

Reconstrucción numérica del aluvión de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, 8 de octubre de 2026): recorrido, volumen e incertidumbre a partir de evidencia pública

Lester Wood*

Versión preliminar del 9 de octubre de 2026

Resumen

El 8 de octubre de 2026, un flujo de barro descendió desde la quebrada de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, Santiago) sobre una ladera quemada nueve meses antes. Se reconstruyó con un modelo bi-dimensional de aguas someras con reología de barro, sobre un terreno urbano de 4 m con 1.103 edificios, usando solo datos públicos y un registro probatorio de cada fuente consultada. Una estimación independiente basada en la lluvia y la cuenca (10,1 km²) sitúa el volumen de mezcla en torno a 150 000 m³. Las simulaciones reproducen de forma robusta los corredores de La Plaza, General Blanche y Camino El Alba, y la afectación de Duoc UC y de la Clínica UC Christus, con volúmenes de 150 a 300 000 m³. La inundación de Quebrada Honda solo se reproduce si el flujo que llega a la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa no ingresa a él: en el escenario ensayado llegaron unos 12 800 m³, con un pico de 16,5 m³/s, que un colector operativo de 30 m³/s habría absorbido. Esto coincide con la explicación oficial preliminar sobre ductos taponados y la cámara de decantación colapsada. El recorrido es más sensible a la representación de los cauces que al volumen o al material. Persisten discrepancias en el sector de La Plaza Sur y en el tramo bajo de General Blanche. Los resultados son preliminares, provienen de la fase de cribado y aún no se han validado con imágenes satelitales.

1. Introducción y planteamiento del problema

El jueves 8 de octubre de 2026, cerca de las 17:00 (UTC−3), un flujo de agua, barro y rocas descendió desde la quebrada que drena el sector precordillerano de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, Santiago) y recorrió calles residenciales por varios kilómetros: arrastró vehículos y un bus ([The Clinic, 2026](#)), inundó viviendas, una clínica y una universidad, dejó seis heridos y motivó la declaración de zona de catástrofe ([Interferencia, 2026](#)). Según la información periodística consultada, que recoge antecedentes del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), el evento ocurrió en una zona clasificada en febrero de 2026 como de alto peligro por flujos de detritos ([Chilevisión, 2026a](#)). La cuenca había sido afectada por un incendio de unas 1 000 ha entre diciembre de 2025 y enero de 2026 ([BioBioChile, 2026a](#); [Municipalidad de Las Condes, 2026](#)), y el evento siguió a la primera semana de octubre más lluviosa desde que hay registros continuos ([Wikipedia, 2026](#)).

Al día siguiente no existía una cartografía oficial del área afectada, ni aforos, ni marcas de nivel publicadas. La información disponible se reducía a notas de prensa, la lista de calles cerradas por el municipio, un perímetro de afectación y dos explicaciones del origen que no coinciden entre sí. Este trabajo aborda la reconstrucción del recorrido, el volumen y el caudal del aluvión mediante un modelo físico explícito y evidencia pública verificable. Asimismo, estima la profundidad, la velocidad y la presión del flujo en calles y edificios del área de estudio, considerando la incertidumbre de las estimaciones.

2. Marco teórico

Flujos de detritos y de barro. Un aluvión es una mezcla de agua y sedimento cuyo comportamiento depende de la concentración volumétrica total de sólidos $C_{v,tot}$. Con $C_{v,tot}$ entre 0,20 y 0,55 la mezcla presenta un esfuerzo de fluencia τ_y : se detiene cuando el esfuerzo motriz no lo supera. Su densidad es $\rho_m = \rho_w + C_{v,tot}(\rho_s - \rho_w)$, donde ρ_m , ρ_w y ρ_s son las densidades de la mezcla, el agua y los sólidos, respectivamente (kg m^{−3}); ρ_m se sitúa entre 1 300 kg m^{−3} y 1 900 kg m^{−3}. En las relaciones reológicas interviene, en cambio, la concentración de la matriz fina $C_{v,f}$ (sección 4.3).

*Estudio independiente. Contenido bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0. Condiciones de uso: <https://aluvion.hirely.cl/terminos.html>.

Aguas someras con reología. Cuando el espesor del flujo es pequeño frente a su extensión, las ecuaciones de Navier–Stokes integradas en la profundidad se reducen a las de Saint-Venant en dos dimensiones. La reología de la mezcla entra como una pendiente de fricción S_f , definida en la ecuación (3). El cierre cuadrático de O’Brien y Julien (1988) y O’Brien, Julien, y Fullerton (1993), usado por FLO-2D (FLO-2D Software, Inc., 2021), suma tres términos: fluencia, viscosidad y turbulencia más colisión de granos.

Representación urbana. En ciudad, el flujo se canaliza por las calles y lo desvían los edificios. Estos pueden representarse como bloques elevados, como huecos impermeables o mediante porosidad; la elección condiciona la capacidad predictiva (Schubert y Sanders, 2012).

Volumen movilizable. El volumen de un flujo de detritos puede estimarse con un balance entre lluvia y escorrentía. En cuencas recién quemadas existen además modelos empíricos que lo relacionan con la intensidad de lluvia de 15 minutos, el área quemada y el relieve (Gartner, Cannon, y Santi, 2014). El caudal pico se relaciona empíricamente con el volumen (Mizuyama, Kobashi, y Ou, 1992).

Calibración con observaciones cualitativas. Cuando solo se conoce la extensión del área afectada, distintas combinaciones de volumen, caudal y resistencia producen huellas parecidas, es decir, hay equifinalidad. El enfoque de estimación de incertidumbre mediante verosimilitud generalizada (GLUE, por sus siglas en inglés; Beven y Binley, 1992) propone aceptar todas las simulaciones de comportamiento aceptable y reportar la envolvente de sus predicciones en lugar de un único mejor ajuste.

3. Hipótesis y objetivos

Hipótesis de origen. Se contrastan tres hipótesis sobre la localización de los aportes del flujo a la zona urbana, formuladas a partir de fuentes de distinta confiabilidad:

- H1** El ducto que entuba la quebrada bajo la urbanización se obstruyó en el abanico, en las calles Mons. Álvaro del Portillo, Av. La Plaza y General Blanche, y todo el flujo escurrió en superficie desde ese punto (Chilevisión, 2026a; Interferencia, 2026).
- H2** El canal colapsó o rebasó en la calle Francisco Bulnes Correa, donde el cauce entubado la cruza al inicio de la calle Quebrada Honda (BioBioChile, 2026a; Interferencia, 2026; Wikipedia, 2026).
- H3** El aporte se distribuyó en varios puntos donde los cauces de la precordillera llegan a la urbanización: el cauce principal (H1), un cauce sur que cruza el campus de la Universidad de los Andes (S1) y quebradas menores que terminan en la Av. La Plaza Sur (S2). El hidrograma se reparte en proporción al área de cada cuenca.

Durante el estudio se agregaron, como hipótesis *exploratorias* formuladas después de examinar los primeros resultados, H4 (salida combinada en el abanico y en la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa, más los aportes del sur) y H5 (H4 más escurrimiento directo de lluvia sobre la ladera oriente de La Plaza Sur). También se ensayaron dos representaciones del terreno (el cauce del parque lineal tallado y un terreno fotogramétrico de mayor resolución) y distintas capacidades del colector. Se informan separadas de las hipótesis iniciales.

Hipótesis de proceso (HP). Un modelo bidimensional de aguas someras con reología de mezcla homogénea, alimentado con un volumen compatible con la lluvia observada, reproduce la extensión informada: las calles con presencia de barro y el alcance hasta la Av. Padre Hurtado.

Objetivo general. Estimar el recorrido del aluvión y los indicadores hidrodinámicos en calles y edificios, y caracterizar su incertidumbre a partir del conjunto de simulaciones aceptables.

Objetivos específicos.

1. Construir un terreno urbano con edificios y calles a partir de datos abiertos.
2. Implementar y verificar la reología de la mezcla en un modelo bidimensional de código abierto.
3. Acotar el volumen de mezcla de forma independiente, con lluvia y modelos empíricos.
4. Calibrar el caudal, el volumen y la reología mediante la evidencia pública y comparar la compatibilidad de las hipótesis H1, H2 y H3 con las observaciones.
5. Cuantificar la incertidumbre y publicar los resultados de forma reproducible.

Correspondencia entre hipótesis, objetivos, métodos y resultados. El cuadro 1 vincula cada hipótesis y cada objetivo con el procedimiento que lo aborda y con el resultado que se informará.

Cuadro 1: Correspondencia entre hipótesis, objetivos, métodos y resultados previstos.

