ puede disminuir por efectos densimétricos. Por ejemplo, Guo & Julien (2001) reportan el valor $\kappa = 0.406$ para agua clara y una disminución cuasilínea de κ con la concentración en suspensión. En este estudio se mantiene el valor $\kappa \cong 0.41$, mientras que los efectos de la concentración sólida se representan principalmente mediante la reología del modelo cuadrático de O'Brien (τ_y , μ_m y el término cuadrático). $c_{Ba} \sim 0.01$ un parámetro empírico de Bagnold, ρ_s la densidad de las partículas de sedimento, C_* es la

concentración volumétrica máxima de sedimentos, C_v es la concentración volumétrica de sedimentos, d_s es el tamaño de grano del sedimento. HEC-RAS emplea la misma formulación que FLO-2D para estimar los parámetros reológicos: $\tau_y = ae^{bC_v}$ y $\mu_m = \eta_w e^{BC_v}$, variando solo en el valor de a , que en HEC-RAS se fija en $\eta_w = 0.001$ Pa·s, correspondiente a la viscosidad del agua a 10 °C (HEC, 2025).

3.3. Modelado del término resistivo según FLO-2D

El modelo hidráulico FLO-2D permite la simulación detallada de flujos hiperconcentrados mediante la resolución de las ecuaciones de difusión de onda en dos dimensiones, empleando un esquema de diferencias finitas sobre mallas estructurada (O'Brien y Julien, 1985; O'Brien, 2022). El esfuerzo cortante total τ se define en función de la velocidad de cizallamiento dv/dy , incorporando componentes de fluencia, viscosidad e inercia:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (6)$$

El coeficiente inercial $C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2$ depende de la densidad de la mezcla ρ_m , la longitud de la mezcla de Prandtl l , la concentración volumétrica del sedimento C_v , y el tamaño medio del grano d_s . La función de (Bagnold, 1954) que define la dependencia de C_v se expresa como $f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left((C_*/C_v)^{1/3} - 1 \right)$, donde el coeficiente empírico $a_i = 0.01$ y C_* es el volumen de la concentración volumétrica máxima de empaquetamiento de las partículas sedimentarias. Reescribiendo y expresando en función de la pendiente de fricción total S_f , que es la suma de la pendiente de fluencia S_y , la pendiente viscosa S_v , y la pendiente turbulenta-dispersiva S_{td} :

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{k\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (7)$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla, V la velocidad media entre celdas, h la profundidad, y k un parámetro de resistencia laminar tabulado en el manual de usuario de FLO-2D. El pseudo-número de Manning corregido por concentración de sedimento, $n_{td} = n_t b e^{mC_v}$, con $b = 0.0538$ y $m \approx 6.1$. Dado que la viscosidad y el límite elástico dependen principalmente de la concentración de sedimentos, en ausencia de un análisis reológico del material, se utilizan las relaciones empíricas de (O'Brien y Julien, 1988b): $\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ y $\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ donde los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , β_2 provienen de ensayos de laboratorio y están tabulados en la documentación técnica de FLO-2D.

3.4. Comparación HEC-RAS y FLO-2D

HEC-RAS y FLO-2D difieren en el tratamiento del término resistivo, especialmente en sus componentes viscosa y turbulenta-dispersiva. Según Dimas et al. (2023), HEC-RAS asume un perfil parabólico de velocidad $dv_x/dz = 3\bar{u}/h$, que se incorpora en la reformulación de la Ecuación (7) de FLO-2D al reemplazar V por \bar{u} y multiplicar por $\gamma_m h$, lo cual conduce a:

$$\tau = \tau_y + \frac{K\eta\bar{u}}{8h} + \frac{\gamma_m n_{td}^2 \bar{u}^2}{3\sqrt{h}} \quad (8)$$

La comparación entre las Ecuaciones. (5) y (8) permite identificar dos diferencias principales:

- La componente viscosa:

$$\mu_m \frac{3\bar{u}}{h} = \frac{K\eta\bar{u}}{8h} \Leftrightarrow 3\mu_m = \frac{K\eta}{8} \Leftrightarrow \frac{24\mu_m}{\eta} = k \quad (9)$$

