

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DE
SISTEMAS FLUVIALES MEDIANTE EL USO DE DRON**

ALEX GARCES C.¹
ALBERT CABRÉ²
GERMAN AGUILAR M.³
ALDO TAMBURRINO T.⁴
SANTIAGO MONTSERRAT M.⁵

RESUMEN

Los flujos aluvionales son fenómenos capaces de modificar abruptamente la geomorfología de ríos y quebradas. Estos flujos se caracterizan por erosionar, transportar y depositar grandes cantidades de sedimento. Por otra parte, el uso de drones ha permitido que la aerofotogrametría se vuelva muy accesible, facilitando el levantamiento de topografías con bajo costo. Por medio de la diferencia de topografías secuenciales de alta resolución y precisión, la estimación de volúmenes depositados y erosionados se puede realizar con gran detalle. En el presente trabajo se presentan tres casos de estudio en quebradas ubicadas en la cuenca alta del río Huasco donde se aplicó esta técnica para estimar volúmenes de erosión/depositación y área afectada. Finalmente se concluye acerca de las ventajas de esta técnica de medición para estimar la variación topográfica antes y después del evento aluvional y su incertidumbre asociada.

¹ Estudiante de doctorado, Departamento de Ingeniería Civil e Investigador. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: agarces@uchile.cl

² Investigador. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: acabrec@gmail.com

³ Investigador Asociado. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: german.aguilars@amtc.cl

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

⁵ Investigador Asociado. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile. – email: santiago.montserrat@amtc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los flujos aluvionales generados durante eventos extremos de precipitación son importantes gestores de la evolución morfológica del sistema fluvial (Aguilar et al., 2020). Estos eventos se vuelven de interés cuando ocurren en zonas pobladas o de tránsito ya que impactan directamente la infraestructura pública y privada. Si bien en Chile estos eventos son recurrentes en la cordillera de los Andes, su caracterización se ha limitado a descripciones cualitativas o la estimación de volúmenes de sedimento a partir de mediciones puntuales (Aguilar et al., 2020). Los registros topográficos secuenciales, en cambio, permiten caracterizar cambios morfológicos a través de las diferencias de modelos de elevación digital (DoD, por sus siglas en inglés: *DEMs of Difference*). Esta técnica ha sido utilizada en múltiples áreas de investigación como, por ejemplo, la evolución de una mina a rajo abierto (Xiang et al., 2018), evolución morfológica de glaciares (Westoby, et al. 2020), transporte de madera en sistemas fluviales (Sanhueza et al., 2019) caracterización de la erosión en ambientes montañosos (Iroumé, et.al. 2018; Cavalli et al., 2017).

Con la masificación de los drones y su capacidad de levantar topografías, la técnica DoD se ha vuelto más atractiva debido a su menor costo. Además, el uso de dron permite una mayor capacidad de reacción a los eventos dado su menor complejidad comparado con técnicas topográficas tradicionales.

En este estudio se presenta la técnica DoD aplicada a la caracterización de cambios morfológicos debido a flujos aluvionales que erosionan, transportan y depositan importantes cantidades de sedimento. La disponibilidad de topografías secuenciales, es decir, pre y post evento, permiten conocer los volúmenes de depósito/erosión y su distribución espacial. Sin embargo, conjuntos de registros secuenciales son escasos en el mundo y en especial en Chile. Por ello, la principal dificultad para caracterizar cambios morfológicos a través de la diferencia de DEMs (*Digital Elevation Model*) es la disponibilidad de topografía previa al evento. Debido a variaciones en la susceptibilidad de eventos aluvionales de quebradas vecinas (Aguilar et.al., 2020), resulta difícil predecir cual quebrada será la próxima en generar aluviones bajo un cierto evento de precipitación. Lo anterior dificulta la obtención de topografías pre-evento, ya que se debe levantar topografía de múltiples quebradas para lograr capturar los cambios morfológicos de al menos una.

Luego de los eventos aluvionales ocurridos en 2015 en la parte alta del valle de Huasco, la Dirección de Obras Hidráulicas solicitó un estudio de obras de control aluvional. En enero de 2017, IDIEM (2019) levantó una topografía de más de 100 kilómetros de valle, incluidos los principales conos aluvionales. Por otra parte, en mayo de 2017 y enero de 2020, nuevos eventos aluvionales ocurrieron en la misma zona. La disponibilidad de topografía previa de alta resolución motivó la presente investigación, en la cual se realizaron campañas de terreno posteriores a ambos eventos. El presente estudio describe el trabajo de terreno realizado, el procesamiento de la información y los resultados de la caracterización morfológica por medio de la diferencia de modelos de elevación digital. Finalmente se concluye acerca de la

importancia de estos registros secuenciales y su utilidad para el estudio cuantitativo de la evolución morfológica debido a flujos aluvionales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Los aluviones ocurridos el 25 de marzo de 2015, generaron flujos de detritos en casi toda la región de Atacama. En particular para la provincia de Huasco, los aluviones se concentraron en la parte alta de su cuenca, aguas arriba del embalse Santa Juana (Figura 1). Los importantes daños y efectos que estos aluviones generaron sobre la población motivaron la generación de un estudio de diseño de obras de control aluvional en la zona (IDIEM, 2019). Para este estudio se levantaron topografías de los valles del río El Carmen (58 km) y El Tránsito (51 km) incluidos los conos aluvionales de las principales quebradas. La resolución de esta topografía es de 1 m/píxel en toda su extensión. Ambos ríos se presentan en la Figura 1. La topografía levantada por IDIEM (2019) ha sido muy útil como topografía base (pre-evento) gracias a su extensión y gran cantidad de conos aluvionales registrados.

