

Estudio de la estabilidad de taludes ante procesos de desembalse rápido en presas

Isaida Flores Berenguer

E-MAIL: isaidafb@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba.

Yoermes González Haramboure

E-MAIL: yoermes@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba.

Jany Leidys Días Acosta

E-MAIL: janyldiaz9803@gmail.com

Empresa de Construcción y Montaje Mariel.

Jenny García Tristán

E-MAIL: jenny@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba.

RESUMEN

En esta investigación se analiza el comportamiento del factor de seguridad del talud aguas arriba en presas de tierra, ante la variación de la velocidad del flujo transitorio asociado a fenómenos de desembalse rápido. Se presentan tres casos de estudio: La Ruda, Canasí y Jaruco, ubicadas en la provincia Mayabeque. Para la ejecución de los modelos se emplean las herramientas SEEP/W y SLOPE/W del programa GeoStudio 2018 y para la obtención del factor de seguridad se utiliza el método de Morgenstern-Price. El análisis se realiza para la curva característica estimada y para la curva de conductividad hidráulica resultante empleando el método de Fredlund & Xing. Los resultados muestran una reducción del factor de seguridad, cuya magnitud depende de la velocidad del flujo de agua transitorio para todos los casos analizados.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad de taludes, presas de tierra, desembalse rápido, suelos no saturados, velocidad de desembalse

Study of the slope stability in the face of rapid drawdown processes in dams

ABSTRACT

The objective of the research is to analyze the behavior of the safety factor of the upstream slope in earth dams, given the variation in the speed of the transient flow associated with rapid release phenomena. Three case studies of earth dams are presented: La Ruda, Canasí and Jaruco, located in the Mayabeque province. For the execution of the models, the SEEP/W and SLOPE/W tools of the GeoStudio 2018 program are used and the Morgenstern-Price method is used to obtain the safety factor. The analysis is performed for the estimated characteristic curve and for the resulting hydraulic conductivity curve using the Fredlund & Xing method. The fundamental results show a reduction of the factor of safety associated with the speed of transient water flow for all the cases analyzed.

KEYWORDS: Slope stability, earth dams, fast unloading, unsaturated soils, drawdown velocity

01 INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de taludes se producen debido a que el peso de la masa de suelo es mayor que su resistencia al corte en una superficie dada. Todas las fallas de importancia reportadas por deslizamientos del talud aguas arriba han ocurrido como consecuencia de un desembalse rápido y, aunque no han causado el colapso de la presa o la pérdida de agua en el embalse, sí provocan situaciones de peligro al tapar conductos y galerías (Armas, 1987). El fenómeno de desembalse rápido puede ser inducido por fallas estructurales o la operación descontrolada de obras de toma. (Flores et al., 2020 ; Haramboure et al., 2021).

La situación de desembalse rápido se analiza puesto que una bajada rápida del nivel del agua hace que, en las zonas construidas con los materiales menos permeables de la presa, no se produzca una disipación completa de la presión intersticial de forma simultánea a dicho descenso, por lo que se produce un desequilibrio de fuerzas que tienden a producir una situación de inestabilidad (Boushehrian et al., 2017).

La condición de desembalse rápido es a menudo prioritaria en el establecimiento de los taludes aguas arriba en una presa de tierra, porque es la condición de carga que confiere al cuerpo de la presa las condiciones más desfavorables a la estabilidad del talud. Sin embargo, dependiendo del tipo de material, el suelo en estado parcialmente saturado puede tener un aumento de resistencia durante el desembalse rápido, conforme a las presiones de poros disipadas y al aumento de succión que puede ocurrir.

02 FACTORES QUE PRODUCEN DESEMBALSE EN PRESAS

Existen varios factores que pueden provocar el desembalse en presas, como son la sequía y los cambios de operación por la operación de centrales hidroeléctricas. Durante un periodo de sequía prolongada, el nivel de agua de las presas de tierra puede reducirse de manera continuada y rápida, lo que provoca, a su vez, una disminución del factor de seguridad en el talud aguas arriba.

RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO Y LA PÉRDIDA DE AGUA DURANTE EL DESEMBALSE

Un estudio realizado por (Sherard,1953) en 12 presas, mostró que las fallas de taludes por desembalse se presentan en casos en que el nivel del agua estuvo descendiendo a razón de 0,10 a 0,12 m/día.