Hipótesis u objetivo	Método correspondiente	Resultado previsto
H1, H2 y H3, evaluadas por separado	Fuentes de entrada y criterios de calibración (secciones 4.3 y 4.6)	Simulaciones aceptadas y métricas por hipótesis (sección 6.4)
HP	Modelo y criterios de reproducción de la extensión (secciones 4.3 y 4.6)	Compatibilidad con las observaciones (sección 6.4)
Objetivo específico 1	Construcción del terreno urbano (sección 4.2)	Caracterización del dominio, edificios y calles (sección 6.1)
Objetivo específico 2	Implementación y verificación (secciones 4.3 y 4.4)	Resultados de parada, reinicio, convergencia y balance (sección 6.2)
Objetivo específico 3	Estimación independiente del volumen (sección 4.5)	Distribuciones de volumen (sección 6.3)
Objetivo específico 4	Calibración inversa (sección 4.6)	Parámetros aceptables y comparación H1–H3 (sección 6.4)
Objetivo específico 5	Síntesis de incertidumbre y publicación (sección 4.7)	Mapas, resúmenes del conjunto y materiales reproducibles (sección 6.6)
Objetivo general	Extracción de indicadores por calle y edificio (sección 4.7)	Recorrido e indicadores con incertidumbre explícita (sección 6.6)

4. Metodología

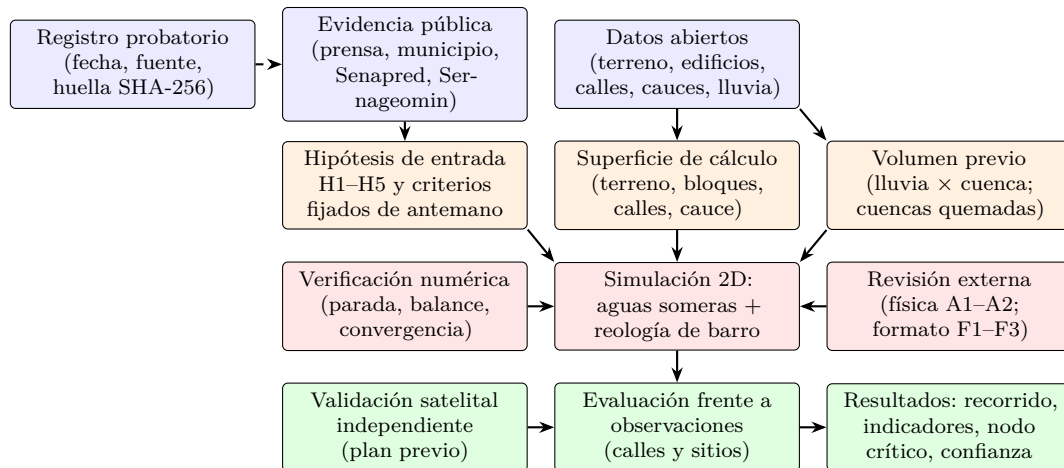


Figura 1: Flujo de trabajo del estudio. Azul: insumos; naranja: preparación; rojo: cálculo y control; verde: evaluación y resultados. La validación satelital se definió antes de examinar las imágenes y no se usa para calibrar.

4.1. Evidencia y registro probatorio

Toda consulta a fuentes externas se archivó en un registro probatorio: fecha y hora UTC, origen, dato extraído, captura de la página y huella SHA-256. Así queda constancia de qué información existía al momento de modelar y permite contrastar después la predicción con observaciones posteriores. Las observaciones se clasificaron según su naturaleza física, como se recomendó en la revisión técnica (véase la declaración final sobre el uso de herramientas de IA):

- **Presencia confirmada:** calles por donde la prensa informa que «bajó» el flujo: Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda ([La Tercera, 2026b](#)); además Av. La Plaza, donde hay registros de arrastre de vehículos.
- **Cierres municipales:** Mons. Álvaro del Portillo y Av. San Carlos de Apoquindo ([El Dínamo, 2026](#)). Pueden obedecer a prevención o limpieza.

Cuadro 2: Datos de entrada utilizados.

Dato	Fuente	Resolución	Uso
Terreno desnudo	FABDEM V1-2 (Neal y Hawker, 2023)	1 segundo de arco (≈ 30 m), remuestreado a 4 m	Cotas del suelo y cuencas
Superficie	Copernicus GLO-30 (European Space Agency, s. f.)	30 m	Altura de edificios grandes
Terreno alternativo	Fotogrametría SPOT 2014 (Husain, 2021)	0,07 puntos/m ² ($\approx 8-10$ m)	Prueba de sensibilidad
Edificios, calles, cauces	OpenStreetMap (Colaboradores de OpenStreetMap, 2026)	vectorial	1.103 bloques, calles, trazado del cauce
Lluvia	DMC, estación 330019 (Dirección Meteorológica de Chile, 2026)	horaria y sinóptica	Volumen previo
Observaciones	Prensa, municipio, Senapred, Sernageomin	puntual	Evaluación (no entra al modelo)

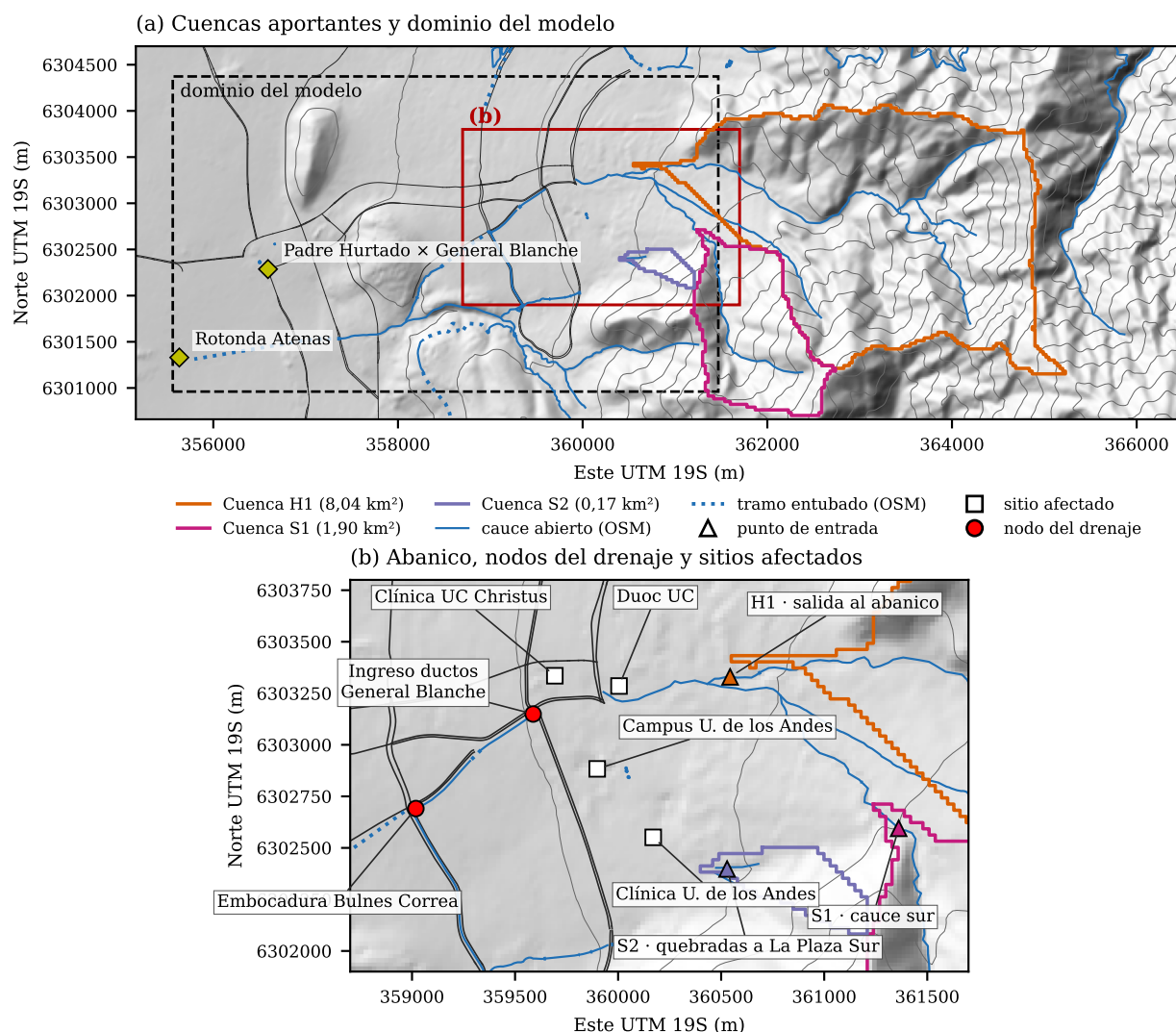


Figura 2: Área de estudio. (a) Cuencas aportantes delimitadas sobre el terreno (H1: cauce principal; S1: cauce sur; S2: quebradas menores hacia La Plaza Sur), cauces abiertos y tramos entubados según OpenStreetMap, dominio del modelo y puntos de referencia aguas abajo. (b) Acercamiento al abanico: puntos de entrada del flujo, nodos del drenaje (ingreso a los ductos de General Blanco y embocadura de Bulnes Correa) y sitios con afectación confirmada. Coordenadas UTM huso 19 sur, WGS 84.

- **Perímetro operativo municipal:** El Alba por el norte, La Plaza por el oriente, Quebrada Honda por el sur y Padre Hurtado por el poniente (La Tercera, 2026b). Puede incluir zonas secas.
- **Alcance:** hasta el sector del Pueblito Los Dominicos y la Av. Padre Hurtado (La Tercera, 2026b).
- **Sitios con presencia confirmada por varias fuentes:** la urgencia de la Clínica UC Christus San Carlos de Apoquindo, con cerca de 1 m de barro (Cadena 3, 2026); la Clínica Universidad de los Andes, en sus accesos y exterior según la propia clínica (Radio La Señal, 2026); la sede Duoc UC (BioBioChile, 2026b); y el campus de la Universidad de los Andes, cuya comunidad quedó retenida (Cooperativa, 2026). El Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Senapred) incluye la Av. La Plaza Sur entre las zonas afectadas (El Dínamo, 2026).
- **Evidencia de baja confiabilidad, usada solo para formular hipótesis:** una imagen difundida en redes sociales que marca varios focos de alimentación del flujo, coherentes con los cauces cartografiados.

La lluvia proviene de la estación automática 330019 (Eulogio Sánchez, Tobalaba) de la Dirección Meteorológica de Chile (2026): 34,8 mm el 8 de octubre, 13,8 mm entre las 15:00 y las 21:00 hora local, y 49,2 mm entre el 6 y el 7 de octubre. La prensa informa entre 16 y 20 mm en alrededor de una hora.

