

Dam break analysis in Andean mountainous areas using numerical simulation in Iber

Paulina Elizabeth Suárez-Naranjo, Patricio Rubén Ortega-Lara & Patricia Lorena Haro-Ruiz

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. paulina.suarez@epn.edu.ec, patricio.ortega@epn.edu.ec, patricia.haro@epn.edu.ec

Received: February 24th, 2025. Received in revised form: September 8th, 2025. Accepted: September 15th, 2025.

Abstract

Currently, dams are subject to new requests such as overtopping or dam break. In Andean cities above 2800 meters above sea level the topographic, hydrological and geological conditions differ from those in flatter regions. This study proposes the numerical simulation in the Iber software of a dam break situated in the central Andes of Ecuador. The passage of the flood wave downstream of the dam will be analyzed to identify potential impact zones in the urban area and civil infrastructure, considering clear water and clear water with sediment transport. Additionally, a hazard and impact assessment will be conducted using two international codes: the Spanish code RD9/2008 and the code from the U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA). The results obtained show a similarity with other studies regarding the breach hydrograph with and without sediments; Furthermore, the impact zones and the differences in the analyzed hazard codes can be observed.

Keywords: Iber; dam break; sediment transport; RD9/2008; FEMA.

Análisis de rotura de presas en zonas montañosas Andinas mediante simulación numérica en Iber

Resumen

Actualmente las presas están sujetas a nuevos escenarios como el sobrevvertido por coronación o la rotura de la presa. En ciudades andinas que se encuentran por encima de los 2800 m.s.n.m. las condiciones topográficas, hidrológicas y geológicas son diferentes con otras regiones más planas. Este estudio plantea la simulación numérica en el software Iber de la rotura de una presa implantada en los andes centrales del Ecuador. Se analizará el tránsito de esta crecida hacia aguas abajo de la presa, a fin de identificar posibles zonas de afectación a la zona urbana e infraestructura civil considerando agua clara y agua clara con transporte de sedimentos. Además, se realizará un análisis de peligrosidad y grado de afectación utilizando dos códigos internacionales, los cuales son: el código español RD9/2008 y el código de la Agencia Federal para el manejo de Emergencias norteamericano FEMA. Los resultados obtenidos muestran similitud con otros estudios en cuanto al hidrograma de rotura con y sin sedimentos; adicionalmente se puede evidenciar las zonas de afectación y las diferencias de los códigos de peligrosidad analizados.

Palabras clave: Iber; rotura de presa; transporte de sedimentos; RD9/2008; FEMA.

1 Introducción

Las presas son fundamentales para el desarrollo de la sociedad, siendo estructuras de gran importancia para el abastecimiento de agua potable, sistemas de irrigación, control de inundaciones, generación hidroeléctrica y recreación. En este sentido, un correcto funcionamiento de la

presa durante toda su vida útil es fundamental para garantizar el acceso al agua para diversos propósitos, lo cual está en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por los estados miembros de las Naciones Unidas. Las regulaciones y reglamentaciones actuales para el diseño, construcción y operación de las presas han sufrido cambios, adecuándose a las condiciones hidrológicas

actuales. Estos escenarios al ser más exigentes también han ocasionado una re-evaluación de la capacidad de descarga de aliviaderos y órganos de desagüe de presas ya construidas [1,2]. En España, las Normas Técnicas de Seguridad de grandes presas y embalses (NTS, aprobadas el 14 de abril del 2021 mediante Real Decreto 264/2021, BOE-A-2021-5867) establecen exigencias de seguridad mínimas que deben cumplir las presas actualmente.

Fenómenos como el sobrevvertido por coronación en una presa [3-5] o la rotura de presas considerando aterramiento [6] son fenómenos que deben ser considerados actualmente durante las fases de diseño o de evaluación de una presa existente. Estudios realizados en los últimos cinco años [6-8] proponen metodologías para el análisis de la rotura de una presa y balsas mediante el empleo de modelación numérica. Uno de estos estudios propone una metodología nueva para el análisis de rotura de presas mediante simulación numérica unidimensional y bidimensional, demostrando que existe notables diferencias entre analizar la rotura de una presa considerando el tránsito de un evento hidrológico y el de considerar también el aterramiento del material y la dinámica del sedimento aguas abajo del embalse.

Otros estudios de inundabilidad han analizado la influencia de las Zonas de Inundación Peligrosa y de la Vía de Intenso Desagüe en la delimitación de la Zona de Flujo Preferente [9]. En un contexto acorde a las nuevas tecnologías, estudios actuales proponen el empleo de técnicas de supercomputación y machine learning junto con un nuevo modelo de transporte de sedimentos para la calibración de un modelo numérico bidimensional en un embalse [10].

