

CUANTIFICACIÓN Y MAPEO DE SEDIMENTO MOVILIZADO POR BARRIDO HIDRÁULICO EN EL MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO NORMANDÍA (ECUADOR) MEDIANTE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE.

QUANTIFICATION AND MAPPING OF FLUSHED SEDIMENTS IN THE PHYSICAL MODEL OF THE NORMANDIA HYDROELECTRIC PROJECT (ECUADOR) BY TERRESTRIAL LASER SCANNER.

APOLO, DARWIN¹; GUAMÁN, VERÓNICA¹; CRESPO, CRISTINA¹; PINOS, YESSENIA¹; PINEDA, NORMAN¹; MOROCHO, VILLIE²; ANGUISACA, MARCO³; ACOSTA, ENRIQUE¹

¹UNIVERSIDAD DE CUENCA, Dpto. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva Ciudadela, 010203 Cuenca, Ecuador. enrique.acosta@ucuenca.edu.ec, nine.darwin@gmail.com, veronica.guaman@ucuenca.ec, cristina.crespo@ucuenca.ec, yessenia.pinos@ucuenca.ec, norman.pineda@ucuenca.ec

²UNIVERSIDAD DE CUENCA, Dpto. de Ciencias de la Computación, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva Ciudadela, 010203 Cuenca, Ecuador. villie.morocho@ucuenca.edu.ec

³UNIVERSIDAD DE CUENCA, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), Av. 12 de Abril y Agustín Cueva Ciudadela, 010203 Cuenca, Ecuador. marco.anguisaca@ucuenca.edu.ec

Recibido: 29 de julio de 2017 / Aceptado: 16 de noviembre de 2017

RESUMEN

Los sedimentos que se acumulan en los embalses reducen año tras año su capacidad de almacenamiento útil y pueden generar problemas en ciertas obras de las centrales hidroeléctricas (obras de toma, túneles, turbinas). Existen diferentes tipos de métodos para la retirada de sedimento de los embalses. Uno de los más efectivos y económicos es el barrido hidráulico por desagüe de fondo (*flushing*). La efectividad de este proceso puede predecirse mediante modelos matemáticos y también puede medirse mediante sensores en experimentos a escala real o en modelos físicos a escala reducida. En el año 2018 está previsto que se construya el proyecto hidroeléctrico Normandía en el río Upano, en la provincia Morona Santiago, Ecuador. En este trabajo se ha analizado mediante escáner láser terrestre y CloudCompare los efectos de una maniobra de barrido hidráulico de sedimento en el modelo físico a escala 1:60 del proyecto, ubicado en el laboratorio de Hidrofísica de suelos de la Universidad de Cuenca. El sedimento evacuado del embalse a escala ha sido el equivalente en la realidad a 408 volquetas de 18 m³. El efecto del barrido hidráulico ha sido mayor en la cola del embalse, ya que es el sector donde más sedimento se acumuló durante el azolvamiento. En las proximidades de la presa los incrementos del nivel de sedimento han sido mucho menores.

Palabras Clave: Azolvamiento, barrido hidráulico, flushing, modelo físico, escala 1:60, proyecto hidroeléctrico Normandía, escáner láser terrestre, CloudCompare.

ABSTRACT

Sediments accumulated in reservoirs reduce their useful storage capacity every year and can cause problems in certain parts of hydroelectric plants (taking works, tunnels, turbines). There are different ways to remove sediments from reservoirs. One of the most effective and economical method is the hydraulic flushing. The effectiveness of this process can be predicted by mathematical models and can also be measured by sensors in real-scale experiments or in reduced scale physical models. In 2018, the Normandía hydroelectric project

is planned to be built on the Upano River, in the province of Morona Santiago, Ecuador. In this paper, we have analysed the effects of a hydraulic sediment flushing operation in the 1:60 scale physical model of the project, located in the soil hydrophysics laboratory of the University of Cuenca, by means of a terrestrial laser scanner and CloudCompare. The sediment evacuated from the physical model reservoir has been the equivalent in reality to 408 dump trucks of 18 m³. The effect of the hydraulic flushing has been greater in the tail of the reservoir, since this is the sector where more sediment was accumulated when adding sediments to the model. Around the dam sediment level variations have been much lower.

Keywords: Reservoir sedimentation, hydraulic flushing, physical model, scale 1:60, Normandía hydroelectric project, terrestrial laser scanner, CloudCompare.

INTRODUCCIÓN

Cuando se construye una presa en el lecho de un río, ésta actúa como una trampa de sedimentos. Una parte de los sólidos transportados por la corriente queda retenida en el embalse, disminuyendo así su capacidad de almacenamiento de agua. (Talebbeydokhti & Naghshineh, 2004) estiman que estos sedimentos reducen la capacidad de almacenamiento total de los embalses del mundo un 1% cada año. Esto equivale a unos 50 km³/año (Jiménez et al., 2005) o a tener que reconstruir anualmente 300 grandes represas a un costo estimado de 9.000 millones de US\$ para reemplazar la pérdida de almacenamiento mundial atribuible a la sedimentación (Annandale, 2011; Ji et al., 2011). Los sedimentos contribuyen a la eutrofización del agua embalsada pues actúan como sumidero para nutrientes (Ryding et al., 1992; Montero et al., 1998). Además, los sedimentos pueden bloquear obras de toma y dañar túneles o turbinas (Emamgholizadeh et al., 2005; Schlegel et al., 2010)

El lavado de sedimento de embalses se realiza en diferentes partes del mundo para contribuir en cierta medida a mantener el proceso natural del transporte de sedimento a lo largo de los ríos así como para conservar la capacidad de almacenamiento útil del embalse (Hu 1995, Lai & Shen 1996; Khan & Tingsanchali 2009) Existen diferentes tipos de métodos para combatir el azolvamiento de embalses. En general, estos métodos de lavado o remoción de sedimento de embalses se clasifican en dos grandes grupos: i) Los que necesitan energía externa (dragado hidráulico, dragado mecánico y dragado mixto) son costosos; y ii) los que no necesitan energía externa (barrido hidráulico, bypass, *sediment sluicing*, hidrosucción por tubería). Uno de los más efectivos y a la vez económico es el barrido hidráulico o *flushing* (Atkinson 1996; (b) Lai & Shen 1997; Dalby et al. 1999; Wen Shen 1999; Talebbeydokhti & Naghshineh 2004; Emamgholizadeh et al. 2005; Sumi 2008; Shahmirzadi-Meshkati et al. 2010)

La Predicción del barrido hidráulico suele llevarse a cabo mediante diferentes tipos de modelos matemáticos (Olsen 1999; Wu & Chou 2003; Liu et al. 2004; Liu et al. 2004b, Liu et al. 2004b; Olesen & Basson 2004; Peviani & Alterach 2005; Khosronejad et al. 2008; Khan & Tingsanchali 2009; Tagavifar & Adib 2010; Gallerano & Cannata 2011; Haun et al. 2012; Harb et al. 2012; Harb et al. 2013; Hajiabadi & Zarghami 2014; Castillo et al. 2015; Khanpour et al. 2016; Li et al. 2016).