- La componente turbulenta-dispersiva:

$$\frac{\gamma_m n_{td}^2 \bar{u}^2}{h^{\frac{1}{3}}} = \rho_m l_m^2 \left(\frac{3\bar{u}}{h}\right)^2 + 0.01\rho_s \left(\left(\frac{0.615}{c_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} d_s^2 \left(\frac{3\bar{u}}{h}\right)^2 \quad (10)$$

Agrupando términos y despejando n_{td} , se obtiene:

$$n_{td} = \left\{ \left[\rho_m l_m^2 + 0.01\rho_s \left(\left(\frac{0.615}{c_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} d_s^2 \right] \frac{9}{\gamma_m} \right\}^{1/2} h^{-\frac{5}{6}} \quad (11)$$

De la Ecuación (6) se evidencia que el valor del parámetro k es asumido por HEC-RAS, y puede obtenerse a partir de las viscosidades definidas en ambas metodologías (μ_m, η). Asimismo, de la Ecuación (8) se infiere que el coeficiente combinado de Manning (n_{td}), es asumido por HEC-RAS y varía inversamente con la profundidad h y directamente con el cuadrado del tamaño del grano d_s^2 .

3.5. Parámetros utilizados en la modelación

La modelación del estero San Alfonso se realizó en FLO-2D PRO (Build23) y HEC-RAS (v6.5), aplicando un enfoque metodológico coherente para garantizar la comparabilidad. Las simulaciones abarcaron los últimos 800 m del estero, manteniendo condiciones homogéneas de topografía, hidrología y reología. Se utilizó un modelo digital de elevación ALOS PALSAR (2011), adaptado a una grilla regular de 10×10 m. La rugosidad de Manning se fijó en $n = 0.06$, valor definido según la fórmula de Cowan (Ven Te Chow, 1994), ajustado con (Julien, 2010). Ambos modelos comparten condiciones de borde equivalentes. En FLO-2D, estas se definen dentro de la grilla, incluyendo hora, hidrograma y concentración de sedimento; la salida se trata como una inundación sin hidrograma. En HEC-RAS, el ingreso se especifica también dentro de la grilla, junto a la pendiente de energía derivada del lecho; la salida se ubica fuera de la grilla, imponiendo una pendiente fija de 0.9 estimada mediante Google Earth. Los parámetros reológicos fueron calibrados con base en Muñoz (2018). En HEC-RAS, el parámetro $\eta_w = 0.001$ [Pa·s] se mantuvo fijo, correspondiente a la viscosidad del agua a 10 °C. Los demás parámetros fueron unificados entre modelos ajustando sus unidades: $\alpha_2 = 0.25$ (dynes/cm^2), $\beta_1 = 12$, $\beta_2 = 18.7$.

La cuenca, ubicada en el Cajón del Maipo a 50 km al SE de Santiago, presenta alta susceptibilidad a flujos de detritos debido a su topografía abrupta y clima mediterráneo con precipitaciones invernales (Inzunza, 2019). Durante el verano, tormentas convectivas provenientes del este pueden generar lluvias intensas localizadas (Garreaud et al., 2021). Registros del SERNAGEOMIN y fuentes institucionales evidencian recurrencia de remociones en masa en el tramo bajo del estero, afectando su desembocadura en el río Maipo. Se desarrolló un análisis de frecuencia basado en precipitaciones mayores a 7.3 mm/24 h, asociadas a flujos aluvionales en verano (González. G. et al., 2022). Se emplearon registros de precipitación máxima diaria anual de la estación Embalse El Yeso (DGA, 1963–2023). El análisis estadístico identificó a la distribución Pearson tipo III como la que mejor se ajusta a los datos registrados. Con base en los valores de precipitación proyectados, se estimaron caudales máximos mediante el método racional (Stöwhas, 2003), generando

hidrogramas líquidos para los periodos de retorno $T = 10, 25, 50, 75$ y 100 años, manteniendo una concentración volumétrica constante del 48 % (Muñoz, 2018). Los resultados de precipitación máxima diaria y caudal asociado se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Precipitaciones máximas diarias y caudales líquidos estimados por periodo de retorno.

