

# Estudio del comportamiento de una presa en tierra durante desembalse rápido. Caso: Presa Mancilla en Colombia

Germán TAPIA<sup>a</sup> and Gloria BELTRÁN<sup>a,1</sup>

<sup>a</sup>*Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola*

**Resumen.** Una condición crítica en la estabilidad de las presas en tierra es el desembalse rápido que ocurre cuando el nivel de agua en el reservorio desciende más rápido que la disipación de la presión de poros en el talud aguas arriba de la presa. Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento ante desembalse rápido de la presa de tierra de Mancilla, construida para suministrar agua a una población cercana a la capital colombiana. Se estudia la influencia de cambios en el nivel de agua, en la presión de poros, en la tasa de salida del agua y se evalúa su relación con la estabilidad de la presa. Para ese propósito, se realizan simulaciones numéricas en 2D y 3D, mediante elementos finitos, utilizando la información disponible sobre el entorno geotécnico-geológico, la geometría de la presa y las propiedades de los materiales. Para evaluar las presiones de poros en la presa, se cuenta con registros históricos de piezómetros de cuerda vibrante en diferentes puntos del terraplén, medidos durante episodios de desembalse. La estabilidad se evalúa mediante el factor de seguridad en un análisis de flujo transitorio acoplado para un enfoque no drenado. Luego, las predicciones calculadas se validan con los registros de presión medida para garantizar que el análisis proporcione una solución coherente y razonable. Finalmente, se construyen las curvas de operación en términos del factor de seguridad como una función de la velocidad en condiciones de extracción; estas curvas darían una idea del nivel de riesgo que se enfrentaría. Se espera que, con los resultados de este estudio, el operador de la presa pueda regular la apertura de las válvulas para mantener la estabilidad de la presa dentro de niveles aceptables de seguridad durante las temporadas secas.

**Palabras Clave.** Desembalse rápido, presa de tierra, presión de poros, análisis numérico.

## 1. Introducción

Uno de los modos o mecanismos de falla en presas de tierra está identificado como desembalse rápido, el cual corresponde a bajar el nivel de agua en el reservorio más rápido que lo que puede disipar las presiones de poros en la zona de aguas arriba de una presa. Esto puede generar la inestabilidad de la cara del talud expuesta al agua, con daños potenciales por caída de material hacia las zonas de entrada o bocatomas y/o dejando zonas débiles en la presa que posteriormente pueden fallar. Es importante estudiar este

---

<sup>1</sup> Autor de correspondencia, Gloria Beltrán, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola; E-mail: gibeltranc@unal.edu.co.

tipo de falla para embalses construidos en tierra o en estructuras de materiales naturales, los cuales presentan cambios en fases de permeabilidad.

La presión de poros es uno de los parámetros más importantes para evaluar la seguridad de una presa, pues ayuda a determinar la línea de agua dentro de los materiales que conforman la presa, asociado a sus propiedades de permeabilidad y a las condiciones de frontera de drenaje [1].

El análisis de las condiciones del embalse, en cuanto a factores de seguridad y al tiempo de desembalse rápido, involucra el manejo de riesgo para la toma de decisiones y para el mantenimiento del embalse como medida preventiva, organizando y definiendo estratégicamente su intervención [2].

Dada la variabilidad climática, es común afrontar decisiones de desembalse rápido en presas de tierra, ya sea para el suministro de agua en épocas de sequía, o para el control de desbordamientos en épocas de lluvia. En Colombia, estos ciclos son cada vez más recurrentes, lo que requiere que los organismos encargados del abastecimiento de agua estén preparados para afrontar posibles riesgos asociados con estos fenómenos, en especial en las estructuras hidráulicas.

Por ello, es necesario aproximarse a las variaciones del Factor de Seguridad – FS, en función de la disminución de la tabla de agua en el tiempo, o de su velocidad, para que el operador pueda manejar el embalse bajo un marco de las condiciones de riesgo que esté dispuesto a asumir.