La *Medición* del proceso de barrido hidráulico en modelos físicos a escala puede realizarse mediante diferentes tipos de sensores *insitu*. Por ejemplo: sondas ultrasónicas, *Ultrasonic Velocity Profilers*, *Large Scale Particle Image Velocimetry*, sonda de eco, sensores SOLITAX (Kantoush & Schleiss, 2009) o mediante levantamientos topográficos (Solórzano & Vázquez-García, 2013). A escala real pueden utilizarse sensores remotos como el escáner láser (Sumi et al., 2004; Sumi et al., 2005; Sumi, 2008), la fotogrametría aérea (Pagliari et al., 2016) since the increase of sediment may reduce the reservoir capacity, endanger dam's stability, and represent an economical loss. As a result, a number of remedies can be considered, such as flushing or mechanical removal. To evaluate the performance of these operations, measuring the volume of removed sediments and their spatial distribution is important. Here, we show that photogrammetry from UASs represents a suitable solution to reckon the volume of removed sediments. The case study is the Fusino dam (Lombardia region, Northern Italy) o fotogrametría terrestre (PROMAS, 2015). Este último trabajo del PROMAS también se ha llevado a cabo en el modelo físico de Normandía.

El objetivo de este artículo es cuantificar y mapear el resultado de una operación de barrido hidráulico de sedimento en el modelo físico a escala 1:60 del proyecto hidroeléctrico Normandía, mediante escáner láser terrestre.

MATERIALES

El proyecto hidroeléctrico Normandía está previsto que se construya en 2018 en la provincia Morona Santiago (Ecuador), en el río Upano (Figura 1), en las coordenadas $2^{\circ}15'30''$ y $78^{\circ}11'54''$, a 10 km al noreste de la ciudad de Macas.

La alta pluviosidad de la zona, las pendientes de la cuenca de aporte del río Upano y los materiales presentes en sus laderas, propician que la cuenca del embalse de Normandía tenga un elevado potencial para aportar sedimento al río Upano, a sus afluentes y, por lo tanto, al futuro embalse de Normandía. Tal y como ilustra la Figura 2, gran parte de esos sedimentos pueden proceder de los extensos afloramientos de piroclastos y lavas meteorizadas de la Formaciones Tarqui (P_T) y Cotopaxi (Q_{VX}), así como de la meteorización de los esquistos, cuarcitas y gneises de la Formación Zamora (Pz_Z).

Las simulaciones en modelos físicos a escala reducida constituyen un aporte para cuantificar y mapear el resultado de una operación de barrido hidráulico de sedimento. Este trabajo se ha llevado a cabo no en la verdadera zona del proyecto hidroeléctrico Normandía, sino en su modelo físico a escala 1:60 ubicado en el laboratorio de Hidrofísica de suelos del PROMAS, Universidad de Cuenca (Figura 3A y B). El sedimento utilizado para el azolvamiento del embalse ha sido arena fina y arcilla (pasa el tamiz $355 \mu\text{m}$) y se ha obtenido en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca (Figura 3C). El levantamiento del modelo se ha realizado con un escáner láser terrestre FARO 3D X130 (Figura 3B) y con el software Scene 5.2. La comparación de nubes de puntos

del modelo en los tres escenarios estudiados (antes de añadir el sedimento, después de añadir el sedimento y después de la maniobra de barrido hidráulico) se ha realizado con el software CloudCompare.

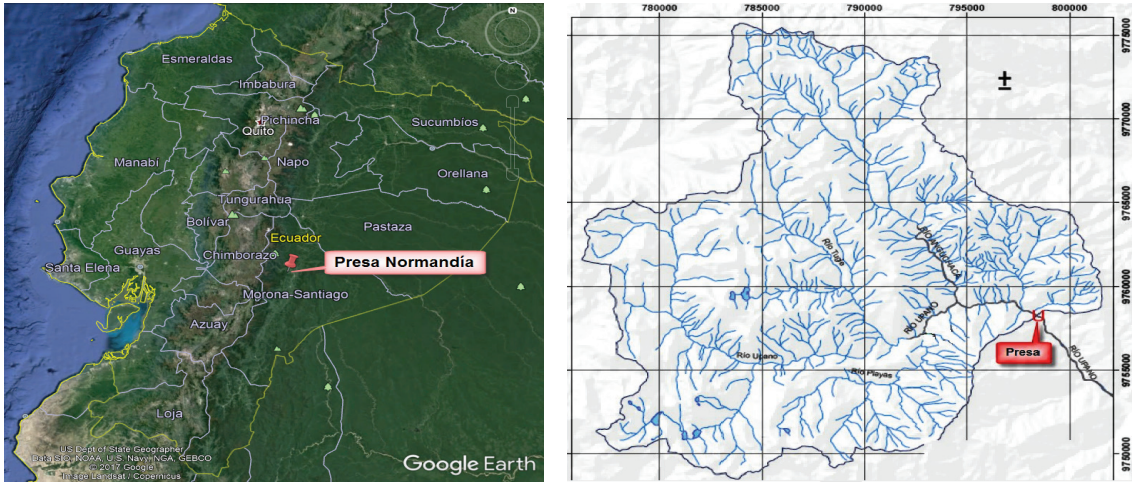


Figura 1. Ubicación del proyecto hidroeléctrico Normandía, cuenca del río Upano.

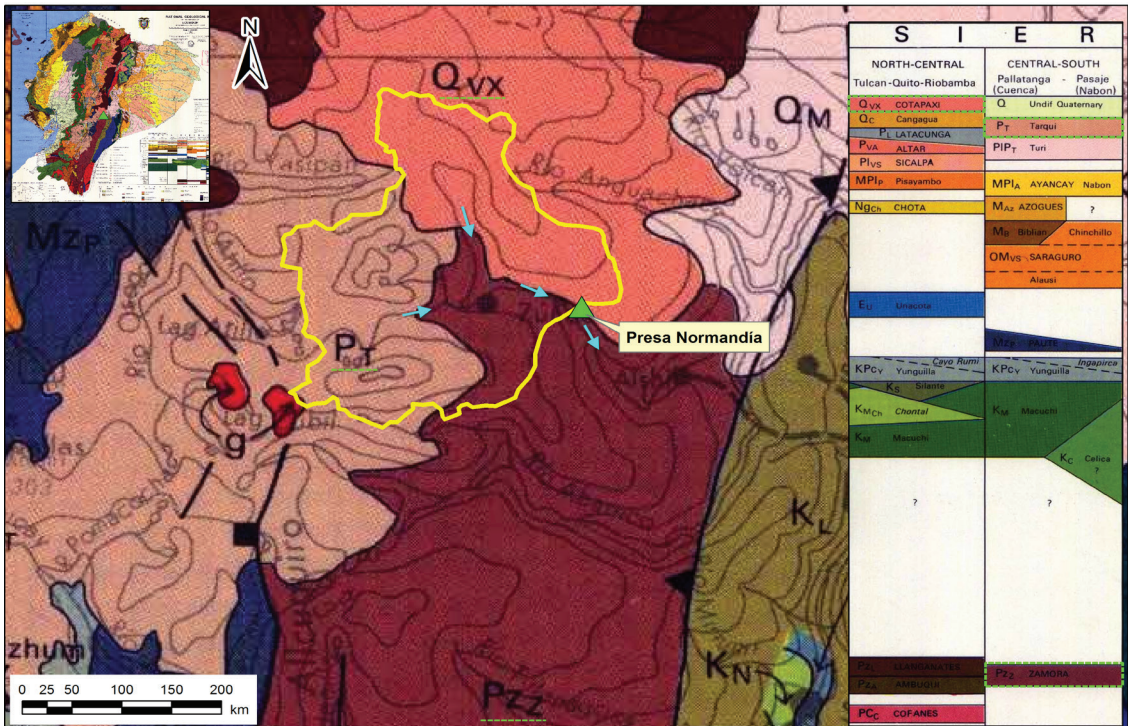


Figura 2. Mapa geológico de Ecuador escala 1:1.000.000. La línea amarilla gruesa representa el límite de la cuenca de aportación hasta la presa de Normandía (triángulo verde).