Un estudio realizado por (Jia et al. ,2009) reportó resultados de una prueba de desembalse rápido, que comenzó con el llenado del embalse y consecuente saturación del talud. Una vez finalizado el llenado, un periodo de reposo permitió establecer el régimen de sumersión en el talud, confirmado con las mediciones de la presión de poro en diferentes puntos de este último. Posteriormente se llevó a cabo el desembalse hasta que el talud alcanzara la falla. La velocidad fijada para el mismo fue de 24 m/día, que representa una velocidad extremadamente alta. Entre los aspectos más relevantes de esta prueba se destaca que la falla del talud no ocurrió en un solo instante sino había estado evolucionando desde casi el inicio del vaciado hasta la falla total.

Según (López, 2019) en el criterio de velocidad de descenso del nivel de agua se deben valorar los casos en que la máxima operación de las obras de entrega pudiera generar altas velocidades de descenso, consideradas por la literatura en el rango de desembalse rápido, para el que las velocidades de desembalses deben ser mayores o iguales a 0,072 m/día.

Flores (2019) plantea que, a fin de considerar el efecto del desembalse rápido en la presa objeto de estudio, a partir del flujo transitorio, producto de un periodo de sequía prolongada, se supone que el nivel de las aguas descenderá a razón de 0,15 m/día.

A partir de toda la bibliografía consultada, en la presente investigación se proponen velocidades de desembalse de 0,1 m/día (velocidad mínima de descenso del nivel del agua); 0,15 m/día (Armas y Horta 1987; Flores, 2019) y 0,3 m/día (Haramboure et al., 2021), con mayor probabilidad de ocurrencia en las presas bajo condiciones de sequía o por posibles cambios de operación.

03 ELEMENTOS PARA LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL

La incorporación de modelos computacionales ha sido de gran utilidad para resolver problemas complejos de ingeniería debido a su forma tan simplificada de trabajo.

Se analizaron cinco casos, tomando para ello, las presas: Jibacoa, San Miguel, Canasí, La Ruda y Jaruco, todas ubicadas en la provincia de Mayabeque, sus características geométricas fueron obtenidas a partir de los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), los modelos geométricos se muestran en la figura 1.

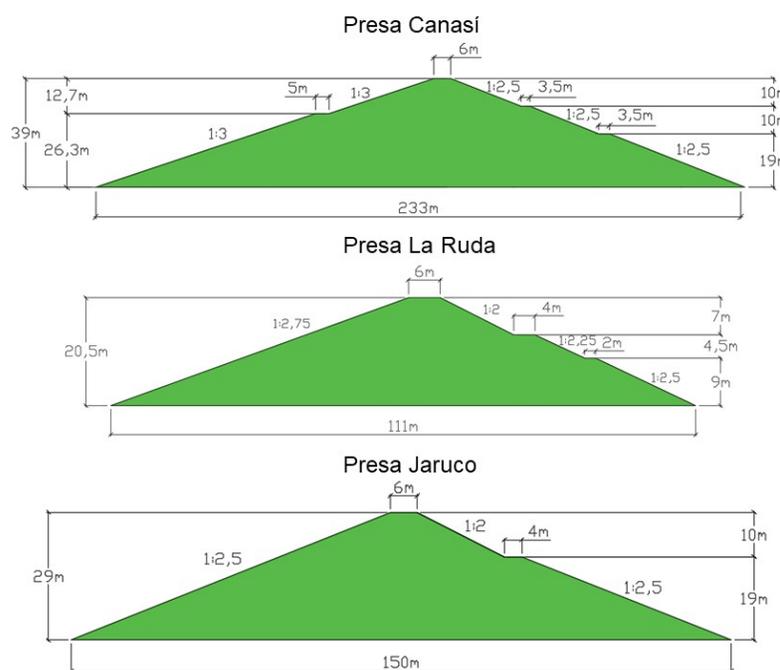


Figura 1. Geometría de los modelos.