Periodo de Retorno (años)	10	25	50	75	100
Precipitación (mm/24h)	25.6	33.2	38.7	41.9	44.0
Caudal (m)	700	971	1157	1262	1335

3.6. Caracterización del evento y calibración de los modelos

La calibración se realizó para el evento del 25 de febrero de 2017, utilizando los datos empíricos de altura y velocidad máxima registrados por Muñoz (2018) en la desembocadura del estero San Alfonso (Fig. 2). De los tres puntos de control disponibles, se consideraron dos, ya que uno se ubicaba en una curva cerrada no representada por el DEM, tal como se descartó en el análisis original. Muñoz (2018) midió en terreno los últimos 800 m del estero, estimando velocidades mediante la fórmula de Selby (1993) y determinando una concentración volumétrica de sedimentos del 48 %, caracterizando el flujo como mixto (detritos e hiperconcentrados). Con estos antecedentes, se estimó un caudal de 505 m³/s calibrado con base en los datos observados, a partir del cual se generó un hidrograma líquido de tres puntos con una duración de 186 segundos, correspondiente a un periodo de retorno de 6 años. Se realizaron 40 simulaciones en FLO-2D y HEC-RAS, ajustando los parámetros reológicos para reproducir las condiciones observadas. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos.

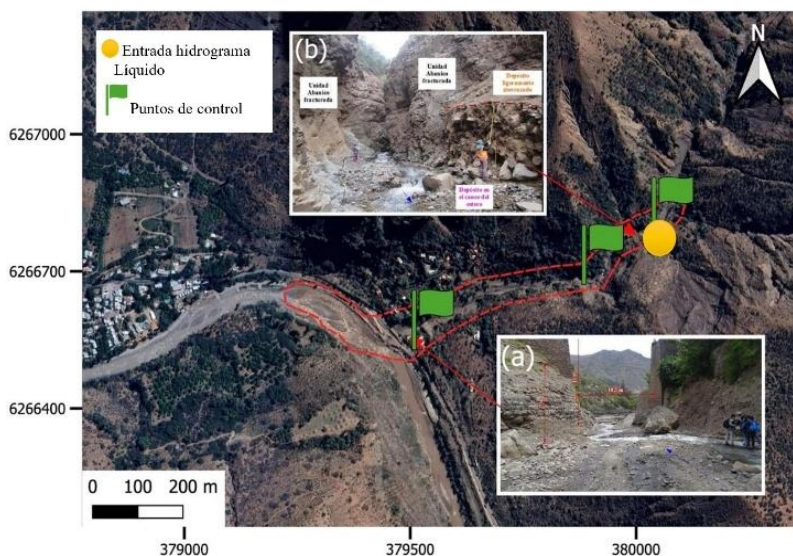


Figura 2: Puntos de control y localización de hidrograma. Modificado de (Muñoz, 2018).

Tabla 2: Parámetros observados y simulados para el evento del 03-11-2017 en puntos de control D2_04 y D2_09.

Punto	Coordenada Este	Coordenada Norte	Evento conocido	FLO-2D	HEC-RAS
D2_04	380040	6266785	9 m/s; 12 m	10 m/s; 10 m	8 m/s; 7 m
D2_09	379525	6266587	9 m/s; 11 m	9 m/s; 7 m	6 m/s; 9 m

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Velocidades máximas del escurrimiento

Se seleccionaron ocho secciones transversales para analizar profundidades, velocidades máximas y pendiente de fricción a lo largo del estero San Alfonso. Ambos modelos entregaron resultados similares en las velocidades máximas (Figura 3), con diferencias menores al 10 % en la mayoría de los casos. Las discrepancias superaron ligeramente el 10 % en la S2, S3, S4, S6 debido a la complejidad geomorfológica y presencia de curvas pronunciadas. Asimismo, las mayores velocidades se registraron en la sección S6, asociadas a su pendiente.