Antecedentes hidrometeorológicos conocidos después del cribado. La alcaldesa informó 144 mm acumulados en la zona, 20 mm de ellos el día del evento, con suelo saturado (Interferencia, 2026). Un análisis preliminar del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), recogido en Wikipedia (2026), registra en la estación Río Molina 42,8 mm el 8 de octubre, 31,6 mm entre las 15:00 y las 19:00 y un máximo de 10,9 mm en 30 minutos, con la isoterma de 0 °C cerca de 2800 m. El pronóstico histórico horario de Open-Meteo (Zippenfenig, 2023) sitúa la isoterma entre 2.700 y 2.770 m entre las 14:00 y las 17:00 del 8 de octubre, y acumula unos 150 mm sobre la cuenca entre el 2 y el 8 de octubre. Las imágenes Sentinel-2 (Drusch y cols., 2012) del 21 de septiembre no muestran nieve en la cuenca (índice normalizado de nieve menor a 0,4 en toda la parte despejada; las zonas blancas eran nubes delgadas), y las del 9 de octubre muestran 0,09 km² de nieve nueva, toda sobre 2000 m. La alta cordillera sí tenía un manto abundante: Valle Nevado informó cerca de 1,2 m de nieve nueva el 6 y el 7 de octubre (Emol, 2026), por sobre los 3000 m.

4.2. Terreno, edificios y calles

El terreno sin edificios ni vegetación, es decir, el modelo digital del terreno (DTM), es FABDEM V1-2 (Hawker y cols., 2022; Neal y Hawker, 2023), con resolución de 1 segundo de arco (unos 30 m), remuestreado de forma bilineal a una retícula regular de 4 m en el sistema UTM, huso 19 sur (datum WGS 84). El remuestreo aumenta la densidad de puntos, pero no mejora la resolución efectiva del modelo de elevación. Esta limitación debe considerarse al interpretar los resultados. Se incorporaron 1107 plantas de edificios de OpenStreetMap (OSM; Colaboradores de OpenStreetMap, 2026) como bloques elevados. La altura de cada bloque es la media de DSM – DTM, donde el modelo digital de superficie (DSM) es Copernicus GLO-30 (European Space Agency, s. f.) y el DTM es FABDEM, cuando la planta mide al menos 900 m² y la diferencia supera 2,5 m. Si no se cumple, la altura es el número de pisos de OSM multiplicado por 3 m; sin ese dato, se asumen 6 m. Para cada bloque se reportan la media y el percentil 95 de DSM – DTM. Se excluyeron cuatro polígonos de OSM etiquetados como edificio que corresponden a recintos (complejos deportivos y un centro comercial con DSM – DTM medio inferior a 4 m), porque como bloques sólidos habrían desviado artificialmente el flujo. Las calles se rebajaron 0,15 m, la altura del cordón, con un ancho según su categoría.

4.3. Modelo de propagación

Se usa ANUGA, versión 4.0.1 (Roberts, Nielsen, Gray, Sexton, y Davies, 2026): volúmenes finitos sobre una malla triangular no estructurada, con el esquema DE1 (Runge–Kutta de segundo orden). Para una mezcla homogénea de densidad constante, ANUGA resuelve la evolución del caudal unitario $\mathbf{q} = h\mathbf{u}$ mediante las ecuaciones de conservación de la masa (1) y de la cantidad de movimiento (2):

$$\partial_t h + \nabla \cdot \mathbf{q} = S_h, \quad (1)$$

$$\partial_t \mathbf{q} + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \mathbf{I} \right) = -g h \nabla z - \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho_m} + S_h \mathbf{u}_{\text{in}}, \quad (2)$$

donde h es el espesor del flujo (m); $\mathbf{u}$, la velocidad media en profundidad (m s⁻¹); $\mathbf{q} = h\mathbf{u}$, el caudal por unidad de ancho (m² s⁻¹); z , la elevación del lecho (m); g , la aceleración de gravedad (m s⁻²); S_h , la tasa de aporte de espesor (m s⁻¹); $\mathbf{u}_{\text{in}}$, la velocidad del aporte (m s⁻¹); $\boldsymbol{\tau}_b$, el esfuerzo de corte basal (Pa); ρ_m ,

la densidad de la mezcla (kg m^{-3}); y $\mathbf{I}$, el tensor identidad. Al dividir por ρ_m , constante, no aparece ningún factor de densidad en la presión ni en la gravedad. La resistencia basal es $\tau_b/\rho_m = ghS_f \mathbf{u}/U$, con $U = |\mathbf{u}|$ y la pendiente de fricción S_f dada por

$$S_f = \frac{\tau_y}{\rho_m gh} + \frac{K\eta U}{8\rho_m gh^2} + \frac{n_{td}^2 U^2}{h^{4/3}}, \quad (3)$$

donde τ_y es el esfuerzo de fluencia (Pa); η , la viscosidad dinámica de la mezcla (Pa s); K , el parámetro adimensional de resistencia laminar; y n_{td} , el coeficiente de Manning equivalente para la turbulencia y la dispersión ($\text{s m}^{-1/3}$). El esfuerzo de fluencia y la viscosidad se obtienen de las relaciones reológicas

$$\tau_y = 0,1 \alpha_2 e^{\beta_2 C_{v,f}}, \quad \eta = 0,1 \alpha_1 e^{\beta_1 C_{v,f}}, \quad (4)$$

donde $C_{v,f}$ es la concentración volumétrica de la matriz fina; la densidad ρ_m usa, en cambio, la concentración total $C_{v,tot}$ (sección 2). En las simulaciones del barrido se adopta $C_{v,tot} = C_{v,f}$. Los coeficientes $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$ provienen de la tabla 13 de [FLO-2D Software, Inc. \(2021\)](#), donde α_1 se expresa en poises y α_2 en dyn cm^{-2} ; β_1 y β_2 son adimensionales. El factor 0,1 de (4) convierte ambas magnitudes al SI, de modo que τ_y resulta en Pa y η en Pa s. La muestra Glenwood 2 aparece con tres variantes en distintas versiones de la documentación y se trató como sensibilidad. K y n_{td} cambian según la superficie: en calles pavimentadas $K = 100$ y $n_{td} = 0,025$; en el resto, $K = 400$ y $n_{td} = 0,050$.

La resistencia (3) se aplica como paso fraccionado y se resuelve de forma implícita en cada celda. Con $a = \tau_y/(\rho_m h)$, $b = K\eta/(8\rho_m h^2)$, $c = gn_{td}^2/h^{4/3}$ y $r = (U^* - \Delta t a)_+$, se obtiene

$$U^{n+1} = \frac{2r}{1 + b\Delta t + \sqrt{(1 + b\Delta t)^2 + 4c\Delta t r}}, \quad (5)$$

donde el asterisco indica el estado anterior al paso de resistencia; el superíndice $n + 1$, el estado posterior a ese paso; Δt es el paso temporal y $(x)_+ = \max(x, 0)$. La solución (5) cumple $0 \leq U^{n+1} \leq U^*$, conserva la dirección, disipa energía y no modifica h . Si $|\mathbf{q}^*| \leq \Delta t \tau_y/\rho_m$, la celda se detiene y puede reactivarse en pasos posteriores. La fricción de Manning propia de ANUGA se anula para no duplicar la resistencia.

La mezcla entra mediante un hidrograma triangular de caudal pico Q_p , volumen de mezcla V_m y tiempo al pico de 600 s, con base $T_B = 2V_m/Q_p$. Cada fuente agrega en un círculo de 14 m de radio el incremento de espesor Δh correspondiente al volumen aportado por el hidrograma durante el paso, junto con su momento: $h^+ = h^- + \Delta h$ y $\mathbf{q}^+ = \mathbf{q}^- + \Delta h \mathbf{u}_{in}$, donde los superíndices $-$ y $+$ indican los estados anterior y posterior al aporte, y $\mathbf{u}_{in}$ se orienta según el eje del cauce. Cuando $Q = 0$ no hay forzamiento. En H3, cada fuente recibe la fracción del hidrograma correspondiente al área de su cuenca. La malla tiene unos $4,3 \times 10^5$ triángulos: 40 m^2 en el corredor entre los cauces y Padre Hurtado (lado equivalente de unos 10 m) y 600 m^2 fuera de él. La aceleración de gravedad es $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ en todo el modelo. Las simulaciones duran $T_B + 1\,200 \text{ s}$ y en cada una se registra el balance de volumen.

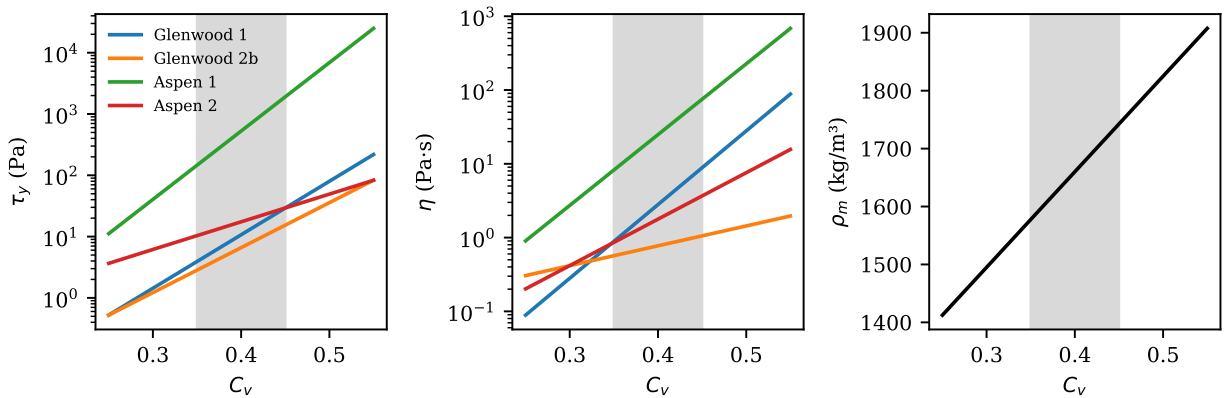


Figura 3: Propiedades de la mezcla según la concentración volumétrica de sólidos C_v para las muestras ensayadas: esfuerzo de fluencia τ_y , viscosidad η y densidad ρ_m . La franja gris indica el rango usado (0,35–0,45).