MATERIALES DEL MODELO

Para definir los materiales que conformarán las cortinas de las presas de tierra se consultaron los informes ingeniero-geológicos de los proyectos originales, conservados en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de La Habana. A partir de esta recopilación se concluyó que los suelos predominantes en las cortinas son las arcillas de alta compresibilidad (CH) y baja compresibilidad (CL). Para el análisis de filtración se establece una anisotropía de 0,083 para los tres casos, correspondiente a una relación de permeabilidad $k_x = 12k_y$ (Haramboure, 2021). Las características resumidas de los materiales de las presas en cuestión se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los materiales que conforman la cortina.

Presa	Peso específico (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Permeabilidad (m/seg)	Índice de compresibilidad volumétrica (m _v)
Canasí	17,93	48,02	19	2,5 E-09	1,00 E-05
La Ruda	18,13	47,04	13	7 E-09	1,00 E-05
Jaruco	18,91	34,3	12	7 E-09	1,00 E-05

DESLIZAMIENTOS

Para los tres casos analizados, se tienen en cuenta tres velocidades de descenso, lo que implica diferentes tiempos de duración del proceso de desembalse en cada caso. Los niveles de agua correspondientes, así como las relaciones de velocidad y duración se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Niveles de agua, velocidades de descenso y duración del desembalse para los casos analizados.

Presa	NAN	NAM	Altura de agua que desciende	Velocidades de descenso		
				0,1 m/día	0,15 m/día	0,3 m/día
				Duración		
Canasí	37 m	26,3 m	10,7 m	107 días	71,3 días	35,7 días
La Ruda	18 m	6,5 m	11,5 m	115 días	76,7 días	38,3 días
Jaruco	26,5 m	9,5 m	17 m	170 días	133 días	56,7 días

04 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la modelación de las estructuras en la herramienta SEEP/W, se empleó una malla conformada por cuadrados y triángulos, puesto que, en todos los casos, el modelo de la cortina es trapezoidal. A partir de los resultados obtenidos por (Flores et al., 2020), se selecciona una malla con un espesor de 0,6 metros.

PRESA CANASÍ

Para este caso la presa tiene inicialmente el nivel de aguas normales (NAN) con altura de 37 m y se reduce su nivel hasta el de aguas muertas (NAM) a 26,3 m, con las velocidades definidas en la tabla 2. En la figura 2 se muestran las variaciones al inicio y al final de cada uno de los tiempos de desembalse rápido definidos y las superficies de falla correspondientes.

En la figura 2 se observa que la línea de corriente superior se desplaza por el talud aguas arriba siguiendo la trayectoria de la disminución del agua durante el desembalse rápido, esto se debe a la baja permeabilidad del suelo que compone la cortina de la presa, corroborado en diversas investigaciones (Haramboure, 2021) que, entre sus resultados se observa la línea de corriente superior colgada del talud aguas arriba, pues no se produce la disipación de las presiones de poros generadas en el talud con la misma velocidad que ocurre el desembalse rápido (Armas y Horta 1987).

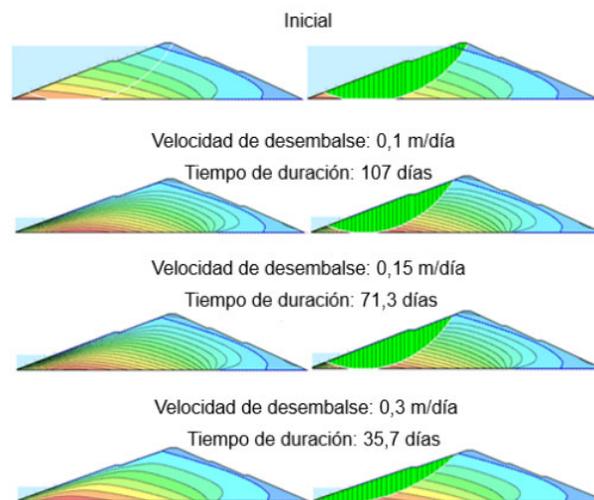


Figura 2. Líneas de corriente superior al inicio y al final del desembalse para cada velocidad definida con su correspondiente superficie de falla para la presa Canasí.

Las condiciones de flujo transitorio provocan que la variación de la succión en el suelo a partir de la conductividad hidráulica modifique el factor de seguridad en cada etapa durante el período analizado. Este proceso se muestra en la figura 3.