En el caso específico de Ecuador, este país posee condiciones hidrometeorológicas, topográficas y sísmicas diferentes dada su posición geográfica. Actualmente, se están construyendo presas de materiales sueltos en zonas montañosas andinas con cotas por encima de los 3800 m.s.n.m., y es necesario profundizar en el análisis de fenómenos como una eventual e hipotética rotura de presa o el desbordamiento del nivel del embalse por coronación. De los estudios analizados sobre rotura de presas muy pocos consideran el aterramiento de material en el embalse, el transporte de material de fondo, y su influencia en el hidrograma durante la rotura.

En 1993, en la zona sur del Ecuador, específicamente en el cantón Paute, sector La Josefina (Figs 1 y 2), se produjo un aluvión de tierra (por fallas geológicas) sobre el cauce natural del río Cuenca que obstruyó la unión de los ríos Paute y Jadán. Este aluvión generó un dique artificial de tierra que almacenó 200 millones de metros cúbicos de agua. La rotura y el posterior tránsito de esa crecida extraordinaria, ocasionó la muerte y desaparición de aproximadamente 150 personas, 7,000 personas damnificadas, múltiples daños a zonas pobladas y cultivos; y pérdida de animales de granja [11].

Estudios previos de roturas de presas en Ecuador [12-15] han simulado numéricamente la rotura de una presa, considerando agua clara sin transporte de sedimentos. Herbozo et al. [16] realizó un análisis asociado a fenómenos hidrológicos extremos (producto del cambio climático) y su afectación en el diseño de la presa Sube y Baja (Santa Elena, Ecuador), donde fue necesario definir técnicas de adaptación dentro del marco de gestión del riesgo.



Figura 1. Desfogue del río Cuenca por rotura del dique artificial
Fuente: Barreto et al. [17]



Figura 2. Posterior inundación sector la Josefina, Cuenca, Ecuador (29/03/1993)
Fuente: iagua [18].

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es realizar la simulación numérica 2D de la rotura de una presa ubicada en una zona montañosa andina y analizar su propagación aguas abajo de la misma. Además, se analizará las zonas de peligrosidad empleando dos códigos internacionales: el código español RD9/2008 y el código de la Agencia Federal para el manejo de Emergencias norteamericano FEMA. Finalmente, se considerará el transporte de sedimentos de fondo a lo largo de toda la zona de estudio y su efecto en este tipo de cuencas montañosas. Estos estudios, buscan ser un complemento a las fases de diseño y una herramienta útil para la gestión del riesgo y la planificación territorial ordenada.

2 Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

El caso de estudio está ubicado en la zona montañosa central de los Andes en Ecuador (Figs 3 y 4), específicamente en la provincia de Tungurahua. La presa está rodeada por las estribaciones montañosas del volcán Carihuayrazo (5018 m.s.n.m.) sobre una depreciación topográfica denominada Chiquicahua (N 9850154.96; E 748919.21; UTM, 17S). Esta presa actualmente se encuentra en fase de construcción.

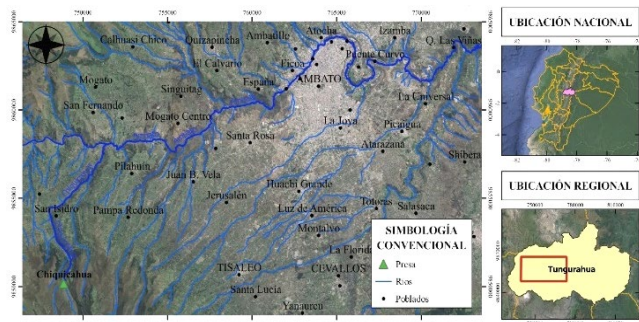


Figura 3. Ubicación de la presa y de la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Sitio de implantación de la presa
Fuente: Banco de Desarrollo del Ecuador [20].

La presa de materiales sueltos cuenta con un núcleo de hormigón asfáltico o bituminoso, compuesto por un agregado de asfalto y minerales mezclados (Fig. 5). La altura total de la presa es de 39.0 m medidos desde la cota 3751.0 m.s.n.m. hasta la cota de coronación de la presa. El nivel máximo de operación de la presa se encuentra en la cota 3788.0 m.s.n.m., y el volumen del embalse útil es de 3.1 hm³ [19]. El propósito de la presa es abastecer de agua potable y riego a varias zonas aledañas.