4.4. Verificación numérica

Parada. Sobre un plano de pendiente $S_0 = 0,05$, con $\tau_y = 100 \text{ Pa}$ y $\rho_m = 1\,700 \text{ kg m}^{-3}$, la teoría de un fluido de Bingham integrado en la profundidad predice un espesor de reposo $h_c = \tau_y/(\rho_m g S_0) = 0,1199 \text{ m}$.

Cuadro 3: Parámetros físicos y numéricos aplicados en las simulaciones. Los coeficientes reológicos son los de la tabla de muestras de OBrien y Julien recopilada en el manual de FLO-2D (FLO-2D Software, Inc., 2021); $\tau_y = 0,1 \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ en Pa y $\eta = 0,1 \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ en Pa s.

Muestra	α_1	β_1	α_2	β_2	τ_y (Pa) / η (Pa.s) con $C_v =$		
					0,35	0,40	0,45
Glenwood 1	0,0028	23,00	0,0345	20,10	3,9 / 0,89	10,7 / 2,80	29,2 / 8,85
Glenwood 2a	0,0648	6,20	0,0765	16,90	2,8 / 0,06	6,6 / 0,08	15,4 / 0,11
Glenwood 2b	0,6480	6,20	0,0765	16,90	2,8 / 0,57	6,6 / 0,77	15,4 / 1,06
Glenwood 2c	0,6480	8,20	0,0765	16,90	2,8 / 1,14	6,6 / 1,72	15,4 / 2,59
Aspen 1	0,0360	22,10	0,1810	25,70	145,9 / 8,23	527,5 / 24,86	1906,8 / 75,05
Aspen 2	0,0538	14,50	2,7200	10,40	10,4 / 0,86	17,4 / 1,78	29,3 / 3,67
Mezcla y constantes							
Densidad del agua ρ_w / de los sólidos ρ_s						1 000 kg/m ³ / 2 650 kg/m ³	
Densidad de la mezcla $\rho_m = \rho_w + C_v(\rho_s - \rho_w)$, $C_v = 0,35/0,40/0,45$						1578 / 1660 / 1742 kg/m ³	
Gravedad g						9,8 m/s ²	
Resistencia laminar K (calles / resto)						100 / 400	
Manning turbulento-dispersivo n_{td} (calles / resto)						0,025 / 0,050 s m ^{-1/3}	
Entrada, malla y cálculo							
Volumen de mezcla V / caudal pico Q_p / tiempo al pico t_p						80–300 mil m ³ / 100–250 m ³ /s / 600 s	
Velocidad de entrada / radio de cada fuente						2 m/s / 14 m	
Área máxima de triángulo (corredor / resto); triángulos						40 / 600 m ² ; $\approx$ 430 000	
Grilla del terreno; rebaje de calles; altura supuesta de edificios						4 m; 0,15 m; 6 m	
Número de Courant (cribado / lluvia / final)						1 / 0,5 / $\leq$ 0,25	
Umbral de mojado para la evaluación h^*						5 cm (sensibilidad 2 y 10 cm)	

Se libera un bloque de mezcla y se compara el espesor simulado del depósito con el espesor teórico de reposo; se verifica además que el momento se anule.

Reinicio. A partir del depósito detenido se agrega mezcla aguas arriba y se verifica que el depósito se reactive, vuelva a detenerse y conserve el volumen.

Convergencia temporal. El ensayo de parada se repite con números de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) de 1; 0,5; 0,25; 0,1 y 0,05 con el esquema DE1, y con el esquema DE0 como comparación; se compara el alcance final del frente y se estima el orden de convergencia respecto del límite extrapolado.

Balance de volumen. En cada simulación se compara el volumen acumulado aportado por el hidrograma con el volumen presente en la malla.

Los resultados de estas pruebas se presentan en sección 6.2.

4.5. Volumen previo independiente

Las cuencas se delimitaron con direcciones de flujo calculadas por el método de ocho direcciones (D8) sobre FABDEM reproyectado al sistema UTM, huso 19 sur (datum WGS 84), con celdas de 30 m. Una delimitación preliminar en coordenadas geográficas subestimaba el área. La salida de cada cuenca es la celda de máxima acumulación a menos de 120 m del punto donde el cauce cartografiado entra a la urbanización. Resultan H1 con 8,04 km² y un relieve de 1 376 m, S1 con 1,90 km² y S2 con 0,17 km²: en total, 10,1 km² aportantes.

Se usaron dos estimaciones independientes, que no se combinan en una sola distribución:

- **Balance lluvia–escorrentía con agua y sólidos diferenciados:** $V_w = f_w PAC$ y $V_m = V_w / (1 - C_{v,tot})$, donde V_w es el volumen de agua incorporado al pulso; P , la precipitación acumulada; A , el área de la cuenca; C , el coeficiente de escorrentía; f_w , la fracción de escorrentía incorporada al pulso; y V_m , el volumen de mezcla. Los rangos son: precipitación del pulso del evento P entre 12 mm y 35 mm, $C \in [0,3; 0,8]$, $f_w \in [0,5; 1]$ y $C_{v,tot} \in [0,30; 0,50]$.
- **Modelo empírico para cuencas quemadas** (Gartner y cols., 2014), aplicado por subcuenca e incluyendo su error residual $\varepsilon \sim N(0; 1,04^2)$. Ese modelo predice el volumen de depósito V_{dep} , que se convierte a volumen de mezcla con $V_m = (1 - \phi)V_{dep}/C_{v,tot}$, donde ϕ es la porosidad del depósito. Su aplicabilidad fuera del sur de California es una hipótesis.

Las distribuciones se resumen mediante la mediana y los percentiles 5 y 95, y el caudal pico correspondiente se estima con la relación de Mizuyama y cols. (1992). La calibración recorre volúmenes de 80 000 m³ a 300 000 m³. Los resultados se presentan en sección 6.3.

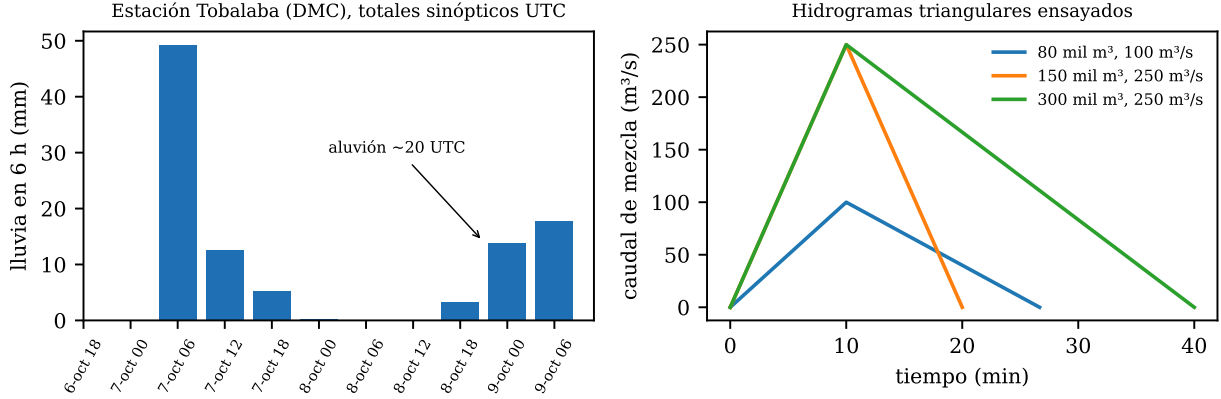


Figura 4: Forzamiento. Izquierda: lluvia acumulada cada 6 horas en la estación Tobalaba de la Dirección Meteorológica de Chile entre el 6 y el 9 de octubre de 2026 (horas UTC; el aluvión ocurrió hacia las 20 UTC del 8 de octubre). Derecha: hidrogramas triangulares de mezcla ensayados.

Escenario de suelo saturado. Con la información hidrometeorológica conocida después del cribado (sección 4.1) se agregó una tercera estimación, tampoco combinada con las anteriores: la isoterma por encima de la cota máxima de la cuenca (2 775 m) implica que toda el área aportante recibió lluvia y no nieve, y la lluvia antecedente implica suelo saturado. Se usan $P \in [20; 40]$ mm, $C \in [0,6; 0,9]$ y $f_w \in [0,6; 1]$. El aporte por fusión de nieve se acota por arriba con 50 mm de equivalente en agua sobre los 0,31 km² de la cuenca situados sobre 2 000 m.