En este trabajo se evalúa el caso real de la presa en tierra Mancilla, ubicada cerca de la capital colombiana, en un entorno complejo debido a: el contraste entre suelo y roca a nivel de la cimentación, una sección transversal de cuerpo de presa no homogénea por la diversidad de materiales presentes. Se simula numéricamente un proceso de desembalse rápido en 2D y en 3D, el cual se puede calibrar con lecturas piezométricas reales medidas durante eventos de desembalse. A partir de esto, se simulan escenarios con velocidades diferentes de abatimiento, de modo que se pueda hacer análisis y pronósticos de estabilidad en función del FS. Finalmente se proponen curvas de operación para la presa estudiada, útiles para la toma de decisiones en función de los rangos de seguridad que el operador del sistema esté dispuesto a asumir, en épocas en las cuales se requiera suministrar agua a la población.

## 2. Concepto de desembalse rápido

Cuando el nivel de agua en un embalse desciende, las presiones intersticiales, tanto en los suelos de fundación como en el cuerpo de presa, en general también descienden, pero pueden hacerlo de manera más lenta que el propio nivel del embalse. Cuando esto ocurre, se produce la condición denominada desembalse rápido, el cual puede explicarse mediante la Figura 1 [3].

La posición del nivel de agua MO (altura H) provee la condición inicial del talud CBO. La presión de poros del agua en el talud es positiva bajo una línea de presión cero ( $P_w=0$ ); sobre esta línea, la presión de poros es negativa. Un desembalse de intensidad HD lleva el agua libre a un nuevo nivel M'N'O' durante un intervalo de tiempo tD. Este descenso en el nivel de agua implica:

- Un cambio en la condición de esfuerzos totales en el talud. Los esfuerzos iniciales hidrostáticos (OAB contra la superficie del talud y M N B C contra el fondo) cambian a O'A'B y M'N'BC. La diferencia de esfuerzos se representa en la Figura 1b. La parte baja del talud O'B queda sujeta a un esfuerzo de

relajación de intensidad constante ( $\Delta\sigma = H_D * \gamma_w$ ); en la parte superior (O'O) queda una variación lineal de distribución de esfuerzos. La superficie horizontal del fondo (CB) experimenta un decrecimiento uniforme de esfuerzos de intensidad  $H_D * \gamma_w$ .

- Un cambio en las condiciones hidráulicas de fronteras. En este nuevo estado, la presión de poros contra el talud es dado por la distribución hidrostática O'A'B; sobre el fondo, está dado por la presión de agua  $p_w = (H - H_D) * \gamma_w$ .

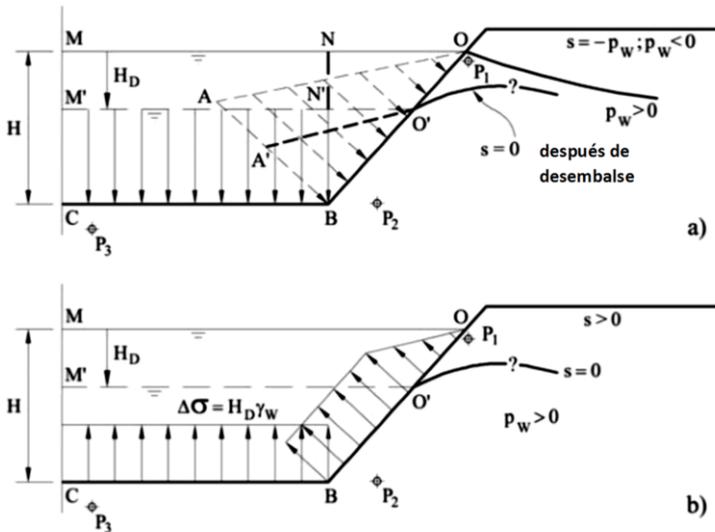


Figura 1. Desembalse rápido – Pinyol et al [3].