La ciudad de Ambato es un núcleo urbano consolidado y de gran importancia empresarial. La cota promedio de la ciudad es 2580 m.s.n.m., posee 165 185 habitantes y se ubica a 22 kilómetros de la presa. El lugar de implantación de la



Figura 5. Visualización 3D de la presa y el embalse del proyecto
Fuente: Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua [21].

presa corresponde a páramos de montaña que son extremadamente sensibles al acumular agua y regular los flujos hídricos. Estos medios se forman por los bosques andinos a alturas mayores de 3750 m.s.n.m., su clima es frío a lo largo de todo el año y poseen suelos de origen volcánico. Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgo de Ecuador, Ambato es una de las ciudades que se encuentra en una zona con gran riesgo sísmico y presencia de fallas geológicas activas, donde han ocurrido fuertes terremotos, como el acaecido el 5 de agosto 1949.

2.2 Información base y flujo de trabajo

La información base para el estudio, ha sido obtenida de los organismos gubernamentales del Ecuador; la misma ha sido analizada, tabulada y depurada para disponer de una información confiable; y se detalla a continuación:

- Cartografía a escala 1:50.000 y 1:25.000, perteneciente al Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Modelo Digital del Terreno (MDT) de 3 x 3 m de resolución por píxel proporcionado por SIG Tierras del Ministerio de Agricultura de Ecuador.
- Registros meteorológicos de las cuencas adyacentes a la zona del estudio. Esta información fue obtenida a través del Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua (HGPT) y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Estudios técnicos a nivel de diseño definitivo del proyecto facilitados por parte del HGPT.

La Fig. 6 indica el flujograma de trabajo de las actividades realizadas en el presente estudio, para llevar a cabo las simulaciones numéricas en el programa Iber V2.6

2.3 Modelación numérica

Para el análisis de la rotura de la presa se utilizó el modelo numérico bidimensional Iber V2.6 [22,23]. que analiza el efecto de rotura de presa mediante la formación de una brecha, el tránsito de la crecida aguas abajo en el cauce natural del río y el modelo de transporte de sedimentos con

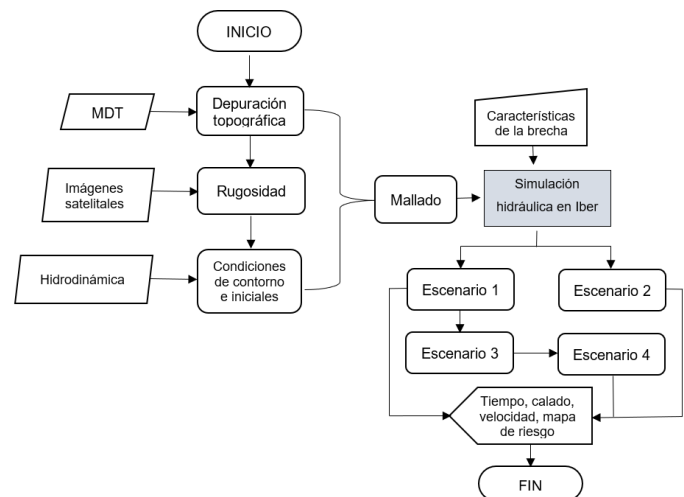


Figura 6. Flujograma de trabajo
Fuente: Elaboración propia

lecho móvil [24,25], la ecuación empleada para el transporte de sedimentos con fondo móvil fue la propuesta por Meyer-Peter y Müller [26].

La extensión de la zona de estudio es de 22 km desde la presa (3788.0 m.s.n.m.) hasta la zona urbana de la ciudad de Ambato (2580 m.s.n.m.). Luego de esto, se tiene un tramo encañonado (no considerado parte del dominio computacional). Se utilizó un Modelo Digital del Terreno MDT de 3 x 3 m de resolución por píxel, el cual mediante el programa SAGA se extrajo la red de drenaje para conocer el recorrido del cauce y posteriormente sea interpretado en el software Iber en formato .asc. El dominio computacional consta de 2 058 000 elementos, la malla es no estructurada. Para optimizar el tiempo de cálculo se ha utilizado 5 tamaños de malla distintos: zona del embalse (21 m), presa (3 m), aguas abajo de la presa (9 m), zona rural (15 m) y zona urbana (6 m). Para la asignación de los coeficientes de Manning se utilizó un mapa de uso de suelo a partir del análisis de ortofotografías y de la información base (Fig. 7). Los parámetros utilizados para el sedimento son: $D_{50} = 0.43$ mm, porosidad de 0.4, y ángulo de fricción interna de 0.50. Estos datos de suelo corresponden a la zona del embalse e implantación de la presa [19].

Los escenarios de simulación fueron cuatro, que corresponde a escenarios de funcionamiento normal y extraordinario, considerando agua clara y agua clara con transporte de sedimentos, los cuales se detallan en la Tabla 1.