4.6. Calibración inversa e incertidumbre

La calibración sigue el enfoque de simulaciones de comportamiento aceptable (Beven y Binley, 1992). Los criterios se fijaron antes de examinar los resultados:

1. fracción R de puntos sobre calles con presencia confirmada en que $h_{\max} > h^*$, con $R \geq 0,6$;
2. fracción R_{sit} de los cuatro sitios con presencia confirmada que el flujo alcanza dentro de 40 m, con $R_{\text{sit}} \geq 3/4$;
3. llegada a menos de 200 m del cruce de General Blanche con Padre Hurtado;
4. fracción F_{per} del área afectada que cae dentro del perímetro municipal ampliado en 100 m, con $F_{\text{per}} \geq 0,5$.

El umbral es $h^* = 5$ cm, con sensibilidad para 2 cm y 10 cm. Cada simulación aceptable recibe un peso informal $L = R R_{\text{sit}} F_{\text{per}}$. Las calles cerradas por el municipio se usan solo como contexto, porque un cierre puede ser preventivo. El índice de Jaccard respecto del perímetro se informa como dato descriptivo, ya que el perímetro es operativo y no una huella cartografiada.

El barrido recorre las hipótesis H1, H2 y H3; volúmenes de mezcla de 80 000 m³, 150 000 m³ y 300 000 m³; caudales pico de 100 m³ s⁻¹ y 250 m³ s⁻¹; y tres muestras reológicas (Glenwood 1, Glenwood 2b y Aspen 2). El cribado usa CFL 1; las simulaciones aceptables se repetirán con CFL 0,25 y malla fina para acotar el error numérico del alcance.

4.7. Síntesis del conjunto e indicadores por calle y edificio

La síntesis del conjunto especificará los estadísticos utilizados, el tratamiento de los pesos y el procedimiento de extracción de indicadores por calle y edificio. Estos procedimientos deben quedar definidos antes de presentar sus resultados.

Pendiente: estadísticos de la síntesis del conjunto, tratamiento de los pesos L y procedimiento de extracción de la profundidad, la velocidad y la presión por calle y edificio.

5. Datos de entrada y funcionamiento del modelo: guía para aplicarlo a otras cuencas

Esta sección describe el método en términos generales, sin referencia a productos ni programas concretos, para que pueda aplicarse a otras cuencas con los datos que cada caso tenga disponibles. Se indica qué representa cada dato, la calidad mínima recomendable, cómo entra en el cálculo y cómo afecta al resultado cuando es incierto.

Cómo funciona el modelo

El modelo resuelve, en cada instante y en cada celda de una malla que cubre la ciudad, cuánto barro hay (espesor) y hacia dónde y a qué velocidad se mueve. Lo hace con tres principios:

1. **Conservación de la masa:** el barro que entra a una celda y no sale se acumula como espesor. No se crea ni se pierde barro; el balance se verifica en cada simulación.
2. **Conservación del momento:** el barro acelera pendiente abajo por la gravedad, según la inclinación de la superficie libre y no solo la del suelo, y lo frenan la resistencia del propio material y el roce con la superficie. Por eso puede subir sobre una solera si llega con velocidad, rodear un edificio o embalsarse detrás de un obstáculo.
3. **Comportamiento del material:** a diferencia del agua, una mezcla densa de agua y sedimento tiene un *umbral de fluencia*: si el empuje de la gravedad sobre una capa no lo supera, la capa se detiene. Por eso el barro deja depósitos de cierto espesor en lugar de escurrir hasta la cota más baja. Sobre ese umbral, la mezcla se comporta como un fluido muy viscoso y turbulento.

La simulación avanza en pasos de tiempo cortos, de fracciones de segundo, limitados por la velocidad del flujo y el tamaño de las celdas. En cada paso se calculan primero el transporte y la gravedad, y después el frenado del material, que puede detener una celda o reactivarla si llega más barro desde aguas arriba. Durante la simulación se registran, para cada celda, el espesor máximo, la velocidad máxima, el empuje dinámico sobre obstáculos y el instante de llegada del frente.

Datos de entrada

Dato	Qué representa y cómo se usa	Calidad recomendable	Efecto si es incierto
Relieve del terreno desnudo	Cotas del suelo sin edificios ni árboles; define pendientes y hacia dónde escurre el flujo.	Ojalá 1 m a 5 m de resolución; 30 m solo reproduce la dirección general.	Es el dato más influyente: un cauce o una calle que el relieve no resuelve cambia el recorrido.
Huellas y alturas de edificios	Obstáculos que el flujo rodea; se elevan sobre el terreno.	Huellas completas; altura por levantamiento o número de pisos.	Desvía el flujo localmente; poca influencia en el recorrido general si las huellas están bien.
Calles y soleras	Corredores preferentes; se rebajan unos centímetros respecto de las veredas.	Eje y ancho de cada calle; cota de solera si existe.	Determina qué calles actúan como canales.
Cauces abiertos y tramos entubados	Dónde la quebrada va por superficie y dónde bajo tierra; los puntos de transición son candidatos a desborde.	Trazado, sección y capacidad de cada tramo.	Si falta un cauce abierto, el modelo lo sustituye por la pendiente general; si falta un ducto, no se puede evaluar su desborde.
Cuenca aportante	Área y relieve que drenan a cada punto de entrada a la ciudad; se obtienen del relieve.	Relieve de la cuenca alta; 30 m suele bastar.	Escala el volumen esperado en proporción al área.
Lluvia	Cantidad e intensidad del episodio y de los días previos (humedad del suelo).	Estación cercana con registro horario o subhorario; ojalá en la cuenca alta.	Con la cuenca, acota el volumen; la intensidad de corta duración controla el caudal pico.
Estado de la cuenca	Superficie quemada, cobertura vegetal, suelo.	Cartografía de severidad del incendio.	Aumenta la escorrentía y la carga de sedimento.
Volumen e hidrograma	Cuánta mezcla entra, con qué caudal máximo y en cuánto tiempo.	Estimados a partir de lluvia y cuenca, de relaciones empíricas o de depósitos medidos tras el evento.	Controla el alcance y las profundidades; se acota mediante calibración.
Propiedades del material	Densidad, umbral de fluencia y viscosidad de la mezcla, según la concentración de sólidos.	Ensayos de muestras del depósito; si no los hay, rangos de la literatura.	Controla cuándo y dónde se detiene el flujo.
Observaciones del evento	Calles y edificios afectados, alcance, profundidades, horas.	Puntos georreferenciados con fuente y hora; marcas de nivel.	No alimentan el modelo: permiten descartar hipótesis y calibrar.

Procedimiento para otra cuenca

1. **Delimitar el área urbana expuesta** y los puntos donde los cauces entran a la ciudad o cambian de abiertos a entubados. Esos puntos son las entradas posibles del flujo.
2. **Construir la superficie de cálculo:** relieve desnudo, edificios elevados, calles rebajadas y, si es posible, cauces abiertos con su sección real.
3. **Estimar un rango de volumen** con al menos dos vías independientes (lluvia por cuenca por coeficiente de escorrentía, y relaciones empíricas para cuencas similares), sin combinarlas en una sola cifra.
4. **Formular hipótesis de entrada** (por qué puntos sale el flujo a la superficie y en qué proporción) y fijar *antes* de simular los criterios con que se juzgará cada una frente a las observaciones.
5. **Simular cada combinación** de hipótesis, volumen, caudal y material; verificar en cada simulación el balance de masa y la estabilidad numérica.
6. **Comparar con las observaciones**, conservar las combinaciones compatibles y reportar el conjunto como un rango de escenarios y no como una única respuesta.
7. **Repetir las simulaciones compatibles con mayor resolución temporal y espacial**, para estimar el error numérico de alcances y tiempos.

Qué mejora más el resultado

En este caso de estudio, el orden de influencia de las incertidumbres fue: el relieve (resolución y representación de cauces y calles), las propiedades del material, el volumen y la forma del hidrograma, y las alturas de los edificios. Un levantamiento de alta resolución del sector urbano y del cauce, y muestras del depósito, son las dos mejoras de mayor rendimiento. Para fines preventivos, sin un evento que calibrar, el método se aplica igual, pero con escenarios de volumen y material elegidos según la cuenca y reportando las envolventes de afectación en lugar de un recorrido único.

6. Resultados

Resultados preliminares de la fase de cribado (9 de octubre de 2026). Todas las simulaciones de esta sección usan un número de Courant igual a 1 —0,5 las que incluyen lluvia—, que sobrestima el alcance del frente en cerca de un 30 % (sección 6.2); el patrón de calles mojadas es la variable de discriminación y es menos sensible a ese sesgo. Las simulaciones finales con paso de tiempo reducido están pendientes.

6.1. Terreno urbano

El dominio cubre 5,9 km por 3,4 km con una grilla de 4 m. Contiene 1.103 edificios representados como bloques, con altura media de 6,2 m y máxima de 39 m: 82 alturas obtenidas de la diferencia entre superficie y terreno, 26 de los pisos registrados y 995 supuestas en 6 m. Se excluyeron cuatro polígonos que corresponden a recintos (complejos deportivos y un centro comercial) y no a volúmenes construidos. En el terreno base, el cauce abierto del parque lineal entre el abanico y Francisco Bulnes Correa queda prácticamente plano (relieve transversal de $\pm 0,5$ m). En el terreno fotogramétrico del año 2014 (Hussain, 2021), con resolución efectiva de 8 a 10 m, el cauce aparece como una depresión de 1 a 4,5 m respecto de sus márgenes. Ese terreno presenta un desfase vertical de 26,7 m (diferencia entre referencias elipsoidal y geoidal) y depresiones espurias, que se corrigieron antes de usarlo.

6.2. Verificación numérica

Equilibrio del depósito. Al detenerse sobre un plano de pendiente 0,05, el depósito satisface el criterio de fluencia: el residuo local $r = \rho_m g h |\nabla(z + h)| / \tau_y$ tiene mediana y percentil 95 iguales a 1,00, sin celdas con $r > 1,05$. El espesor teórico de reposo es $h_c = 0,1200$ m con $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$.