### 3. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se siguió una metodología compuesta por cinco pasos, los cuales se describen en detalle en los numerales siguientes.

#### 3.1. Paso 1. Caracterización del caso de estudio

La Presa sobre la Quebrada Mancilla corresponde a una estructura en tierra, compuesta de núcleo de arcilla, espaldones en materiales granulares y cimentada sobre suelo hacia la margen izquierda y en roca hacia la margen derecha, a una cota media de 2610 msnm. La estructura posee un ancho de corona de 10 m, utilizada como carreteable; tiene una altura de 11.5 m y una longitud de 75 m. En las fotografías de la Figura 2, se aprecian aspectos de la presa durante construcción y operación.

Dentro de la presa se encuentran instalados 6 piezómetros de hilo vibrátil con presión máxima de trabajo de 700 kPa, identificados como P1 a P6 en la Figura 3. La empresa operadora ha efectuado mediciones durante los años 2015, 2016 y 2017 en eventos de desembalse y llenado, recopilando en total 149 datos: 89 durante desembalse y 60 durante llenado.



Figura 2. Presa Mancilla – Izq. En construcción.; Der. En operación.

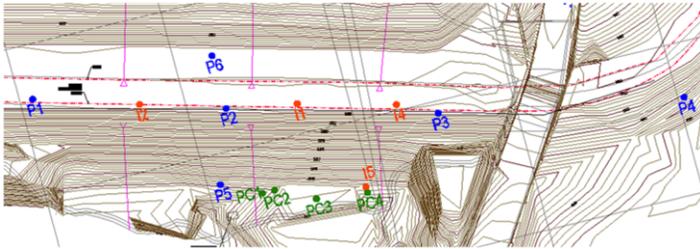


Figura 3. Presa Mancilla – Ubicación de piezómetros.

Las velocidades de descenso varían entre .003 m/día y 0.03 m/día, dependiendo de la ubicación del piezómetro. El piezómetro No. 6, ubicado hacia aguas arriba, registra velocidades comprendidas entre 0.001 m/día y 0.10 m/día con un valor medio de 0.03 m/día. Estos valores contrastan con las velocidades de descenso del agua en el embalse, la cual se registró entre 0.4 m/día y 1 m/día; así, se estima que es posible desocupar el embalse entre 9 días y 15 días. Es importante indicar que estas velocidades evidentemente son consideradas dentro de los rangos de desembalse rápido reportados en los casos de estudio revisados [4].

3.2. Paso 2. Definición del modelo y variables geotécnicas

En la Figura 4, se ilustra el modelo de distribución de materiales en una sección transversal, definido a partir de estudios y diseños de la Presa realizados históricamente [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13]. Adicionalmente, en la Tabla 1 se incluyen las propiedades geotécnicas de los materiales presentes en la zona de presa.

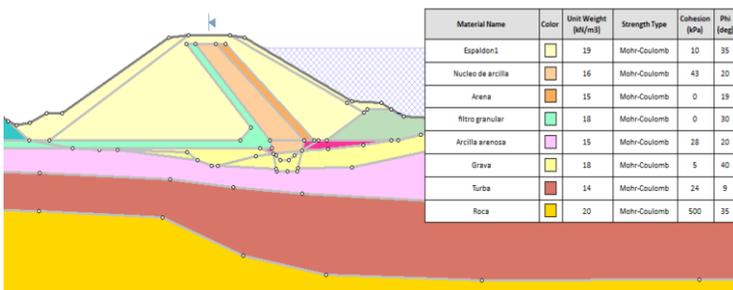


Figura 4. Modelo geotécnico – Presa Mancilla.