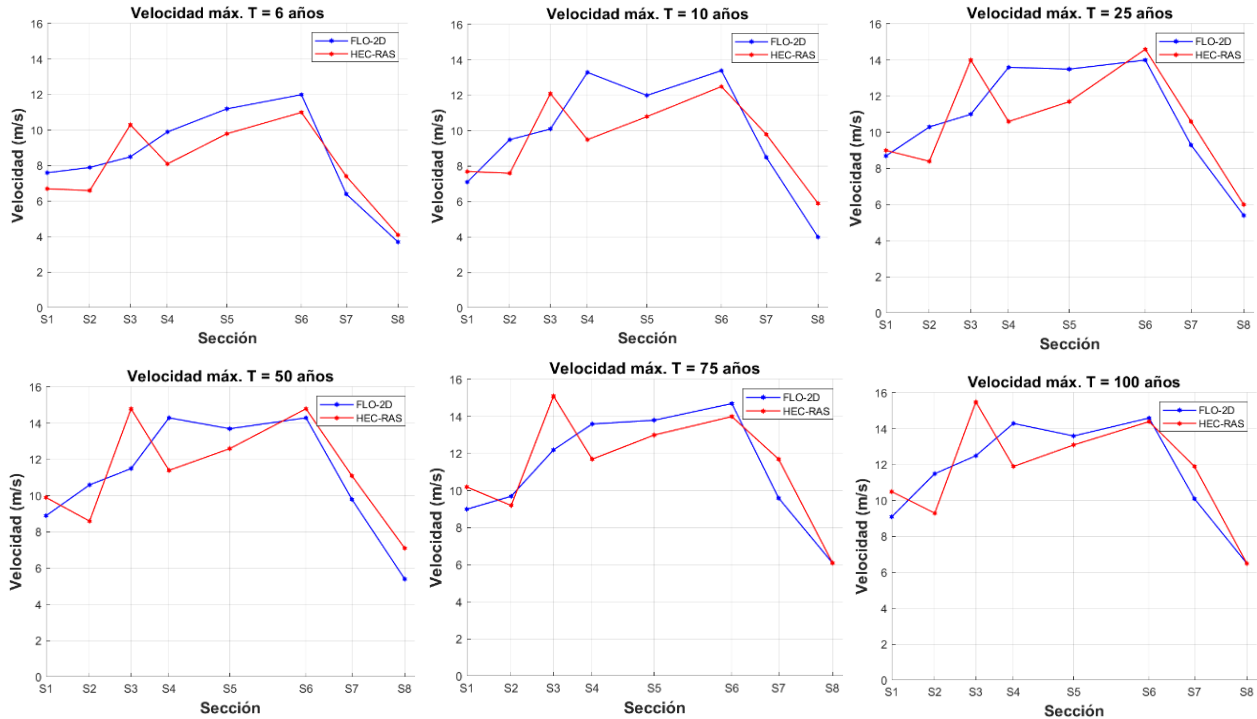


Figura 3: Velocidades máximas de FLO-2D y HEC-RAS para cada periodo de retorno (T).

4.2. Profundidades máximas del flujo

La Figura 4 muestra las profundidades máximas simuladas por sección y periodo de retorno, revelando discrepancias relevantes entre FLO-2D y HEC-RAS. En general, FLO-2D estima profundidades menores, especialmente en S6, debido al tratamiento del borde aguas abajo: flujo libre sin hidrograma en FLO-2D y altura normal en HEC-RAS. Las diferencias son menores en S2 ($\approx 10\%$), pero superan el 50 % en S4 – S6, asociadas a condiciones geomorfológicas complejas como pendientes abruptas, meandros y cambios de ancho.