Reinicio. Al agregar mezcla aguas arriba, el frente avanza 26 m más que en el control sin aporte. El control, sin embargo, también avanza 19 m en 900 s, y la deriva del frente detenido es de 6,7 m en los últimos 300 s. Ese deslizamiento residual proviene del paso fraccionado y disminuye al reducir el paso de tiempo.

Convergencia. Con CFL 0,25, el alcance converge al refinar la malla: 354 m, 345,7 m y 341,2 m para celdas de 4, 2 y 1 m, con un valor extrapolado de unos 337 m. Con celdas de 2 m, el alcance disminuye al reducir el número de Courant: 431 m, 374 m, 346 m y 328 m para CFL 1; 0,5; 0,25 y 0,1. Es una convergencia de primer orden, con un sesgo de +30 % para CFL 1.

Convergencia en el dominio urbano. En el terreno con las 42.018 huellas de edificios, la simulación de $300\,000 \text{ m}^3$ por el cauce principal se repitió con CFL 0,25. Respecto de CFL 1, la diferencia de espesor máximo tiene mediana de 2 mm y percentil 95 de 9 mm; el 99 % de las celdas coincide en mojado o seco; la llegada del frente difiere en menos de 20 s, y la distancia mínima a Padre Hurtado pasa de 96 a 94 m. En la ciudad, el frente se detiene por la geometría de calles y edificios y no por el deslizamiento residual del ensayo en plano, de modo que el sesgo de +30 % de ese ensayo no se traslada a las simulaciones urbanas.

Balance de volumen. En todas las simulaciones del dominio urbano, el volumen en la malla coincide con el aportado, menos el retirado por el colector y el que sale por los bordes, con un residuo menor a 0,01 %. Una versión anterior del borde de salida generaba masa espuria al llegar el frente al límite sur, con un aumento de hasta un 20 %; esas simulaciones se descartaron y se repitieron con un borde de solo salida.

6.3. Estimación independiente del volumen

La cuenca aportante tiene $10,1 \text{ km}^2$: el cauce principal ($8,04 \text{ km}^2$, relieve de 1 376 m), el cauce sur ($1,90 \text{ km}^2$) y las quebradas menores ($0,17 \text{ km}^2$). Con el balance lluvia–escorrentía, la mediana del volumen de mezcla es de

151 000 m³, con percentiles 5 y 95 de 67 000 m³ y 310 000 m³. Con el modelo para cuencas quemadas (Gartner y cols., 2014), la mediana es de 374 000 m³, con percentiles de 61 000 m³ y $2,3 \times 10^6$ m³. Con 151 000 m³, la relación de Mizuyama y cols. (1992) da $Q_p \approx 230$ m³/s.

Con el escenario de suelo saturado, la mediana sube a 295 000 m³, con percentiles 5 y 95 de 181 000 m³ y 468 000 m³. La fusión de nieve aporta como máximo unos 15 000 m³, menos del 5 %: no había manto previo en la cuenca y el 90 % de su superficie está bajo 1 800 m. Lo determinante de la isoterma alta fue el área que recibió lluvia: si la cota de nieve se toma unos 300 m bajo la isoterma, una isoterma de 2 000 m habría dejado 8,2 km² bajo lluvia (81 %), una de 1 800 m, 6,0 km² (59 %), y una de 1 500 m, 1,7 km² (16 %); con la isoterma del 8 de octubre llovió sobre los 10,1 km². Con la misma lluvia, una tormenta de isoterma típica habría generado entre un 20 y un 40 % menos de agua en el pulso.

6.4. Compatibilidad de las hipótesis con las observaciones

Cuadro 4: Fracción de puntos de control con espesor máximo simulado mayor a 5 cm, por calle, y espesor máximo en un radio de 40 m de cada sitio. Todas las simulaciones usan Glenwood 2b, $C_v = 0,40$ y $Q_p = 250$ m³/s, salvo d03 ($Q_p = 100$ m³/s). LP: La Plaza (Portillo–El Alba); GB: General Blanche (San Carlos de Apoquindo–Las Condesas); CEA: Camino El Alba; QH: Quebrada Honda; LPS: La Plaza Sur; UCC: Clínica UC Christus; CUA: Clínica Universidad de los Andes; dPH: distancia mínima del barro al cruce de General Blanche con Padre Hurtado.

Hipótesis	V (mil m ³)	LP	GB	CEA	QH	LPS	UCC (m)	CUA (m)	Duoc (m)	dPH (m)
H3	80	0,87	0,86	0,61	0,00	0,00	0,22	0,00	0,42	1160
H1	150	0,91	0,92	0,85	0,00	0,00	0,42	0,00	0,55	366
H3	150	0,88	0,92	0,78	0,00	0,00	0,39	0,00	0,53	516
H3	300	0,91	0,93	0,96	0,00	0,00	0,42	0,00	0,54	4
H2	150	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	856
H4, $f_{\text{sup}} = 0,5$	150	0,88	0,88	0,57	0,66	0,00	0,26	0,00	0,46	1007
H4, $f_{\text{sup}} = 0,9$	150	0,88	0,91	0,68	0,54	0,00	0,35	0,00	0,52	816
H5 (H4 + lluvia de 20 mm/h)	150	0,88	0,88	0,57	0,66	0,00	0,26	0,06	0,46	1005
H1, cauce tallado, sin colector	150	0,89	0,94	0,87	0,55	0,00	0,31	0,00	1,63	338
ídem, colector 10 m ³ /s	150	0,89	0,94	0,87	0,43	0,00	0,31	0,00	1,63	338
ídem, colector 30 m ³ /s	150	0,89	0,94	0,87	0,01	0,00	0,31	0,00	1,63	338

La tabla 4 resume las simulaciones de cribado. Se observan cuatro regularidades:

1. **Corredores del abanico.** La Plaza, Mons. Álvaro del Portillo, Av. San Carlos de Apoquindo, el tramo alto de General Blanche y Camino El Alba superan el umbral en el 85 a 100 % de sus puntos en todas las hipótesis con salida en el abanico, para volúmenes entre 80 y 300 000 m³. Duoc UC y la Clínica UC Christus quedan alcanzados en todas ellas, con espesores de 0,4 a 1,6 m y de 0,2 a 0,4 m, respectivamente.
2. **Quebrada Honda.** Esta calle solo supera el umbral cuando el flujo sale a la superficie en la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa. Eso ocurre si se impone una fuente allí (H2, H4) o si el terreno representa el cauce abierto que conduce el flujo hasta la embocadura y el colector no lo absorbe. Basta con que salga allí el 8 % del volumen.
3. **Capacidad del colector.** Con el cauce representado, a la embocadura llegan 12 800 m³, con un caudal máximo de 16,5 m³/s. Un colector de 30 o 100 m³/s los absorbe y Quebrada Honda queda seca (1 %). Con 10 m³/s, desbordan unos 2 600 m³ y Quebrada Honda se moja en el 43 % de sus puntos (figura 5).
4. **Sector sur.** Ninguna simulación moja la Av. La Plaza Sur ni el campus de la Universidad de los Andes. Solo la lluvia sobre la ladera oriente (H5) alcanza la Clínica Universidad de los Andes, con 6 cm en su entorno, lo que coincide con la declaración de la clínica de que la afectación fue exterior.

Ninguna simulación cumple todavía los cuatro criterios de aceptación fijados de antemano (sección 4.6). El criterio de sitios falla en todas, porque no se alcanza el campus, y el de alcance falla en todas las de 150 000 m³.

6.5. Contraste con información posterior a las hipótesis

Después de formular las hipótesis se conocieron tres fuentes que permiten un contraste parcial, aunque no independiente de la prensa:

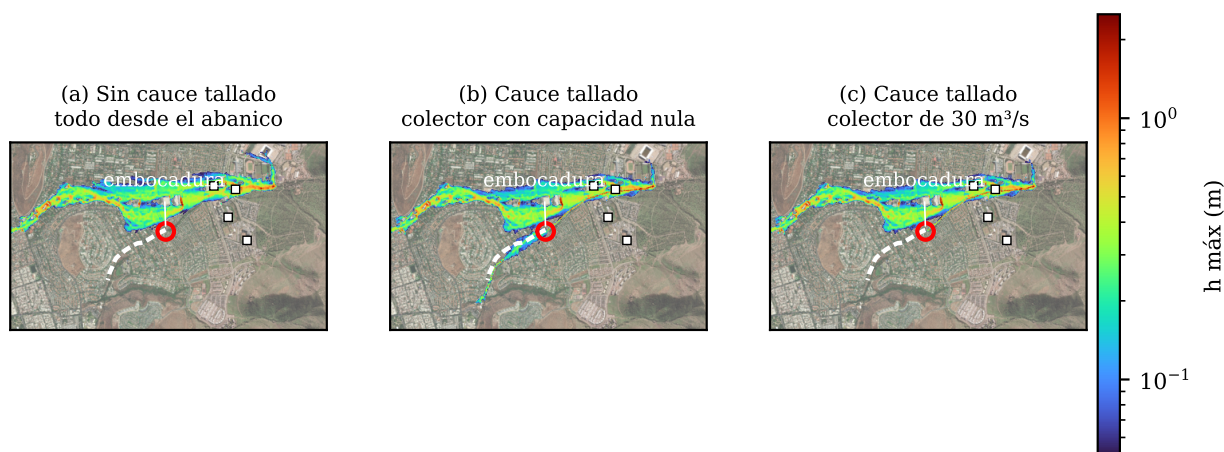


Figura 5: Espesor máximo simulado con $150\,000\text{ m}^3$ saliendo en el abanico. (a) Terreno base: el flujo no alcanza Quebrada Honda (línea blanca discontinua). (b) Cauce del parque lineal tallado y colector con capacidad nula: el flujo que llega por el cauce a la embocadura (círculo rojo) desborda hacia Quebrada Honda. (c) Mismo terreno con un colector de $30\text{ m}^3/\text{s}$: el colector absorbe lo que llega y Quebrada Honda queda seca. Los cuadrados indican los sitios afectados.