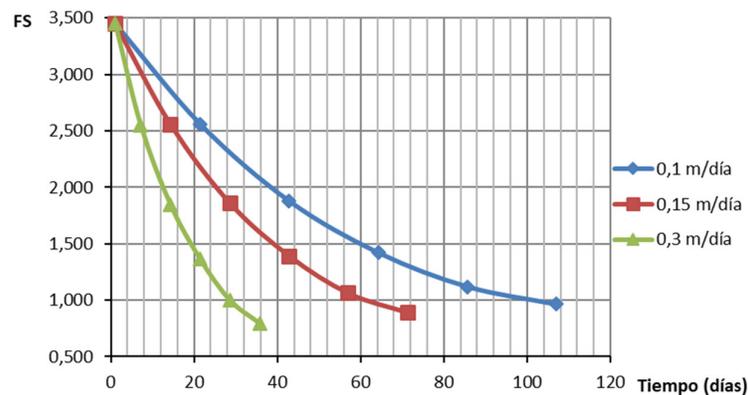


Figura 3. Comportamiento del factor de seguridad durante el desembalse rápido en la presa Canasí.

En la figura 3 se observa que durante la condición de flujo transitorio el factor de seguridad se reduce a razón de 72,05% para 0,1 m/día; 74,11% para 0,15 m/día y 76,96% para 0,3 m/día. Esto implica que, la razón de reducción del FS aumenta con la velocidad de desembalse y su valor al final del mismo disminuye cuando el tiempo de desembalse es menor.

Algunos de los factores de seguridad obtenidos en la modelación de esta presa son menores a la unidad, lo que implica que hay una probabilidad alta de falla del talud producto a un desembalse rápido, lo que resulta consecuente con lo obtenido por varios autores en investigaciones similares (Flores, 2019).

PRESA LA RUDA

Para este caso la presa tiene inicialmente el nivel de aguas normales (NAN) con altura de 18 m y

se reduce su nivel hasta el de aguas muertas (NAM) a 6,5 m, con las velocidades definidas en la tabla 2. En la figura 4 se muestran las variaciones al inicio y al final de cada uno de los tiempos de desembalse rápido definidos y las superficies de falla correspondientes.

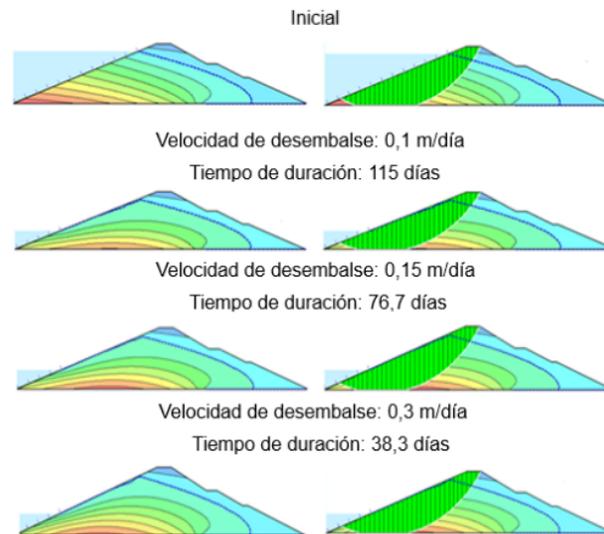


Figura 4. Líneas de corriente superior al inicio y al final del desembalse para cada velocidad definida con su correspondiente superficie de falla para la presa La Ruda.

En la figura 4 se observa el mismo comportamiento obtenido en la presa Canasí, mostrado en la figura 2. La línea de corriente superior se queda colgada del talud debido al exceso de presión de poros que no se disipan completamente a medida que se reduce el nivel del embalse, producto de la baja permeabilidad del suelo que compone la cortina.

La reducción del factor de seguridad con el descenso del nivel del agua se muestra en la figura 5.

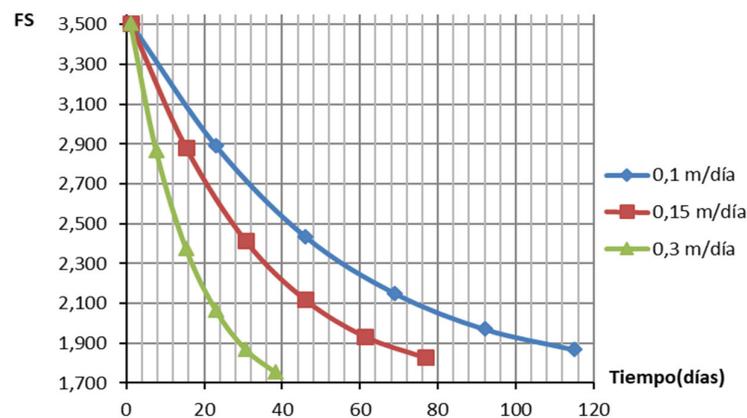


Figura 5. Comportamiento del factor de seguridad durante el desembalse rápido en la presa La Ruda.