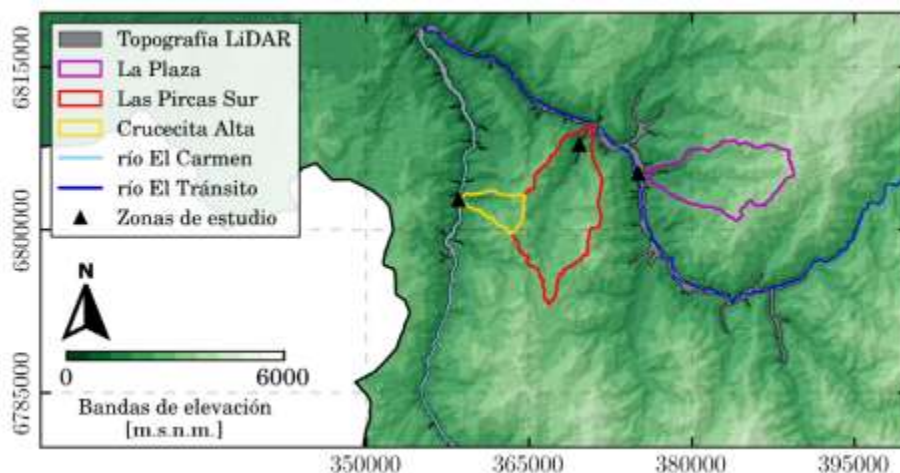


Figura 1. Zona de Estudio. El polígono gris denota el área de la topografía LiDAR levantada. Los polígonos de colores describen las cuencas estudiadas mientras que los triángulos negros presentan las zonas específicas donde se levantó topografía post-evento.

En mayo de 2017, un evento de precipitación afectó los valles de El Tránsito y El Carmen y generó nuevos flujos aluvionales en la zona con topografía disponible. Este evento de precipitaciones marcó un total de 188 mm caídos en la zona con intensidades de hasta 6.7 mm/h. Luego de este evento, se seleccionaron dos quebradas para levantar topografía post evento. La primera es Crucecita Alta, una cuenca con 13 km² de área. En el evento aluvional de 2015, el cono aluvional de Crucecita Alta sufrió una incisión que conectó su ápice con el punto de confluencia con el río. En 2017, esta incisión actuó como canal y permitió la conducción de los flujos desde la quebrada al río. Por otra parte, en el valle de El Tránsito, se levantó la topografía de la quebrada Las Pircas Sur. Esta quebrada tiene 74.4 km² donde, posterior al evento de 2015, se excavaron piscinas de retención de sedimentos, las cuales ayudaron en gran medida a evitar que los flujos aluvionales de 2017 llegaran al río El Tránsito.

En enero de 2020 ocurrió una tormenta en el valle del río El Tránsito. Las precipitaciones alcanzaron una intensidad de hasta 16 mm en 45 minutos y ocurrieron en una zona muy acotada junto a la localidad de El Tránsito. Los flujos de detritos originados en estas cuencas tributarias al río se depositaron a lo largo de la localidad generando importantes daños a la infraestructura pública y privada. De las quebradas aluvionadas destaca La Plaza, la cual posee una cuenca de 60.5 km². La quebrada deposita sus flujos en un abanico aluvional altamente antropizado y se caracteriza por dos subcuencas al sur que depositan sus efluentes directamente en el cono aluvional. Estas subcuencas tienen áreas de 0.7km² y 2.5km² y también se activaron durante el evento.

3. METODOLOGÍA

3.1 Trabajo de Terreno

La técnica de levantamiento topográfico por medio de fotos aéreas se conoce como aerofotogrametría. Este estudio realizó la aerofotogrametría por medio de un vehículo aéreo no tripulado (dron). La ruta de vuelo considera: (1) altura de vuelo, (2) traslape de las imágenes y (3) duración del vuelo. El vuelo dron puede ser realizado manualmente, pero es recomendado hacerlo con un software que programe el plan de vuelo. La altura de vuelo define la resolución espacial de las imágenes y por lo tanto el tamaño físico de cada píxel. La altura en un plan de vuelo programado puede ser a cota constante o a una altura respecto del suelo constante. La segunda opción es mejor ya que permite una resolución homogénea de la superficie terrestre. Sin embargo, esta opción requiere que el software utilizado para programar el plan de vuelo sea capaz de descargar una topografía previa (p. ej. SRTM 30 m/píxel) y calcular la cota a lo largo de la ruta. Por otra parte, un mayor traslape de las fotos permite una mejor triangulación de los desniveles. A mayor traslape, se tendrá una mejor definición de los objetos tridimensionales (p. ej. vegetación). La duración y cantidad de baterías disponibles limita el tiempo máximo de vuelo, por lo que es necesario elegir la combinación apropiada entre resolución, área a levantar y tiempo de vuelo disponible.

El dron utilizado, DJI Phantom 4 Pro, posee una antena GPS convencional cuya precisión es de ± 5 m. Por esta razón es necesario georreferenciar el modelo de elevación digital por medio de puntos de control terrestre los cuales son medidos por medio de un GPS diferencial. El GPS diferencial utilizado consta de dos antenas Trimble R4 (Figura 2.a y b), las cuales en modo RTK (Real Time Kinematik), logran una incertidumbre de su posición absoluta de 0.01 m y 0.03 m en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente. Los puntos de control corresponden a banderas pintadas las cuales son fácilmente identificables en las imágenes adquiridas por el dron (Figura 2.c).