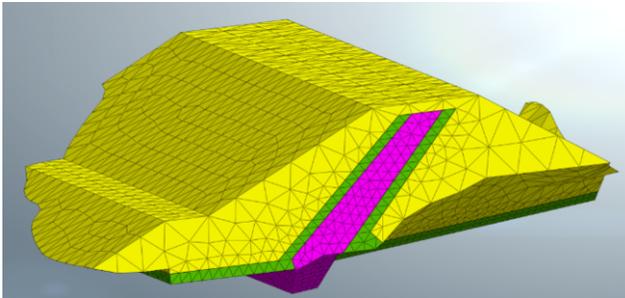
**Tabla 1.** Propiedades de los materiales de la presa Mancilla.

Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	k (m/s)
Espaldón	10	35	19	$1 \times 10^{-7}$
Núcleo	43	20	16	$1 \times 10^{-12}$
Filtro	0	30	18	$1 \times 10^{-4}$
Grava	5	40	18	$1 \times 10^{-5}$
Arcilla arenosa	28	20	15	$2 \times 10^{-8}$
Turba	24	9	14	$3 \times 10^{-7}$
Roca	500	35	20	$1 \times 10^{-12}$

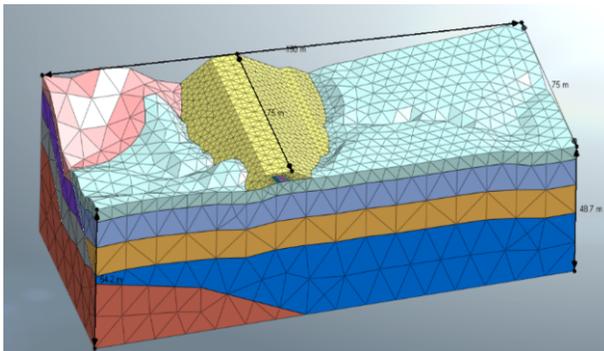
### 3.3. Paso 3. Construcción del modelo tridimensional

La literatura técnica recomienda el uso de modelos numéricos para el análisis de drenaje cuando existe fundaciones heterogéneas, desembalses permanentes y flujos no estables con zonas saturadas y no saturadas o redes de flujo transitorio, los cuales deben ser calibrados para ajustarse a condiciones de seguridad determinadas [14].

Para el modelado 3D del caso de estudio, se utilizó la herramienta computacional MIDAS GTSNX, con la cual se obtuvieron las representaciones mostradas en las Figuras 5 y 6, del modelo de presa con dimensiones de 190 m por 75 m.



**Figura 5.** Modelo tridimensional de la presa Mancilla: espaldón - amarillo, filtro - verde y núcleo – morado.



**Figura 6.** Modelo tridimensional de la zona de presa.

### 3.4. Paso 4. Simulación de drenaje y análisis de estabilidad

Aunque las experiencias de desembalse consideran como razonables tiempos máximos de 60 días, en este trabajo se analizan tiempos menores y mayores, para evaluar la sensibilidad de la velocidad de abatimiento sobre el factor de seguridad. En total se consideran los 8 escenarios de desembalse: tres con tasas continuas y cinco con tasa variable en intervalos de tiempo, según se indica en la Tabla 2 y en la Figura 7.

Tabla 2. Tasas de análisis de desembalse.

Tasa	Velocidad promedio (cm/h)	Descenso diario máximo (m)	Día final	Cota final (msnm)	Tasa continua	Tiempo de espera (días)
1	4.17	1.00	8	2612.5	Si	Ninguno
2	1.25	0.30	28	2612.7	Si	Ninguno
3	2.50	0.60	14	2612.7	Si	Ninguno
4	0.31	1.00	106	2612.5	No	1x15
5	0.47	1.00	71	2612.5	No	1x10
6	0.93	1.00	36	2612.5	No	1x4
7	0.49	0.30	67	2612.4	No	3 x 5
8	0.34	0.10	93	2612.4	No	Variable