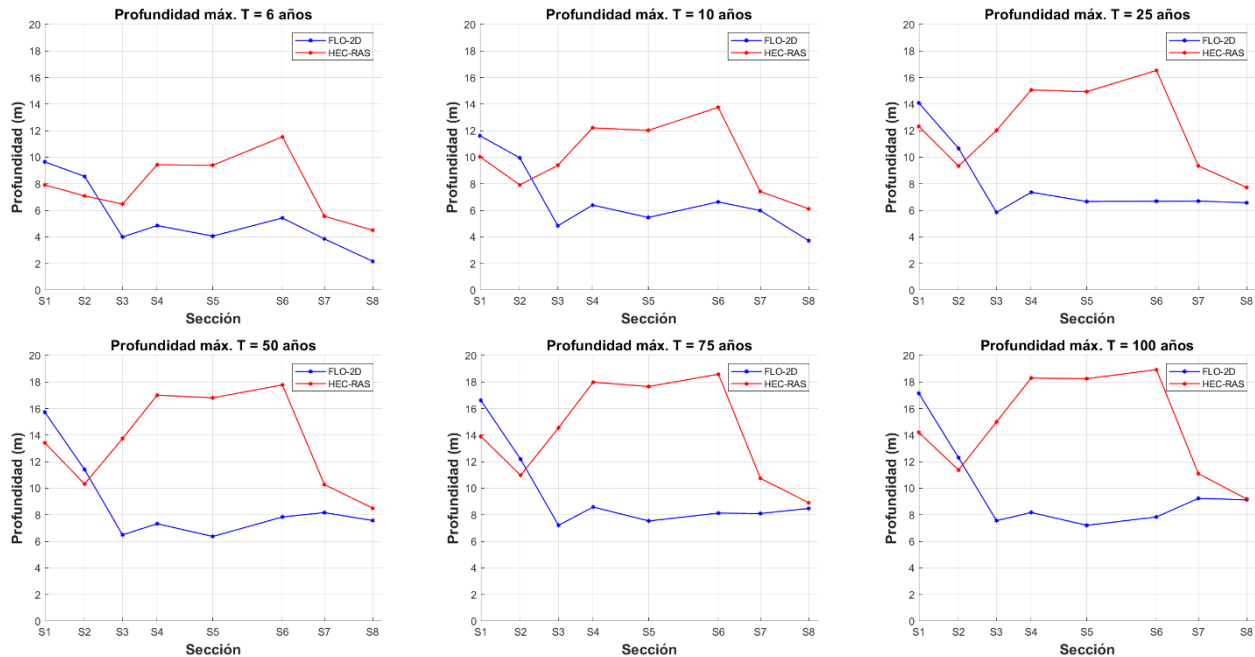


Figura 4: Profundidades máximas de FLO-2D y HEC-RAS para cada periodo de retorno (T).

4.3. Área de inundación

La Figura 5 muestra las áreas de inundación simuladas con HEC-RAS para distintos periodos de retorno ($T = 6, 10, 25, 50, 75, 100$ años). En FLO-2D, las áreas fueron delineadas manualmente en QGIS, ya que el modelo no genera polígonos de inundación automáticamente. Aunque HEC-RAS permite esta generación, los resultados fueron editados para mejorar su visualización.

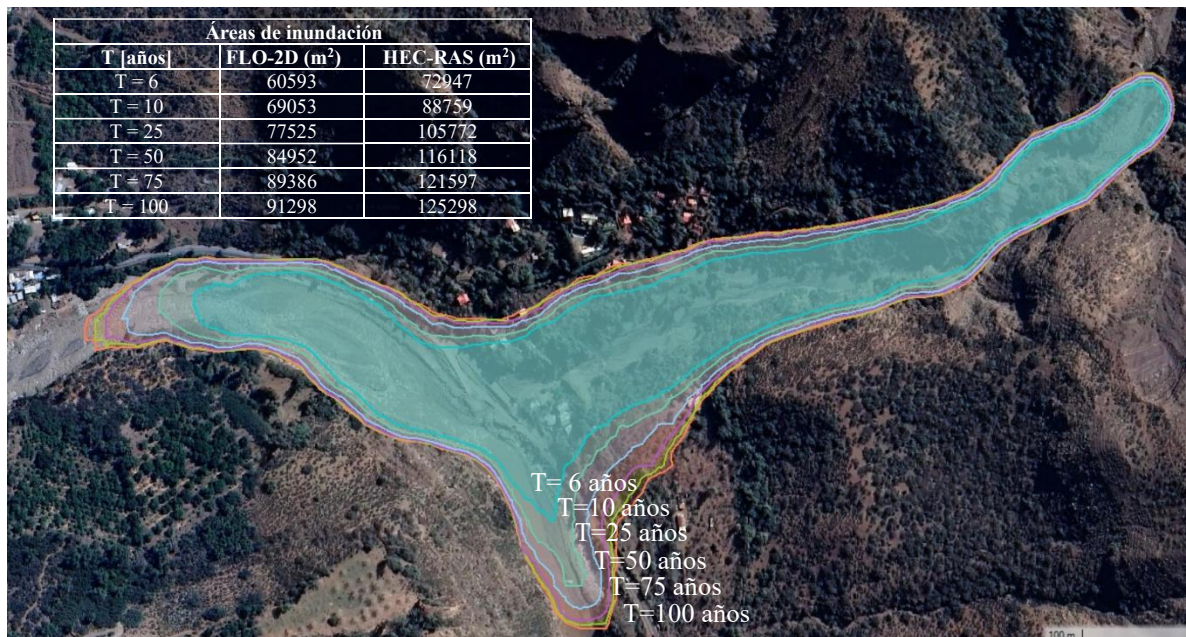


Figura 5: Áreas de inundación HEC-RAS para cada periodo de retorno (diseño obtenido a través de HEC-RAS, RAS Mapper).