Una vez ocurrido el evento, se hacen enormes esfuerzos por restaurar la conectividad de la zona. Es por esto que en algunos casos, el depósito sobre las calles es removido previo al levantamiento topográfico. En tales zonas, se estima la profundidad del depósito por medio de marcas que el flujo haya dejado en paredes y/u otros obstáculos (Figura 2.d).



Figura 2. Trabajo de terreno. La georreferenciación de puntos de control se lleva a cabo con un GPS diferencial que consta de 2 antenas: (a) estación base y (b) estación móvil. (c) banderas que se identifican en las imágenes adquiridas por el vuelo dron. Estas banderas facilitan la georreferenciación del modelo de elevación digital. (d) medición de la altura de escurrimiento y depósito basado en marcas en paredes.

3.2 Procesamiento de la información de terreno.

La aerofotogrametría triangula la posición de un punto específico por medio de la correlación de varias fotos y la posición de origen de cada foto, de manera similar a como una antena GPS triangula su ubicación respecto a una constelación de satélites. El programa utilizado es Agisoft PhotoScan, el cual permite incorporar las imágenes y crear un mosaico de estas. Luego, la ubicación de los puntos de control se define identificando en cada foto las banderas puestas en terreno y sus coordenadas GPS son importadas. Este programa permite además filtrar la nube de puntos por color y características topográficas, lo cual resulta muy útil para eliminar construcciones y vegetación poco densa. Sin embargo, vegetación espesa o de grandes extensiones resulta en una pérdida de información que difícilmente puede ser recuperada. En este sentido, las quebradas de la zona centro-norte de Chile son adecuadas para la aerofotogrametría dada la escasa vegetación existente.

El resultado del procesamiento de imágenes consiste en una densa nube de puntos que puede ser transformada, por ejemplo, a un mapa ráster (DEM). En la Figura 3 se presenta la distribución de imágenes adquiridas por el dron sobre la nube de puntos resultante. La distribución homogénea de imágenes se debe a la utilización de un software que automatiza el vuelo y la adquisición de datos.



Figura 3. Nube de puntos densa generada por Agisoft PhotoScan. Los rectángulos azules corresponden a la ubicación del dron al momento de adquirir cada imagen.

3.3 DoD – Diferencia de DEMs

Si bien los DEMs son georeferenciados con precisión centimétrica, estos deben ser alineados previo a su diferencia para obtener resultados óptimos. Este procedimiento se conoce como corrección. Shean et al. (2010) desarrollaron una herramienta llamada *demcoreg*, originalmente para la corrección de imágenes satelitales, y demostraron que una simple traslación reduce el error absoluto en la horizontal y vertical del DoD. La alineación se lleva a cabo identificando zonas de cambio topográfico nulo y trasladando uno de los DEM hasta reducir al máximo las variaciones en esta zona (reducción del ruido). Las zonas de cambio topográfico nulo son aquellas que no sufrieron cambios entre ambos levantamientos topográficos. Sin embargo, pueden existir variaciones en las zonas de cambio topográfico nulo como, por ejemplo, variaciones en la presencia o tamaño de la vegetación. Una vez alineados, *demcoreg* resta los DEMs y entrega el DoD como resultado final.

Para evaluar la incertidumbre asociada al DoD, se estiman el error aleatorio y la propagación del error. La desviación absoluta media normalizada, que es una métrica del error aleatorio, se obtiene directamente de la herramienta *demcoreg*. Esta métrica resulta muy útil para identificar el ruido presente en zonas de cambio topográfico nulo. Si las topografías se encuentran muy espaciadas en el tiempo, es posible que la vegetación del lugar haya cambiado, dificultando la corrección de las topografías. La propagación del error, en cambio, sigue su procedimiento clásico. Dado que cada DEM tiene su propio error σ_i , $i = 1, 2$, el error asociado a su diferencia corresponde a $\sigma_{DoD} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. En consecuencia, la propagación de error solo indica el nivel de precisión del DoD sin considerar factores externos que afecten en la calidad del DoD. El análisis de incertidumbre y el análisis de errores son esenciales para determinar el umbral de detección mínima que distingue entre cambios topográficos detectables y ruido (Cavalli et al., 2016).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Crucecita Alta 2017

El DEM obtenido por la aerofotogrametría tiene un área de 0.14 km². El dron se voló a cota constante e igual a 1157 msnm mientras que las cotas de los puntos de control van de 1061.7 msnm a 1113.7 msnm, es decir, la altura de vuelo promedio respecto del suelo es de 70 m y la resolución de las imágenes es variable. A pesar de esto, la diferencia entre las cotas mínima y máxima del área de interés es 80 m, por lo que las variaciones de resolución son admisibles. La resolución del ortomosaico resultante es de 2.7 cm/píxel. La densidad de la nube de puntos es de 83.8 puntos/m² y la resolución del mapa de elevación digital es de 11 cm/píxel. La diferencia de los DEMs (DoD), correspondientes a la topografía LIDAR de 2017 y la topografía generada por el vuelo dron, permite identificar el depósito generado (Figura 4).