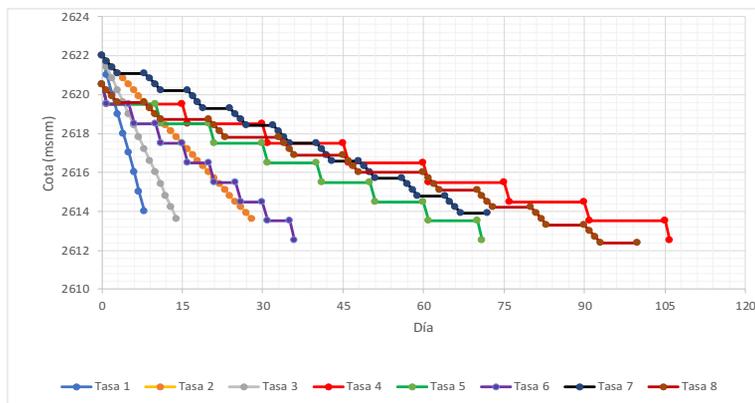


Figura 7. Planes de abatimiento considerados para el análisis.

En principio, se realizó una modelación bidimensional con Slide7.0, para evaluar la estabilidad de los taludes de la presa e identificar tasas que puedan resultar críticas. Paralelamente, se realizó la modelación 3D con varias tasas de desembalse, para estimar la cabeza total de energía en varios puntos ubicados al interior de la presa, según se muestra en la Figura 8. Cabe mencionar, que el punto de referencia 7 resulta útil para calibrar las estimaciones del modelo, puesto que se ubica a la misma profundidad del piezómetro 6.

Teniendo en cuenta que las soluciones más satisfactorias, en cuanto a la distribución de la presión del agua de los poros, se obtienen considerando la deformación del suelo, se efectuaron análisis numéricos semi acoplados para poder evaluar las condiciones de

desplazamiento en el tiempo durante el desembalse rápido, involucrando escenarios adicionales de variación de módulos de los materiales de la presa.

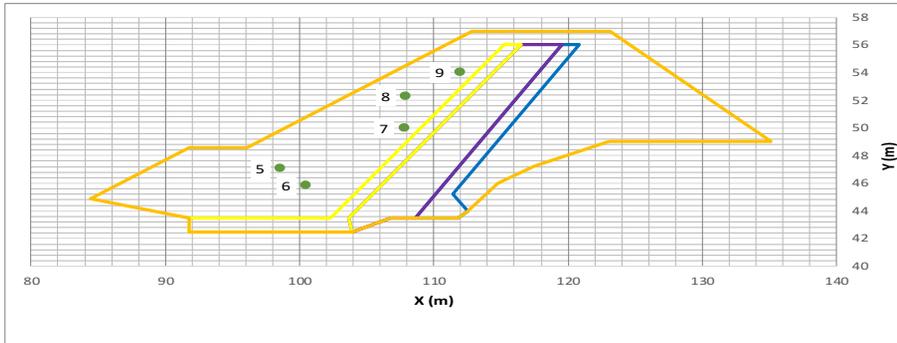


Figura 8. Ubicación de puntos de análisis al interior de presa.

### 3.5. Paso 5. Ajuste y definición de curva de operación

Con base en los resultados obtenidos en las modelaciones, se plantean los lineamientos geotécnicos recomendados para la curva de operación. Estos lineamientos están ligados directamente con la velocidad de desembalse necesaria para que el operador tome las decisiones sobre el riesgo que asumirá, ante la labor técnica de apertura de sus válvulas de trabajo y sus efectos frente al FS y a las deformaciones esperadas en la presa.

## 4. Resultados

Se encontró que, al aplicar las tasas continuas 1 y 3, se obtienen tiempos de desembalse total de 8 días y 14 días respectivamente, con Factores de Seguridad de 0.99 y 1.1; esto implica que velocidades de desembalse mayores a 0.60 m/día presentan problemas de estabilidad si se efectúa el abatimiento continuo. Por el contrario, con la aplicación de la tasa 6 (0.93 cm/h), con secuencias de 1 día de abatimiento y 4 de recuperación, se logra el descenso hasta el mínimo nivel de operación en 36 días con un FS de 1.6.