Figura 3. A y B: Modelo físico a escala 1:60 del proyecto hidroeléctrico Normandía. Laboratorio de Hidrofísica de suelos del PROMAS, Universidad de Cuenca. B: Escáner láser FARO 3D X130. C: Preparación del sedimento para el azolvamiento.

METODOLOGÍA

El experimento ha consistido en los siguientes pasos:

1. Preparación del modelo físico para el experimento (limpieza, llenado del tanque con una bomba hidráulica).
2. Escaneo láser del modelo físico antes de añadir el sedimento.
3. Vertido manual de todo el sedimento tamizado (394 kg de arena fina y arcilla, pasa el tamiz 355 μm) al caudal de entrada en la cabecera del embalse (Figura 4). No se alcanzaron condiciones críticas, es decir, el sedimento no se acercó a la obra de toma. Hay que aclarar que antes del azolvamiento, en el embalse ya había una cantidad indeterminada de sedimento de otros experimentos previos.
4. Escaneo láser del modelo físico después de añadir el sedimento.
5. Inundación del embalse con un caudal de 150 m^3/s (prototipo), que equivale a una carga de 3,6 cm en el vertedero rectangular de ingreso al modelo físico.
6. Ejecución del barrido hidráulico abriendo completamente las 2 compuertas más cercanas a la obra de toma y manteniendo un caudal de constante de entrada durante la operación. En embalses pequeños como el de Normandía, el lavado de sedimento es más eficaz si se hace coincidir el barrido hidráulico con episodios de avenidas torrenciales (Poirel, 2001).
7. Una vez finalizada la operación y secada toda el agua, se llevó a cabo el escaneo final del modelo físico para detectar los nuevos niveles de sedimento.
8. Las nubes masivas de puntos se han analizado con los softwares Scene, CloudCompare y AutoCAD Civil 3D. Para la comparación de las nubes de puntos de distintas fechas se han utilizado 4 puntos de control situados fuera del vaso del embalse, es decir, donde no ha habido ningún cambio topográfico.

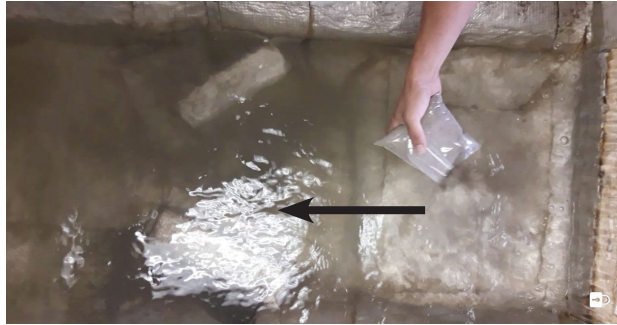


Figura 4. Vertido manual de sedimento al caudal de entrada al modelo físico. El sedimento (arena fina y arcilla) es arrastrado por la corriente hacia el vaso del embalse.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La unión de los cuatro escaneos que conforman cada una de las tres nubes de puntos, ha sido satisfactoria. En la Figura 5 se muestran los errores mínimo, máximo y promedio. El error por clinómetro ha sido del 0%. La nube anterior a la adición de sedimento y la posterior a la sedimentación tienen un error medio de 1.8 mm. La nube de puntos posterior al barrido hidráulico tiene un error promedio de 1.6 mm. Por lo tanto, podemos considerar que la nube de puntos 3D del modelo físico es confiable para poder realizar las mediciones del experimento.

Aguas arriba de la presa (Figura 6), CloudCompare muestra que el sector donde ha habido más acumulación de sedimento (hasta 9 cm) durante el azolvamiento es cerca de la entrada al modelo físico. El azolvamiento se realizó con las compuertas de desfogue abiertas para favorecer el transporte de sedimento hacia las proximidades de la presa. Sin embargo, podemos apreciar en esta misma figura que hacia el embalse se produjo erosión, especialmente en las orillas del cauce. El volumen de sedimento que se logró acumular en el embalse durante esta parte del experimento fue de $0,025 \text{ m}^3$, lo que equivale en la realidad a unos 5.400 m^3 o unas 300 volquetas de 18 m^3 .

Antes de añadir el sedimento				Después de añadir el sedimento				Después del barrido hidráulico			
Referencia	Ten...	Escaneo 1	Escaneo 2	Referencia	Ten...	Escaneo 1	Escaneo 2	Referencia	Ten...	Escaneo 1	Escaneo 2
* Sphere1	0.0073	Norman_Scan_006	Norman_Scan_002	* Sphere5	0.0050	Norman2_Scan010	Norman2_Scan003	* Sphere	0.0046	Norman2_Scan010	Norman2_Scan014
* Sphere1	0.0059	Norman_Scan_004	Norman_Scan_002	* Sphere1	0.0046	Norman2_Scan010	Norman2_Scan003	* Sphere2	0.0036	Norman2_Scan010	Norman2_Scan010
* Sphere1	0.0043	Norman_Scan_006	Norman_Scan_008	* Sphere5	0.0042	Norman2_Scan014	Norman2_Scan010	* Sphere	0.0034	Norman2_Scan014	Norman2_Scan005
* Sphere5	0.0042	Norman_Scan_002	Norman_Scan_006	* Sphere3	0.0042	Norman2_Scan010	Norman2_Scan014	* Sphere2	0.0034	Norman2_Scan012	Norman2_Scan010
* Sphere5	0.0039	Norman_Scan_008	Norman_Scan_006	* Sphere3	0.0039	Norman2_Scan012	Norman2_Scan010	* Sphere6	0.0033	Norman2_Scan010	Norman2_Scan012
* Sphere2	0.0038	Norman_Scan_008	Norman_Scan_009	* Sphere5	0.0037	Norman2_Scan005	Norman2_Scan003	* Sphere6	0.0030	Norman2_Scan010	Norman2_Scan005
* Sphere4	0.0033	Norman_Scan_002	Norman_Scan_009	* Sphere1	0.0036	Norman2_Scan012	Norman2_Scan003	* Sphere	0.0029	Norman2_Scan010	Norman2_Scan005
* Sphere5	0.0033	Norman_Scan_009	Norman_Scan_002	* Sphere1	0.0033	Norman2_Scan010	Norman2_Scan012	* Sphere2	0.0028	Norman2_Scan014	Norman2_Scan005
* Sphere2	0.0032	Norman_Scan_009	Norman_Scan_006	* Sphere1	0.0032	Norman2_Scan010	Norman2_Scan005	* Sphere2	0.0023	Norman2_Scan005	Norman2_Scan010
* Sphere2	0.0032	Norman_Scan_002	Norman_Scan_009	* Sphere5	0.0031	Norman2_Scan014	Norman2_Scan005	* Sphere2	0.0022	Norman2_Scan014	Norman2_Scan012
* Sphere1	0.0031	Norman_Scan_008	Norman_Scan_002	* Sphere1	0.0029	Norman2_Scan003	Norman2_Scan005	* Sphere4	0.0019	Norman2_Scan010	Norman2_Scan012
* Sphere5	0.0030	Norman_Scan_008	Norman_Scan_009	* Sphere5	0.0029	Norman2_Scan014	Norman2_Scan003	* Sphere3	0.0016	Norman2_Scan005	Norman2_Scan010
Estadísticas Media: 0.0018 Desviación: 0.0016 Mín.: 0.0000 Máx.: 0.0073				Estadísticas Media: 0.0018 Desviación: 0.0015 Mín.: 0.0000 Máx.: 0.0050				Estadísticas Media: 0.0016 Desviación: 0.0013 Mín.: 0.0000 Máx.: 0.0046			

Figura 5. Cuadros resumen con los errores de distancia en mm al unir las tres nubes de puntos: antes de añadir el sedimento (izquierda), después de añadir el sedimento (centro) y después de la operación de barrido hidráulico (derecha).