Gracias a los 12 puntos de control homogéneamente distribuidos en la zona, se obtuvo una raíz de error cuadrático medio (RMSE) de $\sigma_2 = 0.16$ m. Por otra parte, el error de la topografía LiDAR 2017 es igual a $\sigma_1 = 0.07$ m. Por lo tanto, el DoD generado tiene asociada una propagación del error de $\sigma_{DOD} = 0.17$ m, en el eje vertical. Por otra parte, el procesamiento de alineación de las topografías pre- y post-evento, utilizando *demcoreg*, indica que el error aleatorio se reduce de 0.23 m y de 0.15 m, en el eje vertical. Esta reducción del error aleatorio deja en evidencia la importancia de la corrección (*demcoreg*) para lograr que el umbral mínimo de detección sea lo más pequeño posible. Debido a que el error de la propagación de errores y el error aleatorio son del mismo orden, se define como umbral mínimo de detección 0.2 m.

El depósito es caracterizado en bandas de profundidad (erosión y depositación) en la Figura 4. Sin embargo, el umbral mínimo de detección da origen al intervalo $[-0.2, 0.2]$ m dentro del cual el cambio topográfico es incierto. Debido a esta limitación, el punto de cambio topográfico nulo se encuentra dentro del intervalo $[-0.2, 0.2]$ m, lo cual genera un rango para la estimación de volúmenes depositado y erosionado. Si el cambio topográfico nulo se encuentra en -0.2 m, se obtiene un volumen de depósito de 16772 m³ y un volumen de sedimento erosionado de 9833 m³. Por el contrario, si el cambio topográfico nulo se encuentra en 0.2 m, se obtiene un volumen de depósito de 11871 m³ y un volumen de sedimento erosionado de 14665 m³. En consecuencia, el rango del volumen depositado corresponde a $[11.9, 16.8] \times 10^3$ m³ y el rango de volumen erosionado corresponde a $[9.8, 14.7] \times 10^3$ m³. Estos volúmenes sólo consideran los píxeles dentro del margen delimitado por el polígono negro de la Figura 4, ya que el resto del abanico no fue afectado por el evento, lo cual fue confirmado por la inspección en terreno.

Durante el evento de 2017, La quebrada Crucecita sufrió erosión de los taludes de su canal, pero una depositación en el eje central. En el cauce original del río El Carmen, un depósito de hasta 6 metros de altura empuja al escurrimiento hacia la zona opuesta del valle, generando una erosión adyacente de hasta 6 metros. Al pie del cono aluvional, el cauce original del río El Carmen es finalmente bloqueado por lo que el escurrimiento debe encontrar un nuevo

camino el cual se identifica en la Figura 4 como una zona en rojo debido a la erosión generada.

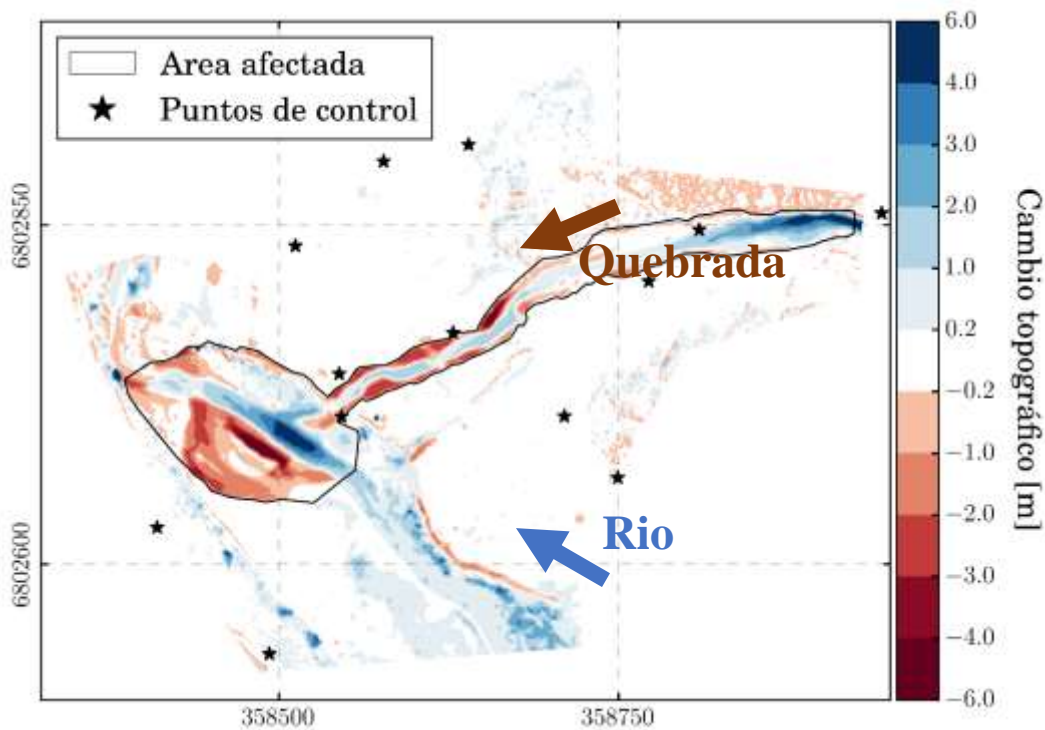


Figura 4. DoD de la Quebrada Crucecita para el evento de mayo 2017. En este ejemplo destaca el ensanche del canal que une el ápice con la confluencia y la avulsión del río El Carmen debido a la obstrucción que genera el depósito de los sedimentos provenientes de la quebrada.