- **Explicación preliminar oficial** (Rojas Pérez, 2026): el Delegado Presidencial informó que el material taponó el ingreso a dos ductos paralelos en General Blanche y que colapsó la cámara de decantación de Bulnes Correa; Carabineros informó el desborde del canal en esa calle. Es la combinación que el modelo requiere para mojar a la vez el abanico y Quebrada Honda.
- **Reporte técnico de Sernageomin sobre el aluvión del 31 de enero de 2026** (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2026): describe un corredor único desde el Parque San Carlos de Apoquindo, por el sector de la Universidad de los Andes, hasta Quebrada Honda con Francisco Bulnes Correa, con continuación hacia la quebrada Apoquindo, el Hospital Dipreca y Paul Harris. El canal paralelo a Quebrada Honda aparece colmatado de barro tras ese evento. Coincide con el recorrido del cauce que el modelo necesita representar. La continuación hacia Dipreca y Paul Harris queda fuera del dominio actual.
- **Mapa de prensa** (Chilevisión, 2026b): traza como vías del aluvión los ejes de Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda hasta Padre Hurtado. Sobre esas líneas completas, la mejor simulación moja el 92 % de Camino El Alba, el 40 % de General Blanche y el 27 % de Quebrada Honda. El tramo bajo de General Blanche, entre Las Condesas y Padre Hurtado, no se reproduce: el flujo simulado prefiere Camino El Alba en ese tramo.

Entre el 9 y el 10 de octubre se conocieron más datos, que se contrastaron sin modificar las simulaciones:

- **Lugares con ingreso de barro o agua.** Senapred incluye la Av. La Plaza Sur entre las tres calles más afectadas; el campus de la Universidad de los Andes tuvo barro y personas retenidas, y la Clínica Universidad de los Andes, un ingreso menor de agua (Interferencia, 2026; Wikipedia, 2026). En el terreno con edificios, la simulación por el cauce principal no moja ninguno de esos tres puntos. La que agrega los brazos sur y lluvia sobre la ladera da $0,14\text{ m}$ junto a la Clínica Universidad de los Andes y moja parte de La Plaza Sur, pero deja el campus con 1 cm . Ambas reproducen la Clínica UC Christus ($1,13$ a $1,16\text{ m}$, frente a cerca de 1 m informado) y la sede Duoc UC ($1,9\text{ m}$).
- **Evento del 31 de enero.** Con 75 mm en $1\text{ h }20\text{ min}$, una intensidad mucho mayor que la del 8 de octubre, afectó 8 ha , cerca de 4 km de calles y 11 viviendas (T13, 2026), y el colector de Bulnes Correa «funcionó muy bien» según la alcaldesa (La Tercera, 2026a). Que un evento más intenso fuera mucho menor indica que en octubre pesaron la saturación antecedente y el material disponible más que la intensidad pico, en línea con el escenario de suelo saturado.
- **Superficie afectada.** Las 253 ha informadas (Chicureo Hoy, 2026) coinciden con el área del perímetro municipal publicado por la prensa ($253,0\text{ ha}$). Es un perímetro de seguridad y no un mapa del barro: dentro de él el barro simulado ocupa cerca de 40 ha , porque se concentra en las calles. No se usa para discriminar hipótesis.

- **Hospital de la FACH.** Se informó agua en su servicio de urgencias. Ninguna simulación llega a ese punto, unos 1,3 km al norte del recorrido; es compatible con drenaje urbano por la lluvia del día y no se usa.

6.6. Indicadores en sitios críticos

En la simulación con el cauce tallado y el colector con capacidad nula, los máximos en un radio de 40 m son los siguientes:

- Duoc UC: 1,6 m de espesor, 6,3 m/s y 33 kPa de presión dinámica; el frente llega al minuto 4.
- Cruce de General Blanche con San Carlos de Apoquindo: 1,4 m, 6,7 m/s y 37 kPa, al minuto 7.
- Clínica UC Christus: 0,3 m y 1,6 m/s, al minuto 9.
- Embocadura de Bulnes Correa: 1,6 m y 3,9 m/s, al minuto 13.

Los minutos se cuentan desde el inicio del pulso. Con ese escenario, 170 edificios quedan con barro sobre 5 cm junto a su fachada, 46 sobre 0,5 m y 11 sobre 1 m; 8 reciben una presión dinámica mayor a 10 kPa. Estos valores tienen el sesgo de cribado ya señalado y no se han contrastado con mediciones.

7. Discusión

Qué reproduce el modelo. La estructura principal del evento es robusta frente al volumen, a la hipótesis de origen y a la representación del terreno. El flujo superficial que sale del abanico recorre La Plaza, Portillo, San Carlos de Apoquindo, el tramo alto de General Blanche y Camino El Alba, y alcanza Duoc UC y la Clínica UC Christus, en concordancia con la prensa, el municipio y las autoridades. El volumen que exige el alcance observado, entre 150 y 300 000 m³, cae dentro del rango que se obtiene de forma independiente a partir de la lluvia sobre la cuenca. Que dos líneas de evidencia sin relación entre sí coincidan es el resultado más sólido del estudio.

El papel del drenaje. La afectación de Quebrada Honda no se explica por la escorrentía superficial que sale del abanico, sino por el flujo que llega a la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa y no ingresa a él. El experimento de capacidad muestra que el caudal que llegó a ese punto, del orden de 17 m³/s en el escenario ensayado, podría haber sido absorbido por un colector operativo de capacidad moderada. Por eso la afectación observada es compatible con una capacidad efectiva muy reducida, y basta con que esté por debajo de unos 10 m³/s. Este resultado concuerda con la explicación oficial preliminar y con el antecedente del evento de enero, en que el canal quedó colmatado. El estudio no identifica el mecanismo (obstrucción, colapso, sedimentación previa u otro) ni permite atribuir responsabilidades; sí señala dónde mirar.

Sensibilidad al terreno. La representación del cauce abierto del parque lineal cambió la cobertura de Quebrada Honda de 0 a 55 %, más que cualquier variación de volumen, de caudal o de material. Con un terreno de 30 m, las conclusiones sobre el recorrido dependen de que los corredores hidráulicos menores estén representados explícitamente. Para aplicar el método en otras cuencas, esa es la principal lección práctica (sección 5).

Discrepancias. Hay tres discrepancias sistemáticas:

1. No se reproduce la afectación de la Av. La Plaza Sur ni del campus de la Universidad de los Andes. La lluvia sobre la ladera oriente alcanza solo el entorno de la clínica.
2. En el tramo bajo de General Blanche, hacia Padre Hurtado, el flujo simulado prefiere Camino El Alba, aunque Carabineros informó que el torrente principal bajó por General Blanche.
3. La profundidad en la Clínica UC Christus es de 0,2 a 0,4 m en el modelo, frente al metro informado en su interior, que el modelo no representa.

Las explicaciones posibles incluyen la resolución del terreno, conexiones de drenaje no representadas, un material más fluido que el supuesto y el dominio, que no incluye el ramal hacia la quebrada Apoquindo descrito para el evento de enero.

Validez. Las observaciones usadas para evaluar las hipótesis provienen de la misma prensa que orientó su formulación, y H4 y H5 se definieron después de ver los primeros resultados. La concordancia obtenida es, por tanto, de coherencia y no de validación. La validación independiente se hará con imágenes satelitales de radar y ópticas posteriores al evento, con un procedimiento fijado antes de examinarlas.

8. Conclusiones

1. Un modelo bidimensional de aguas someras con reología de barro, construido solo con datos públicos, reproduce la estructura principal del aluvión del 8 de octubre de 2026: los corredores de La Plaza, General Blanche (tramo alto) y Camino El Alba, y la afectación de Duoc UC y de la Clínica UC Christus, con volúmenes de 150 a 300 000 m³, coherentes con la lluvia sobre una cuenca de 10 km².
2. La inundación de Quebrada Honda solo se reproduce si el flujo que llega a la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa no ingresa a él. En el escenario ensayado, un colector operativo de 30 m³/s habría evitado ese desborde, y uno de 10 m³/s no. La embocadura y la cámara de decantación son el punto prioritario de inspección.
3. El recorrido simulado depende más de la representación de los cauces y del drenaje que del volumen o del material. Esto define qué datos conviene levantar primero en otras cuencas.
4. Persisten discrepancias en el sector de La Plaza Sur y en el tramo bajo de General Blanche, y la concordancia obtenida aún no constituye una validación independiente. Los resultados son preliminares hasta completar las simulaciones con paso de tiempo reducido, ampliar el dominio y contrastarlos con imágenes satelitales.

Disponibilidad de datos y código

Los programas (`prep.py`, `sim.py`, `calibrar.py`, `verif_parada.py`, `cuenca.py`, `volumen_previo.py`), el registro probatorio de consultas con sus huellas SHA-256 y los resultados están disponibles en <https://aluvion.hirely.cl/datos.html>. Los informes de las revisiones técnicas se publican íntegros en el mismo sitio.