Comparando las presiones estimadas al interior de la presa y las presiones medidas durante desembalse, se obtuvieron resultados bastante concordantes según se aprecia en la Figura 9, lo cual permite validar las estimaciones numéricas.

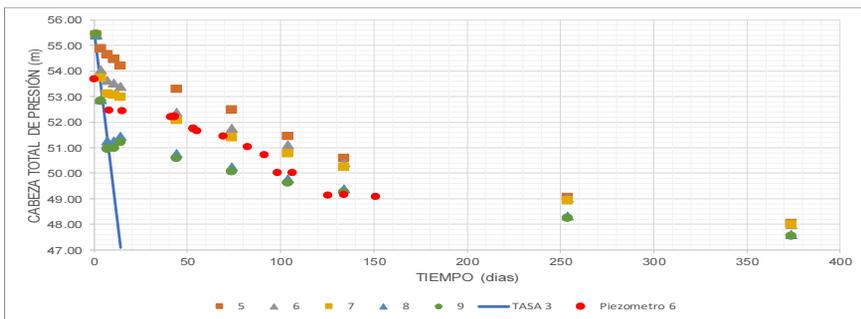


Figura 9. Presiones estimadas al interior de presa en los puntos de referencia.

Por su parte, los análisis de deformación realizados, permitieron estimar los patrones ilustrados en la Figura 10, donde al aplicar la tasa de desembalse 3 (14 días) se presentan deformaciones altas hacia la zona de la ataguía y lateralmente hacia donde existe mayor material de terraplén, reflejando el comportamiento a mediano plazo.

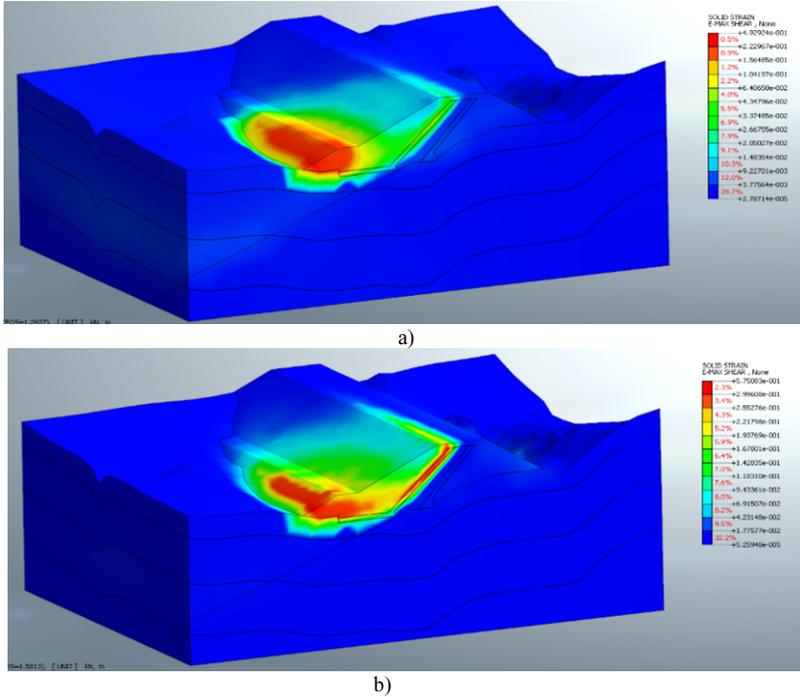


Figura 10. Deformaciones por corte aplicando a) tasas 3 y b) tasa 5.

Con la tasa 5 se presentan deformaciones menores en la ataguía, pero se evidencian deformaciones altas hacia el contacto entre espaldón y núcleo o la zona de transición. El abatimiento con esta tasa se daría en 71 días, lo cual reflejaría el comportamiento a largo plazo, donde ya se involucra, en mayor medida, el material de la zona de transición en el proceso deformacional.