4.2 Las Pircas Sur 2017

En el caso de las Pircas, el plan de vuelo también se realizó a cota constante e igual a 1391.5 msnm mientras que la cota de los puntos de control va de 1181 msnm a 1279 msnm. La altura de vuelo promedio respecto del cauce principal es 161.5 m. Siguiendo el mismo procedimiento que en Crucecita Alta 2017, el nivel mínimo de detección para Las Pircas 2017 corresponde a [-0.5,0.5] m. El aumento en el valor del umbral mínimo de detección se debe a una inapropiada distribución de los puntos de control terrestre (Figura 5). Estos puntos de control se situaron en el cauce principal debido a que la pendiente de las laderas del cauce va de los 0.5m/m hasta los 2.2m/m. Es sabido que cuando los puntos de control terrestre no se encuentran en los extremos del modelo de elevación digital, se genera un efecto cuenco que deforma la topografía fuera de la zona con puntos de control. En la Figura 5 se observa que una porción de la ladera oriente indica una variación de topografía en el rango [-0.5,-1.0] m. Esto es claramente un error al no poseer puntos de control en dicha zona.

Considerando este umbral de detección, el rango de volumen depositado es $[33.9,59.0] \times 10^3$ m³ mientras que el rango de volumen erosionado es de $[30.0,47.8] \times 10^3$ m³. Estos volúmenes solo consideran los cambios topográficos dentro del área afectada en la Figura 5.

El evento ocurrido en Las Pircas Sur corresponde a un flujo aluvional que se mantuvo dentro de los márgenes del cauce. El cauce fue ensanchado por erosión lateral la cual se destaca por las bandas de cambio topográfico rojas (Figura 5). Por otra parte, el eje del cauce aumentó su cota de fondo lo cual es destacado por las bandas de cambio topográfico azules. El depósito generalizado a lo largo del cauce se debe en gran medida a las piscinas de retención construidas en él. En el mapa DoD, se observa un aumento local de la profundidad del depósito en la zona de las piscinas. Sin embargo, el depósito generado producto de la presencia de la piscina norte va perdiendo profundidad hacia aguas arriba dejando en evidencia que su control sobre el depósito es limitado.

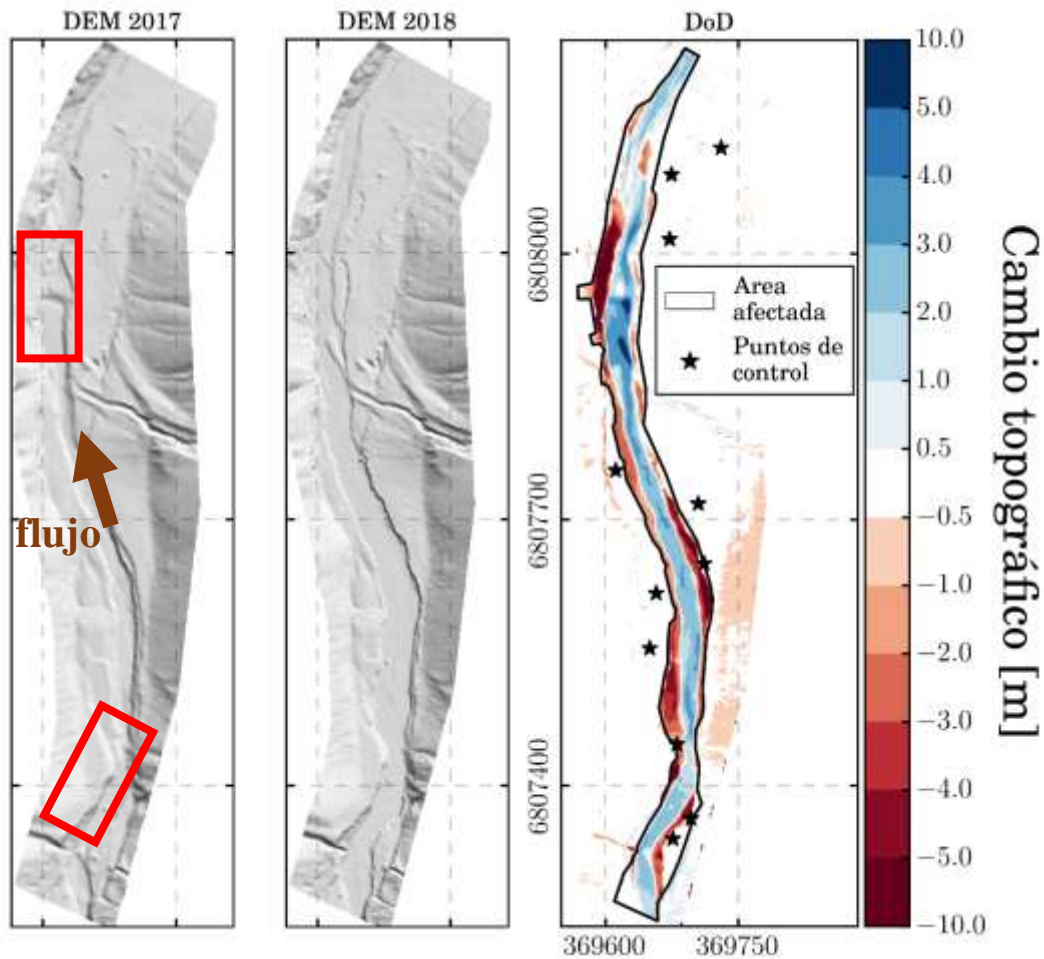


Figura 5. DoD del evento Las Pircas Sur 2017. El cambio topográfico debido a los depósitos generados por flujos aluvionales se presenta en bandas de erosión/depositación. Dos piscinas de retención construidas posterior al evento de 2015 son destacadas en rectángulos rojos. Estas piscinas evitaron que los flujos llegaran a la confluencia con río El Tránsito. La dirección del flujo se indica con una flecha café.