Declaración de uso de herramientas de IA

Se emplearon herramientas de inteligencia artificial como apoyo a la revisión técnica y editorial. Se completaron dos rondas de revisión de la física y la matemática (A1 y A2) y una ronda de revisión de formato (F1), realizadas con el modelo de lenguaje gpt-6-astra (Codex). Los informes disponibles y las modificaciones realizadas se documentan junto al manuscrito. La responsabilidad del contenido corresponde al autor.

Referencias

- Beven, K., y Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- BioBioChile. (2026a, 8 de octubre). El posible origen del brutal aluvión que golpeó Las Condes: apuntan a incendio que debilitó quebrada. *BioBioChile*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2026/10/08/apuntan-a-incendio-que-debilito-quebrada-como-el-posible-origen-del-devastador-aluvion-en-las-condes.shtml>
- BioBioChile. (2026b, 8 de octubre). Videos evidencian daños en sede Duoc UC y U. Los Andes por fuerte aluvión en San Carlos de Apoquindo. *BioBioChile*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2026/10/08/videos-evidencian-danos-en-sede-duoc-uc-por-fuerte-aluvion-en-san-carlos-de-apoquindo.shtml>
- Cadena 3. (2026, 8 de octubre). La clínica San Carlos de Apoquindo, colapsada con un metro de barro en el sector de urgencias. *Cadena 3*. https://www.cadena3.com/noticia/informados-al-regreso/la-clinica-san-carlos-de-apoquindo-colapsada-con-un-metro-de-barro-en-el-sector-de-urgencias_601888
- Chicureo Hoy. (2026, 9 de octubre). Las condes: refuerzan trabajos de limpieza mientras daños preliminares superan los US\$ 170 millones. *Chicureo Hoy*. <https://www.chicureohoy.cl/actualidad/las-condes-refuerzan-trabajos-de-limpieza-mientras-danos-preliminares-superan-los-us-170-millones/>

- Chilevisión. (2026a, 8 de octubre). Aluvión en Las Condes: Sernageomin advirtió de los puntos críticos en febrero de este año. *Chilevisión Noticias*. <https://www.chilevision.cl/noticias/nacional/aluvion-en-las-condes-sernageomin-advirtio-de-los-puntos-criticos-en-febrero-de-este-ano/>
- Chilevisión. (2026b). *Perímetro del aluvión: los puntos que afectó en Las Condes*. Mapa interactivo. <https://www.chilevision.cl/noticias/nacional/perimetro-aluvion-puntos-afecto-las-condes/>
- Colaboradores de OpenStreetMap. (2026). *Extracto de OpenStreetMap para Chile (chile-latest.osm.pbf)*. Distribuido por Geofabrik. <https://download.geofabrik.de/south-america/chile-latest.osm.pbf> (Archivo fechado el 2 de mayo de 2026; huella SHA-256 7bfd720d...12f3db. Datos bajo licencia ODbL)
- Cooperativa. (2026, 8 de octubre). Comunidad de U. Los Andes se mantendrá en el campus: «No sabemos hasta qué hora». *Cooperativa.cl*. <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/desastres-naturales/inundaciones/comunidad-de-u-los-andes-se-mantendra-en-el-campus-no-sabemos-hasta-2026-10-08/202449.html>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2026). *Servicios Climáticos: estación meteorológica automática 330019, Eulogio Sánchez (Tobalaba)*. (Datos del 6 al 9 de octubre de 2026, consultados el 9 de octubre de 2026 a las 09:22 hora local; copia archivada en el registro probatorio (dmc_tobalaba_330019_20261008.html))
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- El Dínamo. (2026, 9 de octubre). Qué calles están bloqueadas y por cuáles se puede transitar tras el aluvión en Las Condes. *El Dínamo*. <https://www.eldinamo.cl/pais/2026/10/09/que-calles-estan-bloqueadas-y-por-cuales-se-puede-transitar-tras-el-aluvion-en-las-condes>
- Emol. (2026, 8 de octubre). «Inédito»: Se extiende la temporada de esquí y Valle Nevado operará hasta noviembre por primera vez en su historia. *Emol*. <https://www.emol.com/noticias/Economia/2026/10/08/1213613/centros-de-esqui-extienden-temporada.html>
- European Space Agency. (s. f.). *Copernicus DEM GLO-30: modelo digital de superficie global de 1 segundo de arco*. Copia pública en Amazon Web Services (copernicus-dem-30m). https://copernicus-dem-30m.s3.amazonaws.com/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM.tif (Tesela S34 W071, descargada el 9 de octubre de 2026)
- FLO-2D Software, Inc. (2021). FLO-2D pro reference manual [Manual de software informático]. https://documentation.flo-2d.com/Build21/flo-2d_pro/FLO-2D%20Pro%20Reference%20Manual%202021/index.html
- Gartner, J. E., Cannon, S. H., y Santi, P. M. (2014). Empirical models for predicting volumes of sediment deposited by debris flows and sediment-laden floods in the transverse ranges of southern California. *Engineering Geology*, 176, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.008>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., y Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hussain, E. (2021). *Survey over Santiago, Chile from 2014 SPOT imagery*. Distribuido por OpenTopography. <https://portal.opentopography.org/dataspace/dataset?opentopoID=OTDS.022021.32719.2> (CC BY 4.0)
- Interferencia. (2026, 9 de octubre). Aluvión en Las Condes: advertencias de Sernageomin, obras pendientes y una alerta que no pidió evacuar. *Interferencia*. <https://interferencia.cl/articulos/aluvion-en-las-condes-advertencias-de-sernageomin-obras-pendientes-y-una-alerta-que-no>
- La Tercera. (2026a, 1 de febrero). 11 viviendas anegadas en Las Condes tras temporal en la RM, mientras siguen labores de despeje en casas y quebradas. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/nacional/noticia/once-viviendas-anegadas-en-las-condes-tras-temporal-en-la-rm-mientras-continuan-labores-de-despeje-en-casas-y-quebradas/>
- La Tercera. (2026b, 8 de octubre). Desde San Carlos de Apoquindo hasta Pueblito Los Dominicos: informan zona más afectada por aluvión en Las Condes. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/nacional/noticia/desde-san-carlos-de-apoquindo-hasta-pueblito-los-dominicos-informan-zona-mas-afectada-por-aluvion-en-las-condes/>
- Mizuyama, T., Kobashi, S., y Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. En *Proceedings of the international symposium interpraevent* (Vol. 4, pp. 99–108). Bern, Switzerland. <https://www.interpraevent.at/en/proceeding/schutz-des-lebensraumes-vor-hochwasser-mu-ren-und-lawinen-1992>
- Municipalidad de Las Condes. (2026, 2 de enero). Incendio en San Carlos de Apoquindo ya está controlado. *Sitio web de la Municipalidad de Las Condes*. <https://www.lascondes.cl/incendio-en-san-carlos-de-apoquindo-ya-esta-controlado/>

- Neal, J., y Hawker, L. (2023). *FABDEM V1-2*. Conjunto de datos, University of Bristol. <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
- O'Brien, J. S., y Julien, P. Y. (1988). 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., y Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), 244–261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244))
- Radio La Señal. (2026, 8 de octubre). Clínica UAndes: «Toda la afectación fue en el exterior, no hubo inundaciones dentro». *Radio La Señal*. <https://radiolasenal.cl/clinica-uandes-toda-la-afectacion-fue-en-el-exterior-no-hubo-inundaciones-dentro/>
- Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., Sexton, J., y Davies, G. (2026). *ANUGA: a hydrodynamic modelling package*. Versión 4.0.1, paquete de Python publicado en PyPI el 17 de septiembre de 2026. <https://pypi.org/project/anuga/4.0.1/> (Código fuente en https://github.com/anuga-community/anuga_core)
- Rojas Pérez, M. (2026). *El barro que arrasó San Carlos de Apoquindo bajó por una ladera quemada y encontró los colectores cerrados*. El Desconcierto. <https://eldesconcierto.cl/medio-ambiente/el-barro-que-arraso-san-carlos-apoquindo-una-ladera-quemada-y-encontro-los-colectores-cerrados-n5462994> (9 de octubre de 2026)
- Schubert, J. E., y Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2026). *Reporte técnico de remoción en masa Metropolitana 02/2026: flujo de detritos en las quebradas La Honda, Grande, Los Almendros y Apoquindo, comuna de Las Condes* (Inf. Téc.). SERNAGEOMIN. https://services1.arcgis.com/OyjjvVdFTl5hfSdX3/arcgis/rest/services/minutasATG_Flash/FeatureServer/0/232/attachments/349 (Evento del 31 de enero de 2026; elaborado el 11 de febrero de 2026)
- T13. (2026, 10 de octubre). Las contradicciones tras el aluvión en Las Condes: ¿estaban instaladas las mallas de contención o no? *T13*. <https://www.t13.cl/noticia/nacional/las-contradicciones-tras-aluvion-las-condes-estaban-instaladas-las-mallas-conte-10-10-2026>
- The Clinic. (2026, 8 de octubre). Aluvión afecta a Las Condes en medio de intenso sistema frontal: fuerte corriente arrastró autos por San Carlos de Apoquindo. *The Clinic*. <https://www.theclinic.cl/2026/10/08/aluvion-afecta-a-las-condes-en-medio-de-intenso-sistema-frontal/>
- Wikipedia. (2026). *Aluvión de Las Condes de 2026*. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Aluvi%C3%B3n_de_Las_Condes_de_2026 (Versiones consultadas el 9 y el 10 de octubre de 2026)
- Zippenfenig, P. (2023). *Open-meteo.com weather API*. Zenodo. (Datos de pronóstico histórico y reanálisis ERA5 consultados el 10 de octubre de 2026) <https://doi.org/10.5281/zenodo.7970649>