En la figura 5 se observa que durante la condición de flujo transitorio el factor de seguridad se reduce a razón de 46,8% para 0,1 m/día ;47,9% para 0,15 m/día y 50% para 0,3 m/día. Al igual que en la presa Canasí, la razón de reducción del FS aumenta con la velocidad de desembalse y su valor al final del mismo, disminuye cuando el tiempo es menor para las condiciones establecidas. En este caso, no se observan valores de factor de seguridad inferiores a 1, por lo que no hay una probabilidad alta de falla del talud producto del desembalse rápido con las velocidades estudiadas.

PRESA JARUCO

Para este caso la presa tiene inicialmente el nivel de aguas normales (NAN) con altura de 26,5 m y se reduce su nivel hasta el de aguas muertas (NAM) a 9,5 m, con las velocidades definidas en la tabla 2. En la figura 6 se muestran las variaciones al inicio y al final de cada uno de los tiempos de desembalse rápido definidos y las superficies de falla correspondientes.

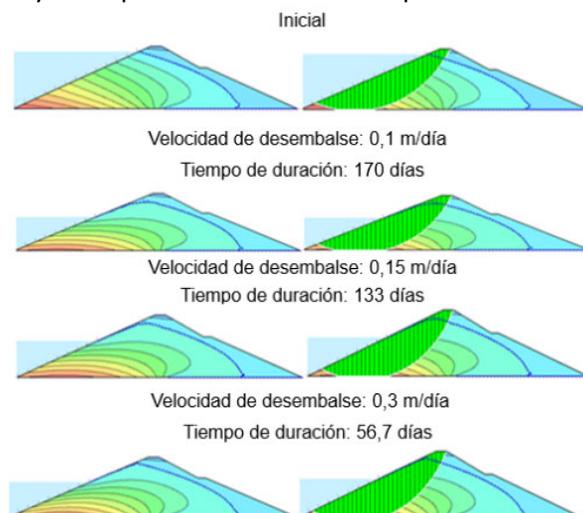


Figura 6. Líneas de corriente superior al inicio y al final del desembalse para cada velocidad definida con su correspondiente superficie de falla para la presa Jaruco.

En la figura 6 se observa el mismo comportamiento que en los casos anteriores, mostrados en las figuras 2 y 4. La línea de corriente superior no baja a la misma velocidad que lo hace el nivel de agua en el embalse, producto de la baja permeabilidad del suelo, lo que provoca que las presiones de poros no se disipen en su totalidad, afectando los valores del factor de seguridad. Este efecto se muestra en la figura 7.

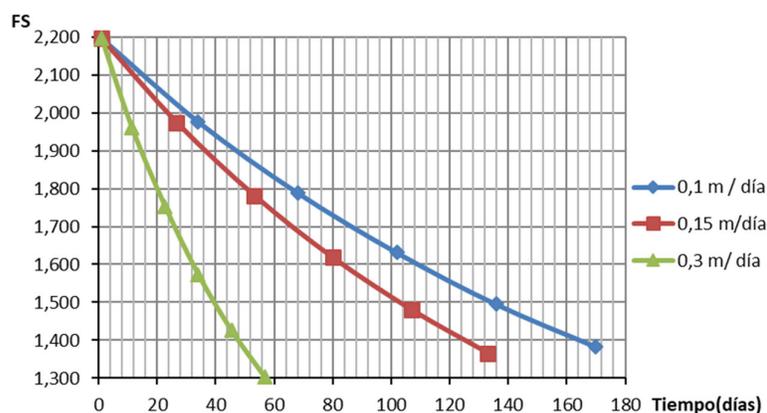


Figura 7. Comportamiento del factor de seguridad durante el desembalse rápido en la presa Jaruco.