La Figura 7 muestra el perfil longitudinal A-A' en el tramo del embalse en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico). Se confirma lo dicho anteriormente, los mayores incrementos de altura de sedimento después del azolvamiento y después del barrido hidráulico se dan en la cabecera del embalse, y son mucho menores en las proximidades de la presa. El perfil transversal B-B' (Figura 8) también pone de manifiesto que la parte del embalse más sensible a la sedimentación y erosión en estos experimentos ha sido su cabecera. El perfil transversal C-C' (Figura 9) realizado justo aguas arriba de la presa, sin embargo, apenas muestra diferencias de altura tras los dos experimentos realizados en este trabajo.

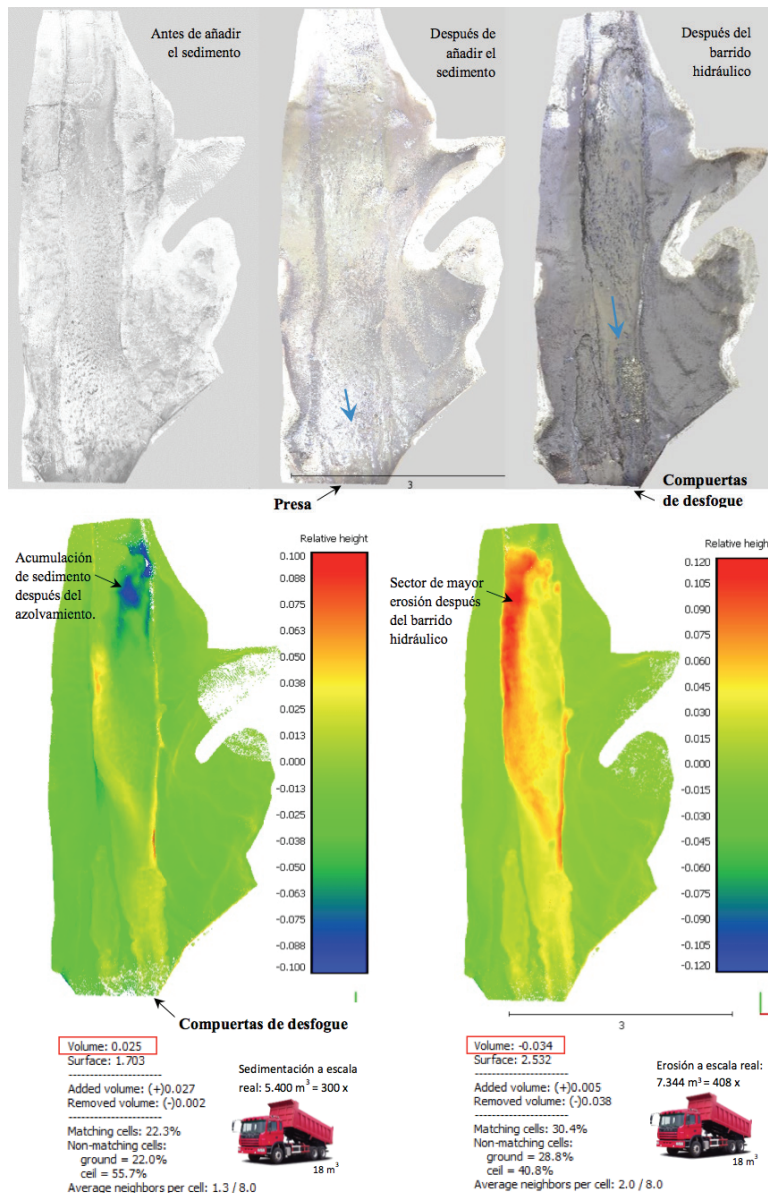
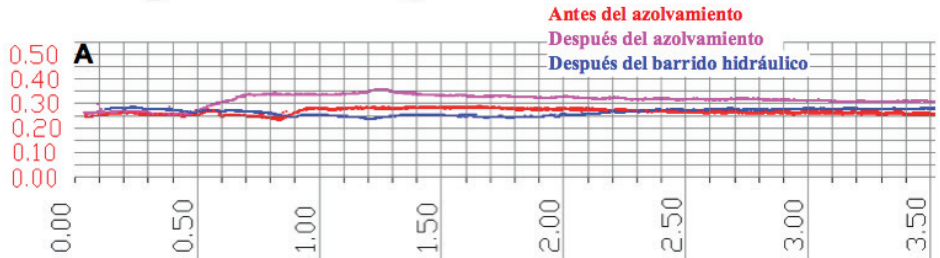
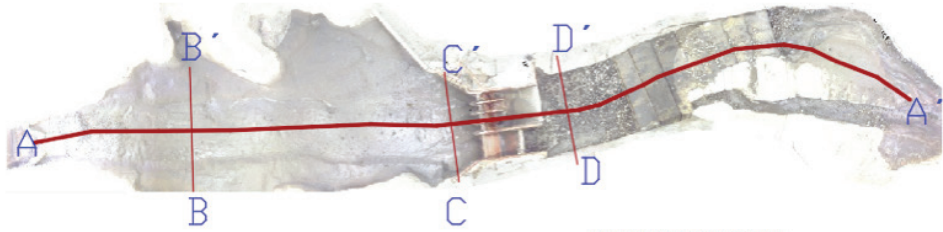


Figura 6. Distribución espacial y cálculo del volumen de sedimento erosionado y acumulado en el embalse.



	Condiciones Iniciales	
	Cota escala(m)	Cota real(m)
Total sedimentos	150.31	0.252
	16.80	0.280
Barrido Hidraulico	16.92	0.282
	15.56	0.276
	15.84	0.264
	15.84	0.264
	15.42	0.257
	15.42	0.257