4.3 La Plaza 2020

El vuelo dron realizado logró generar un mapa de elevación digital de 4.52 km². A diferencia de los casos anteriores, el plan de vuelo consideró la topografía satelital SRTM (30 m/píxel) para volar a una altura constante respecto al suelo e igual a 160 m. Esto representa una mejora respecto de los casos anteriores ya que el tamaño físico del píxel, de 4 cm, es homogéneo en toda el área cubierta. La nube de puntos resultante de la aerofotogrametría tiene una densidad de 39.3 puntos/m² y fue convertida a un modelo de elevación digital de 16cm x 16cm. Además, gracias a los 18 puntos de control homogéneamente distribuidos en la zona, se obtuvo una raíz de error cuadrático medio (RMSE) de $\sigma_2 = 0.07$ m. El error para el DEM LiDAR, $\sigma_1 = 0.07$ m, implica que $\sigma_{DOD} = 0.1$ m. Por otra parte, La desviación absoluta media normalizada previo al procedimiento de corrección es de 0.37 m y de 0.32 m después de aplicado el procedimiento. La propagación del error es mucho menor que el error aleatorio, por lo que la mayor fuente de incertidumbre es la vegetación presente en el área levantada. Si bien algoritmos de eliminación de vegetación y edificaciones fueron utilizados, las grandes extensiones de cultivos parronales impiden una correcta recuperación de la cota de terreno. El nivel mínimo de umbral de detección se estableció en 0.3 m. En consecuencia, el rango del volumen depositado corresponde a $[45.7,167.6] \times 10^3$ m³ y el rango de volumen erosionado corresponde a $[12.8,83.9] \times 10^3$ m³.

Debido a que el levantamiento topográfico se realizó 10 días después de ocurrido el aluvión, las calles y parte del depósito fueron removidos al momento del levantamiento. Las zonas donde hubo remoción del depósito al momento de la aerofotogrametría son identificadas en la Figura 6 por medio de polígonos coloreados. Para recuperar el volumen de depósito de dichas zonas, se levantaron puntos GPS de la profundidad del depósito basado en las marcas observables en paredes de edificaciones y postes (Figura 2.d). El volumen de depósito estimado para dichas zonas asciende a 40010 m³.

En la Figura 6, la flecha café indica la descarga de la subcuenca principal (57 km²) de quebrada La Plaza, mientras que la flecha roja indica la descarga de una subcuenca menor (0.7 km²). La subcuenca menor generó flujos aluvionales viscosos que facilitaron la conducción de los flujos provenientes de la subcuenca principal hacia la rama norte del depósito. Esta configuración fue muy desfavorable debido a que la rama norte de los flujos fue la principal responsable de los daños producidos en el poblado de El Tránsito. El canal de conducción de crecidas, ubicado en la rama norte del depósito, fue incapaz de conducir la enorme cantidad de barro que recibió y, en consecuencia, se desbordó. El problema asociado a este desborde es que, al llegar al río, una defensa fluvial que protege al poblado de posibles crecidas del río, evitó que los flujos de barro provenientes de La Plaza descargaran en el río. Finalmente, la defensa fluvial desvió los flujos obligándolos a escurrir por la calle principal del poblado de El Tránsito (Figura 6.a). En este sentido, si bien la defensa fluvial es una buena manera de proteger el poblado de El Tránsito de posibles crecidas del río, en este caso influyó negativamente aumentando la profundidad de depósito de barro en el poblado.