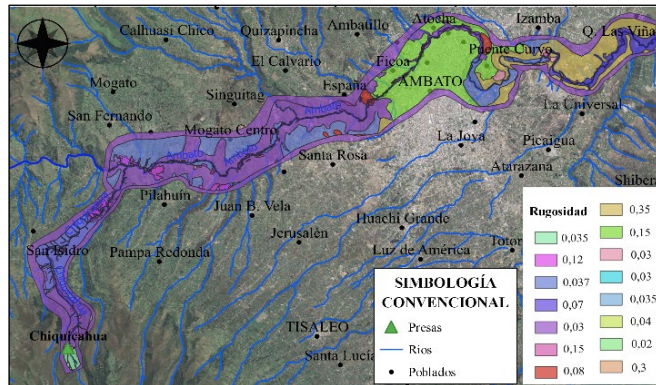


Figura 7. Mapa de uso de suelo con el valor de rugosidad asignado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.
Escenarios de simulación.

Escenario	Descripción
1A	Rotura de presa en su máximo nivel de operación con agua clara, se utiliza el criterio del código español RD9/2008.
1B	Rotura de presa en su máximo nivel de operación con agua clara, se utiliza el criterio del código norteamericano FEMA.
2A	Rotura de presa con avenida hidrológica de 1000 años con llenado completo, se clasifica la peligrosidad en función del código RD9/2008.
2B	Considera transporte de sedimentos de fondo, este escenario ocupa los datos del escenario 2A, más la información referente a los sedimentos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.

Criterios de análisis de peligrosidad código español RD9/2008.

CRITERIO		AFECCIÓN
Calado (m)	Velocidad (m/s)	
1.0	1.0	No grave
> 1.0	> 1.0	Grave

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Criterios de análisis de peligrosidad código norteamericano FEMA.

CRITERIO		AFECCIÓN
Calado (m)	Velocidad (m/s)	
0.9	3.0	Baja
1.4	4.0	Media
> 1.5	> 4.0	Alta

Fuente: Elaboración propia

Para los criterios sobre el análisis de peligrosidad se han utilizado dos normas: (a) norma española RD9/2008 (Tabla 2); (b) norma norteamericana FEMA 2009 (Tabla 3).

3 Resultados

De los resultados obtenidos, se puede evidenciar que existe zonas sin afectación y zonas vulnerables a este evento. El tránsito de la crecida afectaría a la infraestructura civil como: puentes, zona urbana, captaciones de agua y plantas de tratamiento durante los aproximadamente 22 km de recorrido, desde la zona del embalse hasta la salida del área urbana. Considerando las características hidráulicas, en algunos sitios se obtendría calados de 11.0 m, velocidades de hasta 19,0 m/s y números de Froude mayores a 5.0. El tiempo que transcurre desde el inicio de la rotura de la presa y la llegada de la crecida a la zona urbana sería de 48.0 min aproximadamente. La estimación de este periodo de tiempo es importante para gestionar los distintos planes de mitigación y emergencia que se deberían proponer ante una hipotética rotura de la presa. El área rural y urbana afectada sin considerar el cauce normal del río fue de 417.8 ha, de los cuales 90 ha corresponden únicamente a la zona urbana consolidada. La Figs. 8a y 8b muestra los mapas de velocidad y calado para el escenario 1A. Como se puede evidenciar, los rangos de velocidad alcanzarían los 12.0-14.0 m/s con calados de agua de hasta 10.0 m en el cauce principal de la zona urbana.

Para los mapas de peligrosidad el código RD9/2008 considera afección grave y no grave (Fig. 8c), mientras que el código FEMA la afección es baja, media y alta (Fig. 8d). La principal diferencia se encuentra en que el código RD9/2008 cuenta con dos categorías a diferencia del código FEMA que contempla tres categorías de peligrosidad. En cuanto a los rangos de calado y velocidad estos difieren, por ejemplo, la afección “no grave” del código RD9/2008 se presenta para calados de 1 m y velocidades de 1 m/s; mientras que la afección “baja” del código de la FEMA el calado es de 0.9 m y una velocidad de 3 m/s. Se observa en la Fig. 6c que el código RD9/2008 abarca una mayor área de peligrosidad grave en comparación con el código FEMA (Fig. 8d). Esta diferencia de rangos provoca que el Código