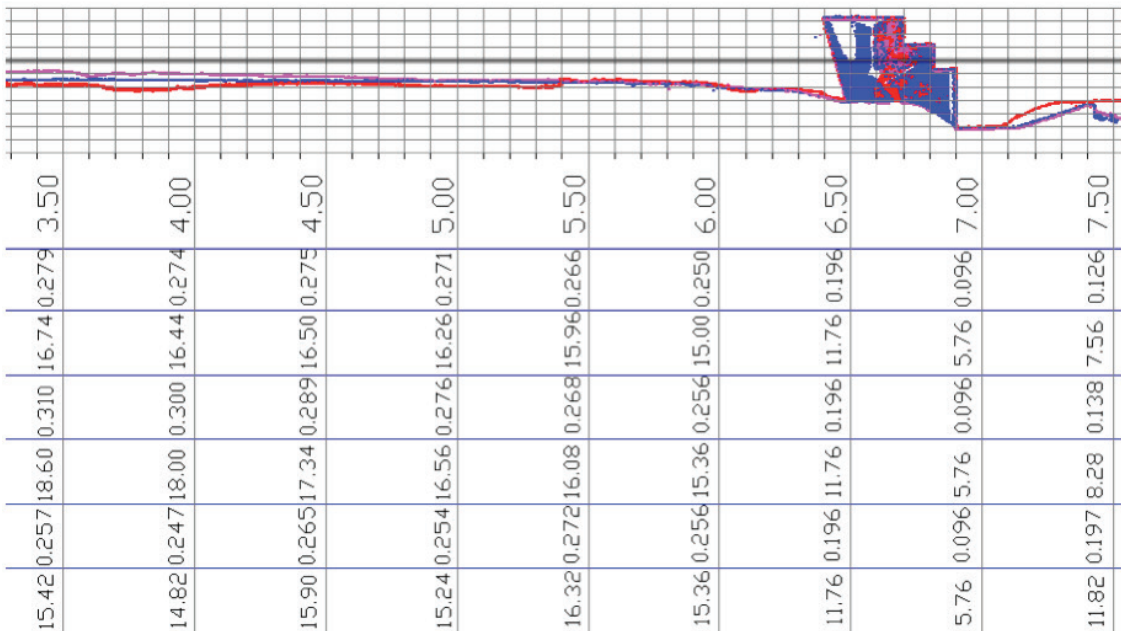


Figura 7. Perfil longitudinal A-A' en el tramo del embalse en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico).

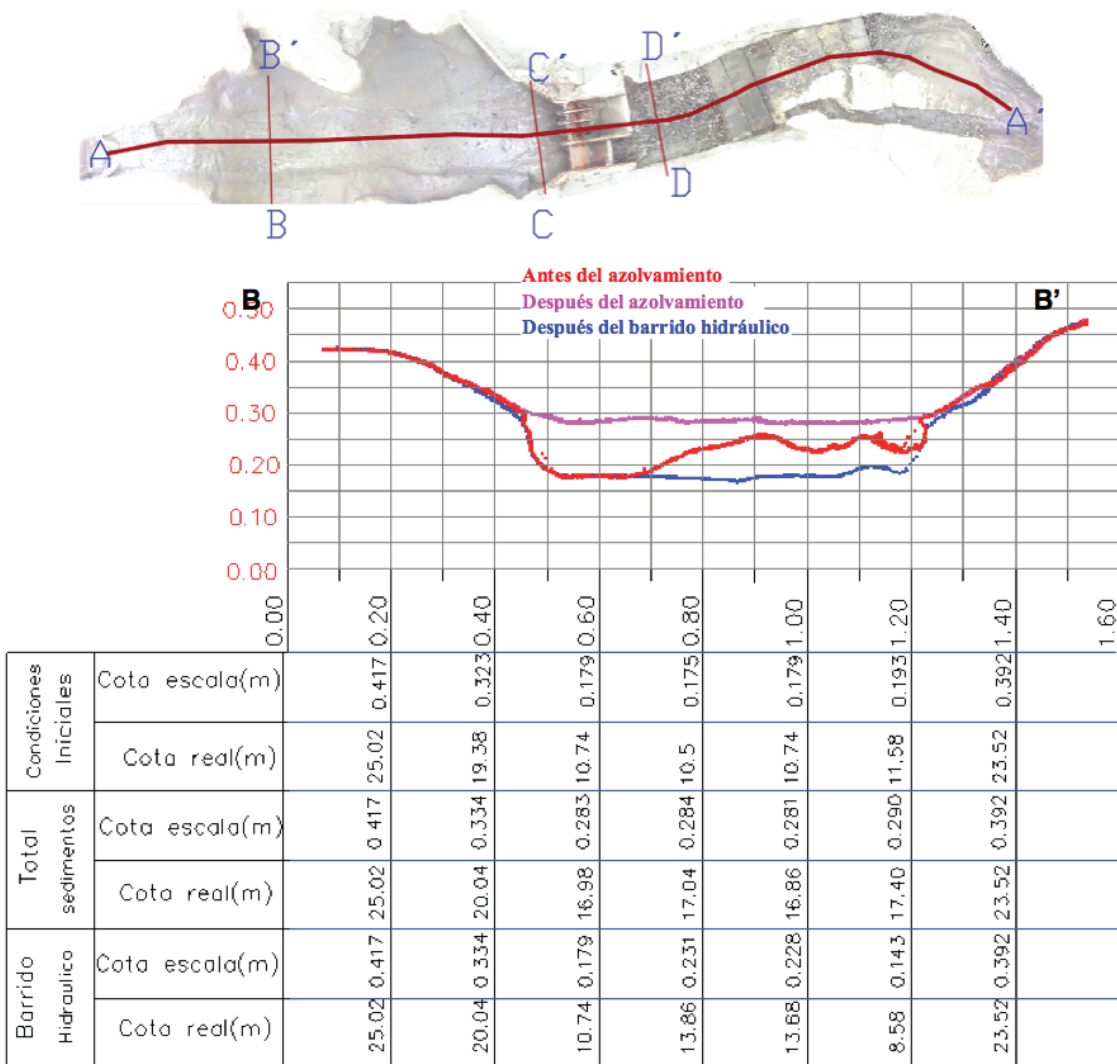


Figura 8. Perfil transversal B-B' en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico).

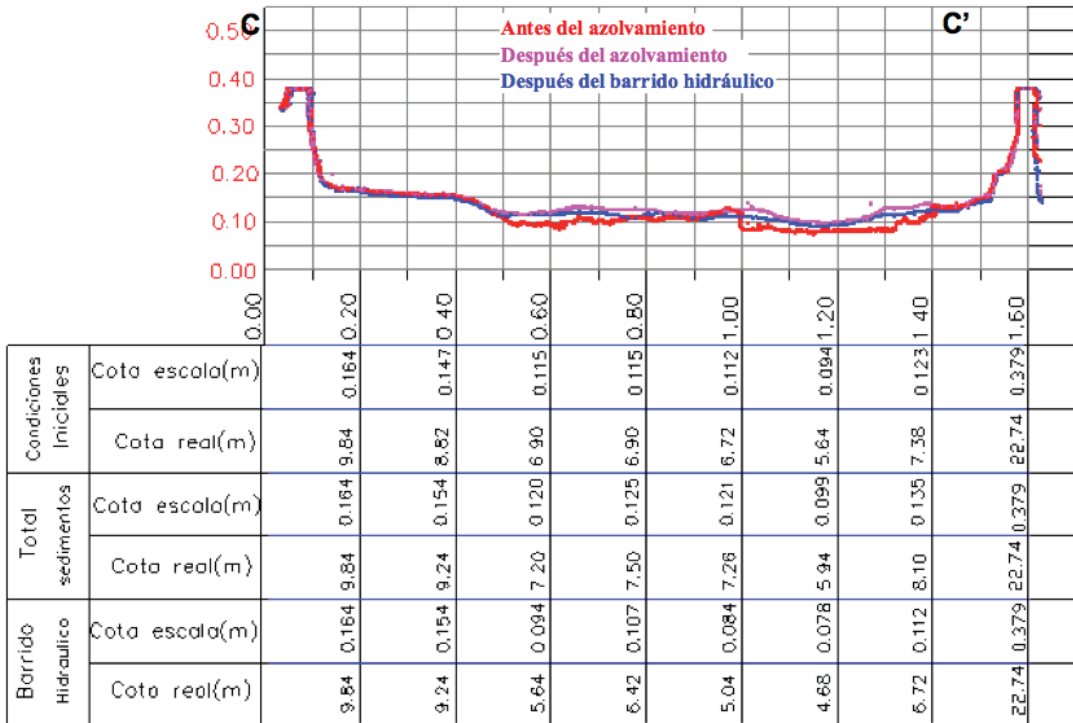
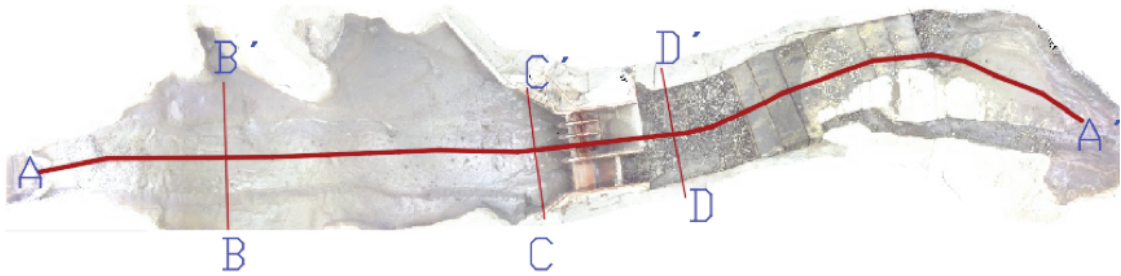