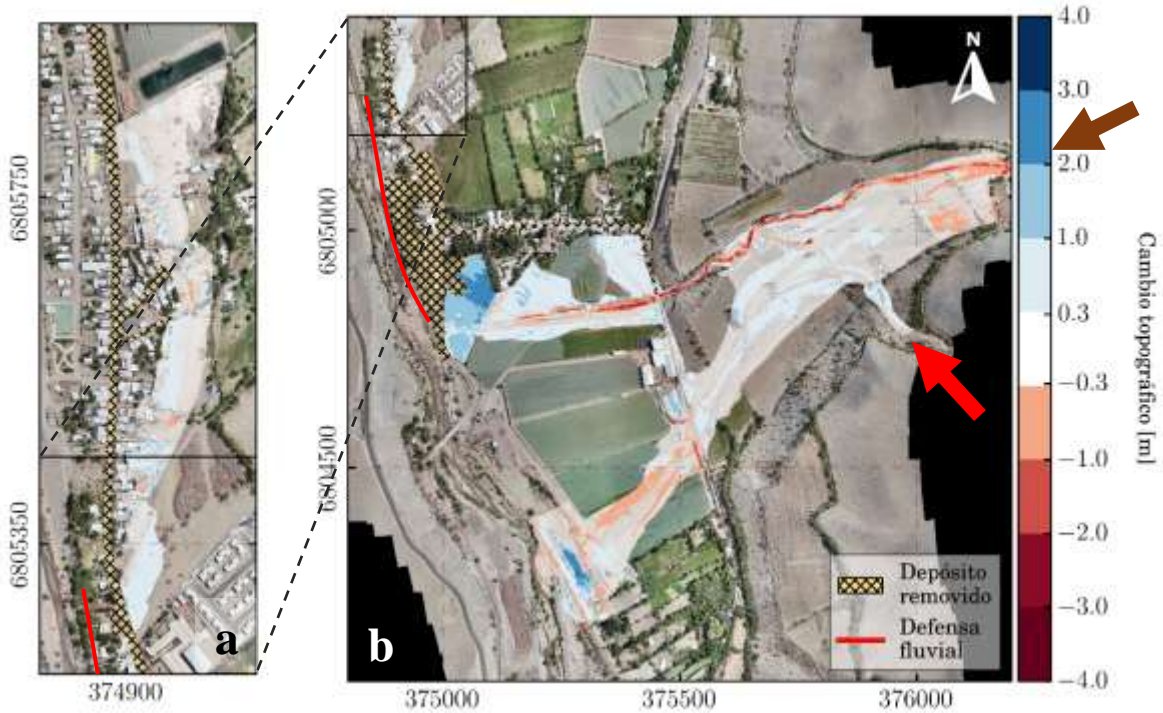


Figura 6. DoD del evento La Plaza 2020. (a) Zona del poblado El Tránsito. (b) Cono aluvional de la quebrada La Plaza. En ambas figuras, el cambio topográfico debido a los depósitos generados por flujos aluvionales se presenta en bandas de erosión/depositación. Las zonas donde el depósito fue removido previo al levantamiento topográfico son identificadas por medio de un polígono achurado.

5. DISCUSIÓN

Las características de cada vuelo dron varían dependiendo de las particularidades de la zona a levantar. En la Tabla 1 se comparan las características de los 3 vuelos realizados en esta investigación. Si se comparan las resoluciones espaciales de Crucecita Alta y Las Pircas, se tiene que la resolución espacial se reduce en casi 4 veces debido a sus alturas de vuelo. A pesar de que la altura promedio respecto del suelo de los vuelos en Las Pircas y La Plaza son prácticamente idénticos, la capacidad del plan de vuelo de seguir una topografía aproximada resulta en una mejor resolución del mapa de elevación digital para La Plaza.

Tabla 1. Principales características de la aerofotogrametría realizada en las zonas de estudio.

Quebrada	Tipo de vuelo	Altura de vuelo promedio [m]	Área cubierta [km ²]	Resolución espacial [m]	Nº puntos de control	σ_2 (RMSE) [m]
Crucecita Alta 2017	Cota constante	70.0	0.14	0.11	13	0.16
Las Pircas 2017	Cota constante	161.5	0.20	0.20	11	0.5

La Plaza 2020	Altura constante	160.0	4.52	0.16	28	0.07
---------------	------------------	-------	------	------	----	------

En la Tabla 2 se observa que el error aleatorio es muy similar a la propagación de errores para los casos de Crucecita Alta y Las Pircas. Para el caso de La Plaza, en cambio, el error de la propagación de errores es menor al error aleatorio. Una explicación para esto es que la topografía pre-evento corresponde a un levantamiento realizado el 2017, es decir, 3 años antes del evento. Las zonas utilizadas como cambio topográfico nulo pudieron haber tenido variaciones como por ejemplo crecimiento de su vegetación. Las variaciones indeseadas en las zonas de cambio topográfico nulo afectan directamente en el procedimiento de corrección y, en consecuencia, en el error aleatorio determinado por *demcoreg*.

Tabla 2. Incertidumbre y umbrales mínimos de detección de la técnica DoD

Quebrada	Error aleatorio	Propagación de errores	Umbral mínimo de detección
Crucecita Alta 2017	0.15	0.17	0.2
Las Pircas 2017	0.46	0.50	0.5
La Plaza 2020	0.32	0.1	0.32

El umbral mínimo de detección de cambios topográficos resulta en una incertidumbre sobre las estimaciones de volúmenes de depósito y erosión. Esta incertidumbre es cuantificada en la Tabla 3. Las columnas “Volumen depositado” y “Volumen erosionado” corresponden a los valores estimados suponiendo que los DoD no poseen error. Por otra parte, los valores mínimos y máximos corresponden a los rangos detallados en cada caso presentado. Si bien los DEMs fueron generados con precisión centimétrica, se observa que las incertidumbres pueden llegar a ser considerables.

A pesar de que el umbral mínimo de detección de La Plaza es menor que el umbral de Las Pircas, la incertidumbre sobre los volúmenes de la Plaza es mayor al de Las Pircas. Lo anterior se explica por la morfología de cada zona. Las Pircas corresponde a un flujo canalizado con variaciones de altura varias veces superior al umbral. La Plaza, en cambio, corresponde a un cono aluvional donde el flujo se dispersa reduciendo su profundidad. Las bajas alturas, cercanas al umbral de detección, afectan directamente sobre la incertidumbre de la cuantificación del depósito.

Tabla 3. Incertidumbre de la estimación de volúmenes de depósito y erosión.

Quebrada	Volumen depositado [10 ³ m ³]	Volumen depositado mín [10 ³ m ³]	Volumen depositado máx [10 ³ m ³]	Volumen erosionado [10 ³ m ³]	Volumen erosionado mín [10 ³ m ³]	Volumen erosionado máx [10 ³ m ³]
Crucecita Alta 2017	13.8	11.9 (-14%)	16.8 (+21%)	11.7	9.8 (-16%)	14.7 (+26%)

Las Pircas 2017	43.8	33.9 (-23%)	59.0 (+34%)	36.7	30.0 (-18%)	47.8 (+30%)
La Plaza 2020	91.8	45.7 (-50%)	167.6 (+83%)	33.5	12.8 (-62%)	83.9 (+151%)

6. COMANTARIOS Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología para la estimación de volúmenes de sedimento movilizados y cambios morfológicos asociados a eventos aluvionales utilizando la técnica de aerofotogrametría con dron y DoD. Las resoluciones espaciales alcanzadas por las topografías (~10 cm/píxel) son considerablemente superiores a las metodologías tradicionales donde el depósito es inferido de calicatas puntuales. Mas aún, la incertidumbre asociada a la estimación de volúmenes de sedimento puede ser cuantificada (Tabla 3).