En la figura 7 se observa que durante la condición de flujo transitorio el factor de seguridad se reduce a razón de 37,02% para 0,1 m/día; 37,79% para 0,15 m/día y 40,62% para 0,3 m/día. En correspondencia con los casos anteriores, mostrados en las figuras 4 y 6, la razón de reducción del FS

aumenta con la velocidad de desembalse y su valor al final del mismo, disminuye cuando el tiempo es menor para las condiciones establecidas. En este caso, no se observan valores de factor de seguridad inferiores a 1, por lo que no hay una probabilidad alta de falla del talud producto del desembalse rápido.

05 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el análisis del desembalse rápido en presas de tierra considerando el flujo de agua transitorio en suelos parcialmente saturados regida por la ecuación de Richards obtenida a partir de la ley de Darcy, se emplean velocidades de desembalse rápido de 0,1 m/día; 0,15 m/día y 0,3 m/día debido a que se ajustan a una mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos tales como sequía intensa o cambios de operación en las presas.

En las cinco presas analizadas las condiciones de flujo transitorio provocan que la variación de la succión en el suelo a partir de la conductividad hidráulica modifique el factor de seguridad en cada etapa durante el período analizado. Obteniéndose para las velocidades de 0,1 m/día y 0,15 m/día una reducción superior al 37% para todos los casos y para la velocidad de 0,3 m/día se obtiene una reducción superior al 40% en todos los casos analizados.

En la presa Canasí algunos de los factores de seguridad obtenidos en la modelación son menores a la unidad, lo que implica que hay una probabilidad alta de falla del talud producto a un desembalse rápido. Sin embargo, en las presas La Ruda y Jaruco los valores de factores de seguridad obtenidos en el análisis se encuentran por encima de la unidad, por lo que sus taludes no presentan riesgo de fallas para las condiciones analizadas.

Se recomienda ampliar este estudio a otras presas de tierra o para condiciones de desembalse diferentes a las analizadas en esta investigación.

04 REFERENCIAS

- Armas R. y Horta E.** (1987). "Presas de Tierra". Ingeniería Hidráulica, ISBN 978-959-07-1141-1, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Boushehrian A., Rezaee A. and Vafamand A.** (2017). Studying the Effect of Horizontal Drains on Stability of Heterogeneous and Homogeneous Earth Dams during Rapid Drawdown Condition. Journal of Structural Engineering and Geotechnics, 7(1), 31–45. ISSN (impreso) 2476-5465. Irán.
- Flores I.** (2019). Modificación de las pendientes de los taludes en presas de tierra bajo condiciones de saturación parcial. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría".
- Flores I., Tristán J. y Haramboure Y.** (2020). Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados. Ingeniería y Desarrollo, 38(1), 19. ISSN 2145-9371. Colombia
- Haramboure Y., Flores I. y Tristán J.** (2021). Efecto de desembalse en la estabilidad de presas de tierra: dos casos de estudio en Cuba. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XLII (1), 42–53. ISSN 1815–591X. Cuba.

- Jia G., Zhan L., Chen Y. and Fredlund D.** (2009). "Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels". *Engineering Geology*, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.003>. Estados Unidos.
- López A.** (2019). Estudio del comportamiento de una presa en tierra durante desembalse rápido. Caso: Presa Mancilla en Colombia. XVI Pan- American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Doi:10.3233/STAL190234
- Sherard J.** (1953). "Influence of Soil Properties and Construction Methods on the Performance of Homogeneous Earth Dams,". Technical Memorandum 645, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Isaida Flores Berenguer <https://orcid.org/0000-0001-8492-0928>

Realizó el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la búsqueda de información, la caracterización de los suelos considerados en el estudio, el análisis de resultados de la modelación computacional y la revisión del documento final.

Yoermes Glez Haramboure <https://orcid.org/0000-0001-8613-6264>

Participó en el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la búsqueda de información, así como en el análisis de resultados y la redacción del trabajo. Además, en la revisión del documento final.

Jany Leidys Días Acosta <https://orcid.org/0000-0002-7036-0744>

Participó en el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la elaboración de los modelos computacionales y su ejecución, así como en el análisis de resultados.

Jenny García Tristá <https://orcid.org/0000-0003-3072-8011>

Participó en el procesamiento de los datos de suelos, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación, en la búsqueda de información y en la revisión del documento final.