Figura 9. Perfil transversal C-C' en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico).

Aguas abajo de la presa (Figura 10), después de añadir sedimento al embalse con la compuerta de fondo abierta, se ha acumulado una pequeña cantidad de sedimento, 0,004 m³ que en la realidad supondrían 918 m³ o unas 51 volquetas de 18 m³. También se ha producido erosión del sedimento previo que ya tenía el modelo en sectores puntuales como algunas orillas o cerca de la presa (Figura 11Figura 12). Después del barrido hidráulico la acumulación de sedimento es mucho más apreciable, especialmente a la salida de las compuertas de fondo abiertas y en el exterior de la curva del río en la parte final del modelo, acumulándose en este sector más de 10 cm de sedimento. Esto último también podemos observarlo en el final del perfil longitudinal A-A' (Figura 11). Tal y como ilustra el perfil transversal D-D' (Figura 12), inmediatamente aguas abajo de la presa apenas ha habido variaciones en el nivel de sedimento después del azolvamiento ni del barrido hidráulico.

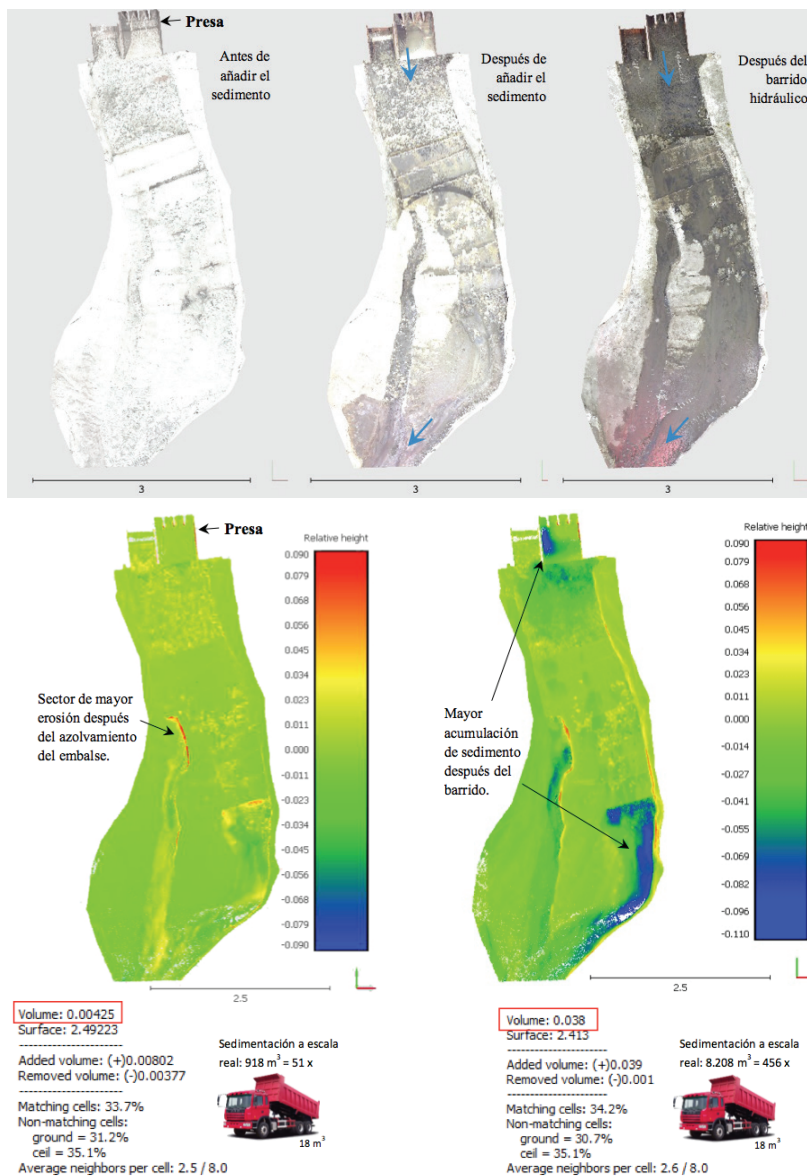


Figura 10. Distribución espacial y cálculo del volumen de sedimento erosionado y acumulado aguas abajo del embalse.