La Figura 6 muestra la evolución relativa del área de inundación proyectada por FLO-2D y HEC-RAS para distintos periodos de retorno, normalizada respecto a $T = 6$ años. Se ajustó una ley de potencias para representar su expansión en escala lineal (Figura 6a) y logarítmica (Figura 6b). En todos los escenarios, HEC-RAS proyecta áreas más extensas que FLO-2D, con una tendencia exponencial en ambos casos. Aunque las diferencias se reducen con mayores periodos de retorno, HEC-RAS continúa estimando áreas más amplias incluso en escenarios extremos.

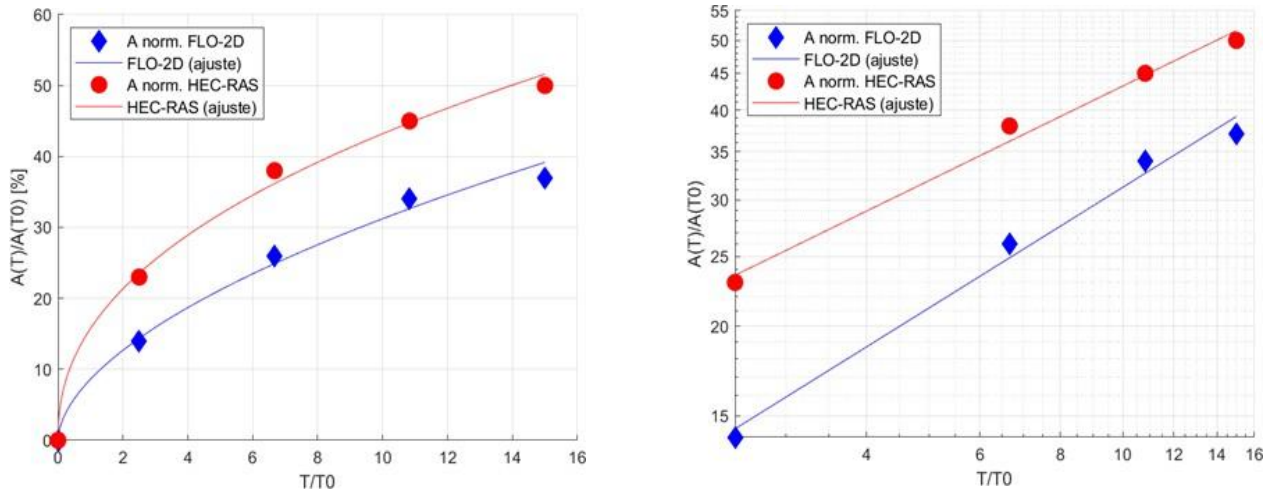


Figura 6: a) Ajuste por ley de potencias del área de inundación relativa simulada con FLO-2D y HEC-RAS para $T = 6$ a 100 años (izquierda); b) Mismo ajuste en escala logarítmica (derecha)

4.4. Longitud de escurrimiento

La Figura 7 muestra la variación relativa de la longitud de escurrimiento respecto a L_0 ($T = 6$ años), modelada con FLO-2D ($L_0 = 929$ m) y HEC-RAS ($L_0 = 990$ m) para distintos periodos de retorno. Se aplicó un ajuste por ley de potencias, representado en escala lineal (Figura 7a) y logarítmica (Figura 7b), observándose un crecimiento exponencial con el aumento del periodo. HEC-RAS tiende a estimar longitudes mayores en escenarios iniciales, aunque las diferencias se reducen en eventos más extremos.