## 5. Conclusiones

Al observar una buena relación entre las estimaciones del modelo y los datos medidos en campo durante eventos reales de desembalse, se validan las tasas de desembalse y los parámetros adoptados de los suelos, así como las estimaciones de presiones al interior de la presa.

En concordancia con los análisis de drenaje, de estabilidad y de deformaciones, se recomienda al operador, en el caso de requerir mayor abastecimiento de agua a la población y contando con buenos niveles de recarga desde la Quebrada Mancilla, las siguientes opciones:

- a) Asumir la tasa 6 equivalente a 0.93 cm/h, con secuencias de 1 día de abatimiento y 4 de recuperación, logrando el descenso hasta el mínimo nivel de operación en 36 días.
- b) Asumir una tasa de abatimiento continuo, como la 2 (1.25 cm/h), con FS mínimos del orden de 1.45. Esta podría ser una alternativa cuando se desee manejar una tasa de extracción continua ante alguna emergencia, con lo cual se logra el abatimiento en un tiempo de un mes.

En aquellos casos de sequía, donde no se logre una buena recuperación por bajos niveles en la Quebrada, se recomienda asumir:

- a) La tasa 7 (0.49 cm/h), con secuencias de 3 días de abatimiento por 5 de recuperación, alcanzando la cota mínima de operación en 67 días.
- b) La tasa 5 (0.47 cm/h) con secuencias de 1 día de abatimiento y 10 de recuperación, logrando el abatimiento a la cota mínima en 71 días.

Las tasas de abatimiento aplicadas en tiempos cortos o menores a 14 días pueden llegar a ser críticas, por lo que no se recomienda la aplicación de tasas continuas superiores a 2.5 cm/h, pues con ellas se obtienen FS menores a 1.1.

## Referencias

- [1] DEFRA - Department for Environment for Food and Rural Affairs, Environment Agency. U.K. Modes of Dam failure and Monitoring and measuring techniques. Project Number: SC080048. August 2011.
- [2] FEMA - Federal Emergency Management Agency – FEMA. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. January, 2015.
- [3] Pinyol N., Alonso E. and Olivella S. Rapid drawdown in slopes and embankments. Water Resources Research, Vol. 44, W00D03, doi:10.1029/2007WR006525. 2008.
- [4] Alonso E. E., y Pinyol N. M., (2016) Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases. Water Science and Engineering. Recuperado de <http://www.waterjournal.cn>.
- [5] Álvarez R. (2004). Estudio de exploración geotécnica Presa Mancilla. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [6] Consultores Civiles e Hidráulicos Ltda. (1993) Estudio de alternativas para la solución óptima de abastecimiento de agua. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [7] Consorcio Aguas de Mancilla, (2010). Construcción para la terminación del Embalse Mancilla. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [8] González, Á. J. (1995). Revisión de la capacidad del embalse y de dimensionado de obras de captación y vertimiento. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [9] INGETEC S.A. (2001). Estudio de ampliación de la capacidad de almacenamiento del agua cruda de la EAAF. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [10] IRH Ltda., (2009). Estudios y diseños de las obras Complementarias necesarias para la terminación y puesta en marcha del Embalse Mancilla. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [11] Nivia, A. (2005) Estudios suplementarios para el embalse. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [12] Sanmiguel, A., (2000). Estudios complementarios para la culminación de la presa y Embalse Mancilla. Informe No. 1 y Final. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [13] SODEIC Ltda. (1992). Diseño presa y embalse Mancilla. Empresa de Aguas de Facatativá.
- [14] Mississippi Department of Environmental Quality 2010 Annual Report. <https://www.mdeq.ms.gov/wp-content/uploads/2017/06/2010AnnualReport.pdf>