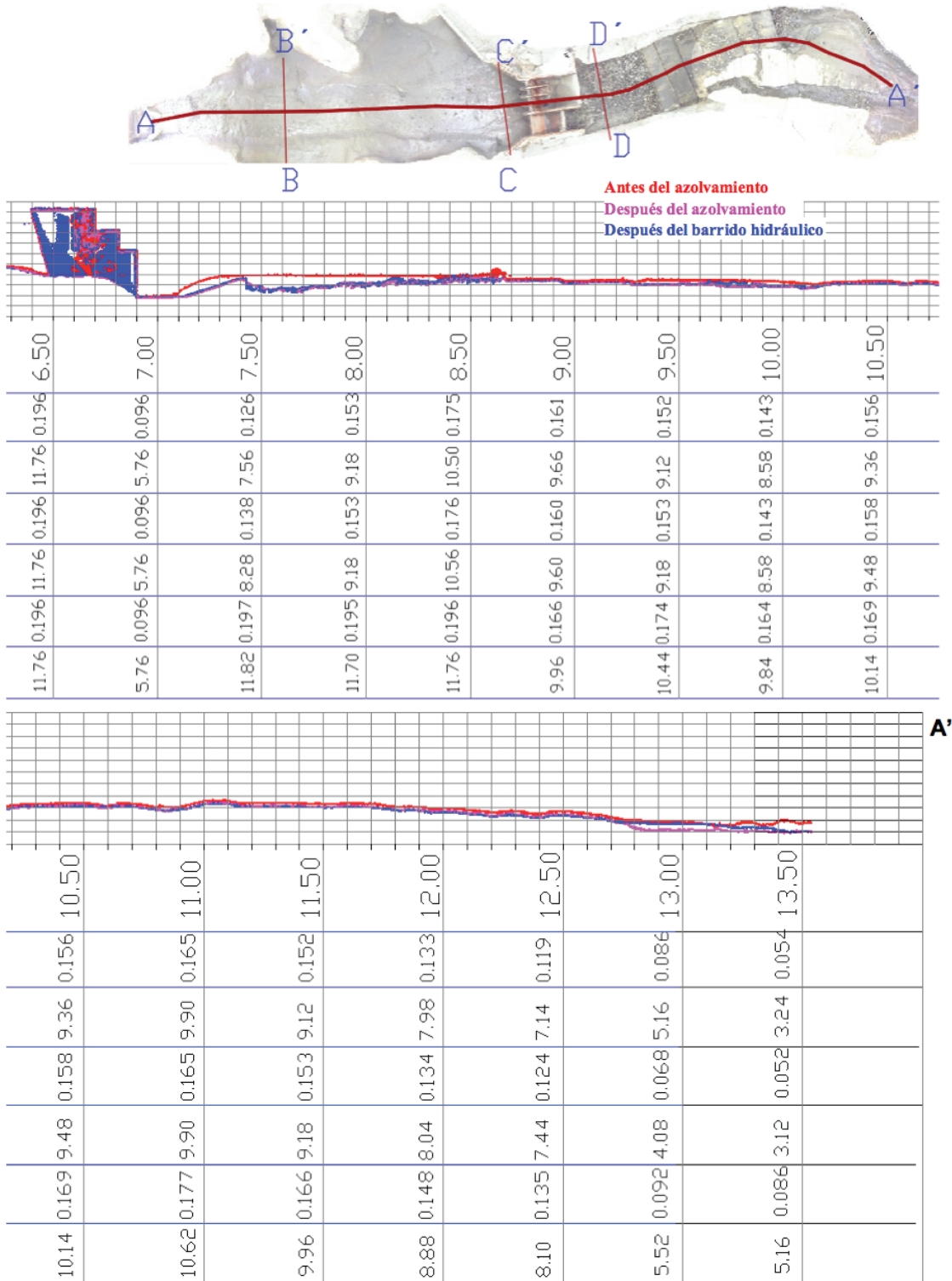


Figura 11. Perfil longitudinal A-A' en el tramo aguas abajo del embalse en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico).

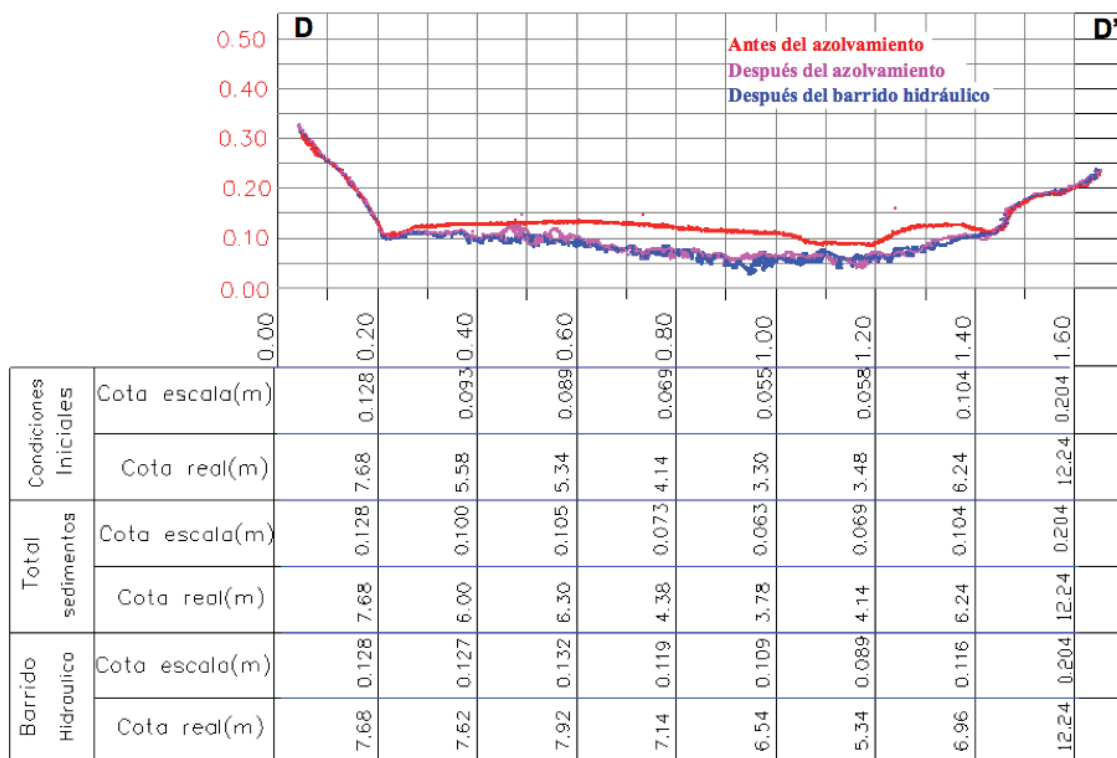
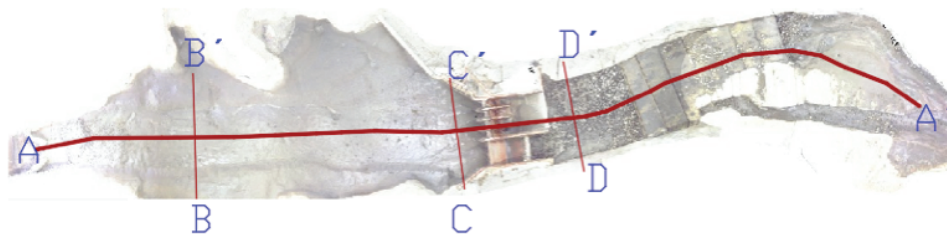


Figura 12. Perfil transversal D-D' en los tres escenarios analizados (antes de azolvar, después de azolvar y después del barrido hidráulico).

CONCLUSIONES

Aguas arriba de la presa, el proceso manual de azolvamiento con 394 kg de arena fina y arcilla ha producido una acumulación de 0,025 m³, lo que equivaldría en la realidad a unos 5.400 m³ o 300 volquetas de 18 m³. Esta acumulación se ha producido fundamentalmente en la cabecera del embalse, entre la abscisa 0+1.00 y 0+2.80 con una altura de 10,7 cm, y apenas se ha notado cerca de la presa. El posterior barrido hidráulico ha producido un balance erosivo de 0,034 m³ (7.334 m³ en la realidad, equivalente a 408 volquetas estándar con capacidad para 18 m³). Esta erosión ha alcanzado su máximo también en la cabecera del embalse y en algunas orillas. Sin embargo, ha sido poco significativa cerca del embalse.

Aguas abajo de la presa, el proceso de azolvamiento apenas ha producido acumulación de sedimento. Sin embargo, la operación de barrido hidráulico ha producido un balance acumulativo de 0,038 m³ de sedimento procedente del embalse (8.208 m³ en la realidad, equivalente a 456 volquetas estándar con capacidad para 18 m³). Las mayores tasas de sedimentación se han producido a la salida de las compuertas de fondo y en el exterior de la curva del río al final del modelo con aumentos de altura de 10 cm (unos 6 m en la realidad).