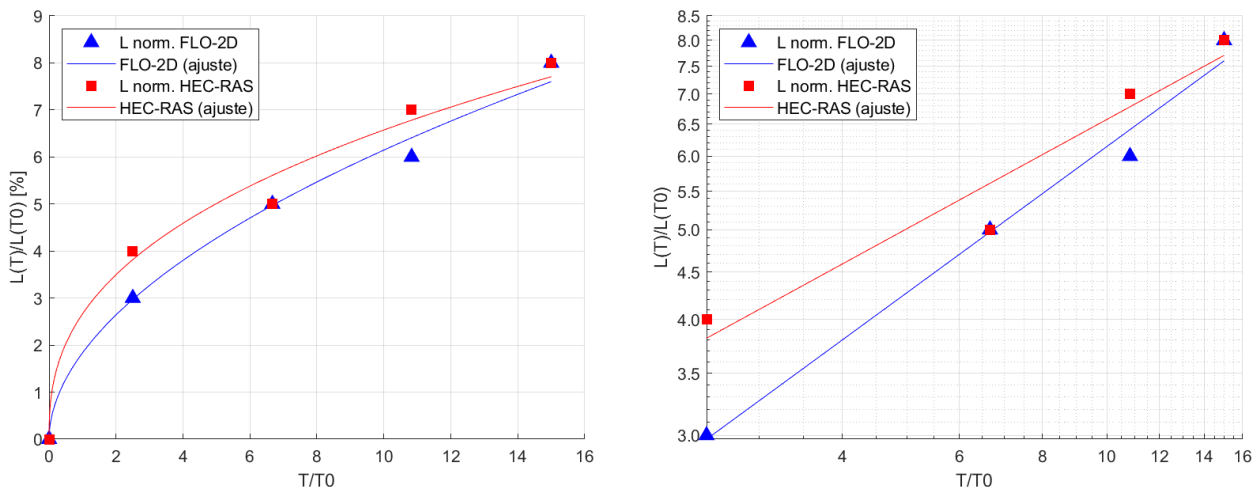


Figura 7: a) Ajuste por ley de potencias longitud de escurrimiento con FLO-2D y HEC-RAS para $T = 6$ a 100 años (izquierda); b) Mismo ajuste en escala logarítmica (derecha).

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha realizado una comparación entre los softwares de modelación hidráulica FLO-2D y HEC-RAS 2D para un evento aluvional ocurrido en una pequeña cuenca del norte de Chile. Los resultados evidencian resultados consistentes entre ambos softwares, comparables entre sí, no obstante, las diferencias en cuanto a su formulación teórica para representar fluidos complejos. En ambos casos, se observó un aumento progresivo en la velocidad, profundidad y área de inundación al incrementarse el periodo de retorno, alcanzando mayores caudales y volúmenes de escurrimiento bajo condiciones extremas. Sin embargo, HEC-RAS tiende a predecir velocidades y zonas de inundación ligeramente mayores, especialmente en sectores con curvaturas pronunciadas, mientras que FLO-2D arroja resultados más conservadores. Estas diferencias también son notorias al comparar las profundidades máximas. FLO-2D, además, muestra mayor variabilidad en términos de la pendiente de fricción para diferentes periodos de retorno, mientras HEC-RAS ofrece estimaciones más estables repercutiendo en la distribución espacial de la velocidad y profundidad del flujo.

En cuanto a su uso, HEC-RAS sobresale por su interfaz intuitiva y estructurada, así como por la disponibilidad de herramientas especializadas para el análisis de escenarios y la representación geoespacial de resultados, como RAS Mapper y el comparador de modelos. Si bien FLO-2D dispone de menos opciones para generar múltiples planes de simulación de forma directa, continúa siendo una herramienta robusta y eficaz para representar flujos aluvionales en diversos contextos. Desde la perspectiva del rendimiento computacional, ambos modelos presentan tiempos de simulación similares para tramos acotados y cuentan con documentación y soporte técnico adecuados. En síntesis, tanto FLO-2D como HEC-RAS 2D constituyen herramientas eficaces para la simulación de flujos de detritos, cada una con ventajas particulares en términos operativos y de modelación. Se recomienda, en investigaciones futuras, explorar las nuevas funcionalidades de FLO-2D orientadas a flujos bifásicos, especialmente en escenarios críticos como la ruptura de presas de relaves o flujos aluvionales con altas concentraciones de sedimentos.