Registros como los presentados aquí son claves para entender la transferencia de sedimentos en un sistema fluvial durante eventos aluvionales. Ser capaces de estimar los volúmenes de sedimento depositados con baja incertidumbre y su distribución en la zona de interés resulta muy útil para entender lo ocurrido y, también, para el dimensionamiento de futuras obras de control aluvional.

La curva de aprendizaje en estos trabajos de terreno es evidente al comparar los registros de los eventos 2017 y 2020. El error (RMSE) logrado en La Plaza 2020, igual a 0.07 m, es considerablemente menor a los errores de las otras dos topografías (0.17 m y 0.5 m).

Si bien el error de medición alcanzado en La Plaza 2020 de $\sigma_2 = 0.07$ m es bajo, el error aleatorio, asociado principalmente a la vegetación, impone una limitante a las capacidades de esta técnica. En este sentido, algoritmos de eliminación de vegetación inciden directamente en la disminución de la incertidumbre. Cuando la vegetación es demasiado densa, los algoritmos de vegetación son incapaces de recuperar la topografía. Si esto sucede, se recomienda usar otra técnica de levantamiento topográfico, como por ejemplo el escaneo LiDAR. Esta técnica fue utilizada para la generación de la topografía pre-evento. La principal ventaja del escaneo Lidar es que el láser es capaz de detectar más de un retorno del haz. El primer retorno del haz está asociado al primer obstáculo que el láser detecta mientras que los retornos posteriores penetran en la vegetación. La principal desventaja del escaneo LiDAR es su elevado costo respecto de la aerofotogrametría.

Para el caso de Crucecita Alta, la técnica DoD demuestra su utilidad para estudiar el volumen necesario para generar avulsiones del río. En el evento de mayo de 2017, no se observa una obstrucción del río ya que no se evidencia un depósito aguas arriba de la confluencia. Sin embargo, la depositación al pie del cono aluvional fue suficiente para generar una avulsión del río.

Para el caso de Las Pircas, esta técnica de medición demuestra su utilidad para estudiar el efecto de las piscinas de retención. En este estudio se observa que las piscinas trabajaron correctamente aumentando el volumen depositado en una zona de transferencia de sedimentos. Sin embargo, el volumen depositado no alcanza siquiera a ser el doble del volumen erosionado en el mismo tramo. Esto indica que las piscinas son pequeñas en comparación con los volúmenes de sedimento que flujos aluvionales en la quebrada Las Pircas son capaces de erosionar y transportar. En conclusión, la técnica DoD permite tener una idea de los volúmenes que se deben considerar para futuras obras en la quebrada Las Pircas.

Para el caso de La Plaza, a pesar de poseer topografías de precisión centimétrica, el rango de volúmenes depositados es amplio (Tabla 3). A pesar de este inconveniente, la técnica DoD demostró su utilidad para entender la distribución espacial de los depósitos, cómo los flujos de varias quebradas interactúan y cómo los depósitos pueden verse afectados por obras como la defensa fluvial que evitó su descarga en el río.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al centro investigación para la minería, AMTC, al centro de investigación, desarrollo e innovación de estructuras y materiales, IDIEM, a la dirección de obras hidráulicas (DOH) del ministerio de obras públicas (MOP) y al proyecto ANID-PIA AFB180004. El primer autor agradece además la beca de Doctorado en Chile CONICYT-PCHA/DoctoradoNacional/2019 - 21191593.

REFERENCIAS

Aguilar, G., Cabré, A., Fredes, V., & Villela, B. (2020). Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1247-1265.

Cavalli, M., Goldin, B., Comiti, F., Brardinoni, F., & Marchi, L. (2017). Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. *Geomorphology*, 291, 4-16.

Investigación, desarrollo e innovación de Estructuras y Materiales - IDIEM (2019). Diseño de Obras fluviales y de control aluvional. Cuenca del Río El Carmen y Río El Tránsito.

Iroumé, A., E. Jaramillo, R. Batalla y H. Ulloa (2018) observaciones iniciales sobre la respuesta fluvial en la morfología y ecología del río blanco-este (sur de Chile) luego de una erupción volcánica. II Congreso Chileno de Ingeniería Ambiental en Sistemas Acuáticos (CChIASA). 3-5 Octubre, Santiago.

Sanhueza, D., Picco, L., Ruiz-Villanueva, V., Iroumé, A., Ulloa, H., & Barrientos, G. (2019). Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion. *Geomorphology*, 345, 106837.

Shean, D. E., Alexandrov, O., Moratto, Z. M., Smith, B. E., Joughin, I. R., Porter, C., & Morin, P. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 101-117.

Westoby, M. J., Rounce, D. R., Shaw, T. E., Fyffe, C. L., Moore, P. L., Stewart, R. L., & Brock, B. W. (2020). Geomorphological evolution of a debris-covered glacier surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(14), 3431-3448.

Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y., & Tarolli, P. (2018). Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental earth sciences*, 77(6), 1-18.