El volumen de sedimento evacuado (0,038 m³) ha sido mayor que el añadido. Esto se debe a que el modelo físico ya tenía sedimento antes de nuestro proceso de azolvamiento manual.

Las extrapolaciones del modelo a la realidad que presentamos en este trabajo son simples aproximaciones y no tienen en cuenta la gran variabilidad de factores que controlan la erosión, transporte y sedimentación en la naturaleza.

El río Upano y sus afluentes discurren sobre terrenos propensos a aportarles sedimento: piroclastos y productos procedentes de la meteorización de lavas y esquistos fundamentalmente. Sería interesante poder continuar con este trabajo, pero a escala real, realizando batimetrías antes de las maniobras de barrido hidráulico y levantamientos fotogramétricos con dron nada más finalizar dichas maniobras, cuando el nivel de agua es muy bajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Energía de la Universidad de Cuenca por el préstamo del escáner láser. Al laboratorio de hidrofísica de suelos del PROMAS – Universidad de Cuenca por poner a nuestra disposición el modelo físico de Normandía. A la Fundación RedCEDIA por su apoyo al desarrollo de las IDEs académicas en Ecuador por medio del GT-IDE.

REFERENCIAS

- Annandale, G. W. (2011). Reservoir conservation and sediment management. *Water Week 2001 Water Bank Group*.
- Atkinson, E. (1996). *The feasibility of flushing sediment from reservoirs. Report OD 137, TDR Project R5839*. HR Wallingford Ltd.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Álvarez, M. A. (2015). Complementary methods for determining the sedimentation and flushing in a reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(11), 5015004.
- Emamgholizadeh, S., Borojeni, H. S., & Bina, M. (2005). The flushing of the sediments near the power intakes in the Dez reservoir. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 83.
- Gallerano, F., & Cannata, G. (2011). Compatibility of reservoir sediment flushing and river protection. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10), 1111–1125.

- Hajiabadi, R., & Zarghami, M. (2014). Multi-Objective Reservoir Operation with Sediment Flushing; Case Study of Sefidrud Reservoir. *Water Resources Management*, 28(15), 5357–5376. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0806-9>
- Harb, G., Dorfmann, C., Badura, H., & Schneider, J. (2013). Numerical analysis of the flushing efficiency of an Alpine reservoir. In *Proceedings of the 2013 IAHR World Congress*.
- Harb, G., Dorfmann, C., Schneider, J., Haun, S., & Badura, H. (2012). Numerical analysis of sediment transport processes in a reservoir. In *River Flow 2012*.
- Hassanzadeh, Y. (1995). The removal of reservoir sediment. *Water International*, 20(3), 151–154.
- Haun, S., Olsen, N. R. B., Rodríguez Meza, C. R., & Lizano, L. (2012). 3D numerical simulation of the flushing process in the Angostura Reservoir. In *6th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2012* (pp. 867–871).
- Hu, G. (1995). *Reservoir sediment routing and hydraulic flushing*.
- Ji, U., Julien, P. Y., & Park, S. K. (2011). Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1522–1535.
- Jiménez, O., Farias, H. D., & Rodríguez, C. (2005). Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería Del Agua*, 12(3).
- Kantoush, S. A., & Schleiss, A. J. (2009). Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries. *Environmental Technology*, 30(8), 855–863.
- Khan, N. M., & Tingsanchali, T. (2009). Optimization and simulation of reservoir operation with sediment evacuation: a case study of the Tarbela Dam, Pakistan. *Hydrological Processes*, 23(5), 730–747. <https://doi.org/10.1002/hyp.7173>
- Khanpour, M., Zarrati, A. R., Kolahdoozan, M., Shakibaeinia, A., & Amirshahi, S. M. (2016). Mesh-free {SPH} modeling of sediment scouring and flushing. *Computers & Fluids*, 129, 67–78. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.02.005>
- Khosronejad, A., Rennie, C. D., Neyshabouri, A. A. S., & Gholami, I. (2008). Three-dimensional numerical modeling of reservoir sediment release. *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 209–223.
- Lai, J.-S., & Shen, H. W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), 237–255.
- Lai, J.-S., & Shen, H. W. (1997). Desilting Reservoir Sediment Deposits by Drawdown Flushing. In *Energy and Water: Sustainable Development* (pp. 120–125).
- Li, X., Qiu, J., Shang, Q., & Li, F. (2016). Simulation of Reservoir Sediment Flushing of the Three Gorges Reservoir Using an Artificial Neural Network. *Applied Sciences*, 6(5), 148.
- Montero, M. E. S., Rayán, R. C., Montaña, J. L. G., & Salas, C. A. (1998). Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles. *Ingeniería Del Agua*, 5(4).
- Olesen, K. W., & Basson, G. (2004). 1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs. In *Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures*.
- Olsen, N. R. B. (1999). Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1), 3–16.
- Pagliari, D., Rossi, L., Passoni, D., Pinto, L., De Michele, C., & Avanzi, F. (2016). Measuring the volume of flushed sediments in a reservoir using multi-temporal images acquired with UAS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1–17.
- Peviani, M., & Alterach, J. (2005). Sediment transport analysis using the MORIMOR model for the assessment of downstream river effects due to flushing in reservoirs. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 83.

- Poirel, A. (2001). Sediment flushing management: experiment feedback from some alpine reservoirs. *Houille Blanche*, (6), 55–61.
- PROMAS (Universidad de Cuenca). (2015). *Estudio en modelo hidráulico para el proyecto hidroeléctrico Normandía. Informe definitivo Fase II*. Cuenca, Ecuador.
- Ryding, S.-O. R., & others. (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*.
- Schlegel, B., Dietler, T., & others. (2010). Dez Dam, Iran: high sedimentation rates within the reservoir requires construction of flushing tunnels. *WasserWirtschaft-Hydrologie, Wasserbau, Hydromechanik, Gewässer, Ökologie, Boden*, 100(4), 92–94.
- Shahmirzadi-Meshkati, M., Dehghani, A., Sumi, T., & Mosaedi, A. (2010). Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages. *Water and Geoscience*, 1.
- Solórzano, M., & Vázquez-García, S. (2013). *Estudio en modelo físico de escala reducida para los procesos de barrido hidráulico del proyecto de generación hidroeléctrica Minas San Francisco*. Universidad de Cuenca (Ecuador).
- Sumi, T. (2008). Evaluation of Efficiency of Reservoir Sediment Flushing in Kurobe River. In *Fourth International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, Japan* (pp. 5–7).
- Sumi, T., Murasaki, M., Fujinaga, K., Nagura, H., & Tamaki, H. (2004). Study on Measurement of Erosion-Deposition Process of Reservoir Sediment during Flushing Operation. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 48, 1147–1152.
- Sumi, T., Murasaki, M., Nagura, H., Tamaki, H., & Imaki, T. (2005). Study on measurement of erosion-deposition process of reservoir sediment during flushing operation (Part 2). *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 49, 1033–1038.
- Tagavifar, A., & Adib, A. (2010). Evaluation of sedimentation and flushing by mathematical model in reservoirs of the successive Dez stream dams in Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2), 980–987.
- Talebbeydokhti, N., & Naghshineh, A. (2004). Flushing sediment through reservoirs. *Iranian Journal of Science and Technology*, 28(B1), 119–136.
- Wu, F.-C., & Chou, Y.-J. (2003). Simulation of gravel-sand bed response to flushing flows using a two-fraction entrainment approach: Model development and flume experiment. *Water Resources Research*, 39(8).