REFERENCIAS

- Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 225(1160), 49–63.
- Brea, J. D., & Spalletti, P. D. (2003). “Flujos densos e hidráulica de ríos”. *Nuevas tendencias en Hidráulica de Ríos. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Buenos Aires. Argentina. ISBN 987-20109-1-9.
- Dimas, P., Poulisis, G., Dimitriadis, P., Papanicolaou, P., Lazaridou, S., & Michas, S. (2023). Comparison of mudflow simulation models in an ephemeral mountainous stream in Western Greece using HEC-RAS and FLO-2D. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 8(4), 919–933. <https://doi.org/10.1007/s41207-023-00409-8>
- Floyd, I., Sánchez, A., Gibson, S., & Savant, G. (2025). A Modular, Model, Library Framework (DebrisLib) for Non-Newtonian Geophysical Flows. *Geosciences*, 15, 240. <https://doi.org/10.3390/geosciences15070240>
- Garreaud, R. D., Viale, M., & Vergara, I. (2021). Análisis: Una tormenta de invierno en pleno verano – Entendiendo el extraordinario evento de finales de enero de 2021 en Chile central.
- Gibson, S., Floyd, I., Sánchez, A., & Heath, R. (2021). Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 540–553. <https://doi.org/10.1002/esp.5044>
- González, G., Jensen, E., Aron, F., Sáez, E., Díaz, F., Candida, G., Gironás, J., Escauriaza, C., Saldías, J., Aranguiz, R., Gilaber, H., De la Barra F., & Zuñiga, A. (2022). Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19i10021.

- Guo, J., & Julien, P. (2001). Turbulent velocity profiles in sediment-laden flows. *Journal of Hydraulic Research*, January 2001, 11–23. <https://doi.org/10.1080/00221680109499798>
- Hydrologic Engineering Center. (2025a). HEC-RAS Mud and Debris Flow. HEC-RAS Manual de Usuario.
- Hydrologic Engineering Center. (2025b). Introduction (Taxonomy and Rheology of Debris Flows). HEC-RAS Manual de Usuario.
- Ilustre Municipalidad de San José de Maipo. (2010). Plan de Desarrollo Comunal 2010–2014. Tomo II.
- Inzunza Bustos, J. (2019). *Meteorología Descriptiva*. Universitaria S.A., Ed.; Vol. 1.
- Iverson, R. M. (1997). The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and Sedimentation*, 2nd Ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806049>
- Marín D., M., Contreras F., J. P., & Olea E., P. (2017). Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, 25-26 de Febrero de 2017, Región Metropolitana - Comuna de San José de Maipo (INF-Metropolitana-01.2017) (SERNAGEOMIN, Ed.)
- Martínez Olmedo, V. (2022). Aplicación y comparación modelos de flujos detríticos, FLO-2D y HEC-RAS a quebradas Acerilla y La Mesilla, cuenca del río Huasco, eventos marzo 2015. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189195>
- Muñoz M., A. (2018). Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana. Universidad de Chile.
- Muñoz M., A., Marín D., M., Galencio V., J. E., & Osorio N., C. (2018). Diseño de un sistema de monitoreo piloto de remociones en masa en la cuenca del Estero San Alfonso, comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana.
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proc. ASCE HD Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards*.
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1988a). Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 877–887. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(877\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877))
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1988b). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 877–887.
- O'Brien, K. (2022). *Simulating Mudflow Guidelines - FLO-2D Documentation*.
- Pierson, T., Jakob, M., & Hungr, O. (1970). Hyperconcentrated flow — transitional process between water flow and debris flow (pp. 159–202). https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_8
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: Oxford University Press.
- Sepúlveda Valenzuela, Sergio. (1998). Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana (S. Rebolledo Lemus, R. Verdugo Alvarado, S. Elgueta Dedes, & Universidad de Chile. Departamento de Geología., Eds.).
- Servicio Nacional de Geología y Minería – SERNAGEOMIN. (n.d.). Portal GEOMIN. Retrieved July 26, 2025, from <https://portalgeomin.sernageomin.cl/share/67c617bfcecee>
- Stöwhas, L. (2003). Uso “racional” de la fórmula racional. XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Takahashi, T. (1981). Debris Flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13(Volume 13, 1981), 57–77. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.13.082106.100001>
- Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Mc Graw Hill.