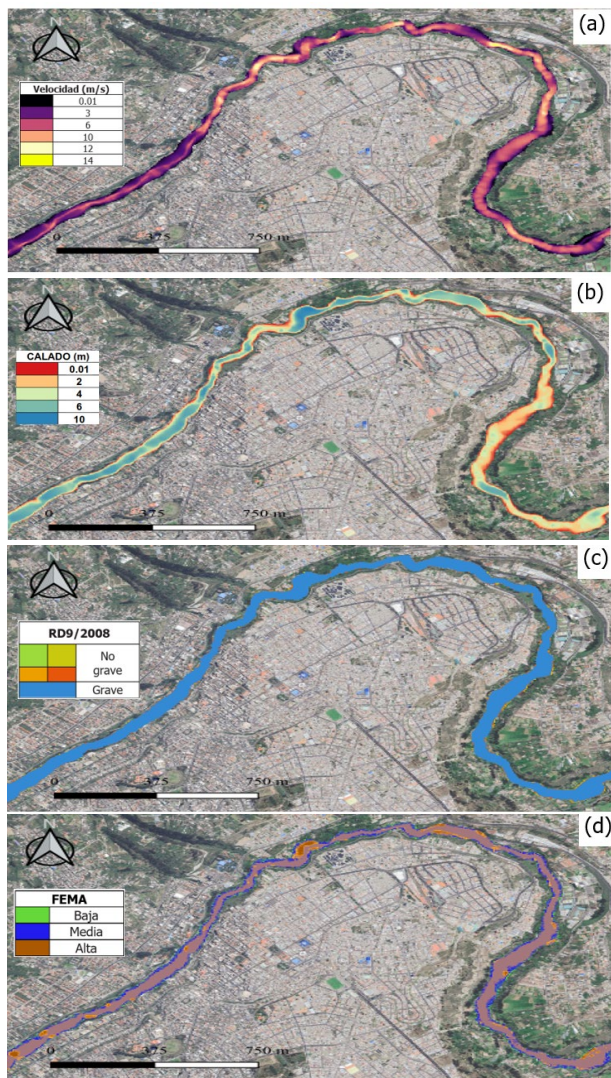


Figura 8. (a) Escenario 1A, mapa de velocidades, zona urbana; (b) Escenario 1A, mapa de calados, zona urbana; (c) Escenario 1A, clasificación de peligrosidad código RD9/2008, zona urbana; (d) Escenario 1B, clasificación de peligrosidad código FEMA, zona urbana; Fuente: Elaboración propia

FEMA categoriza áreas con afección media y el código RD9/2008 lo considerando como afección grave. Tomando en cuenta que, desde el punto de vista de la gestión del riesgo, calados mayores a 1.0 m ya ocasionarían problemas en las zonas urbanas. El código de peligrosidad RD9/2008 muestra ser más claro a la hora de delimitar estas áreas afectadas.

El escenario 2B parte de los mismos parámetros iniciales del escenario 1A, pero se ha incorporado el caudal de máxima crecida. En regiones andinas de alta montaña (cotas superiores a 3000 m.s.n.m.) las áreas de drenaje son menores dado la cercanía a la línea de cumbre de las montañas y la presencia de pajonales andinos cuya función es retener y almacenar agua. En este sentido, el caudal de máxima crecida para un periodo de retorno de 1000 años es de $7.41 \text{ m}^3/\text{s}$ según el estudio hidrológico proporcionado [19]. La rotura de presa se produce con el embalse lleno por donde está circulando un caudal extraordinario, la brecha y el tiempo de

formación de la misma, se determinó mediante las consideraciones de la Guía Técnica Española, dando una duración de 15 minutos y siendo el ancho superior e inferior de la brecha de 86.0 m y 43.0 m respectivamente.

Adicionalmente, se simuló el transporte de sedimentos, con un diámetro medio de partícula de 0.43 mm, el tiempo de simulación para este escenario fue alrededor de 8.5 horas. Se obtuvo los resultados de erosión y sedimentación a lo largo de todo el tramo de análisis, desde el embalse hasta la salida del núcleo urbano. Para la zona cercana al puente vial (punto 1) que está aproximadamente 3 km aguas abajo de la presa, se observa una mayor dinámica entre la sedimentación y la erosión (Fig. 9a). Para la zona urbana los valores de erosión oscilarían entre 1.0 y 2.0 m mientras que los valores de sedimentación alcanzarían valores de hasta 1.5 m. Estos valores de sedimentación en la zona urbana (2580 m.s.n.m.) son mucho menores que en la parte alta del cauce (punto 1) dado que las condiciones de pendiente longitudinal y ancho del río son distintas, evidenciando que gran parte del material se queda depositado en la parte alta de la cuenca (3750 m.s.n.m.). La diferencia de cotas entre la zona de la presa-embalse y la zona urbana es de 1170 m aproximadamente.

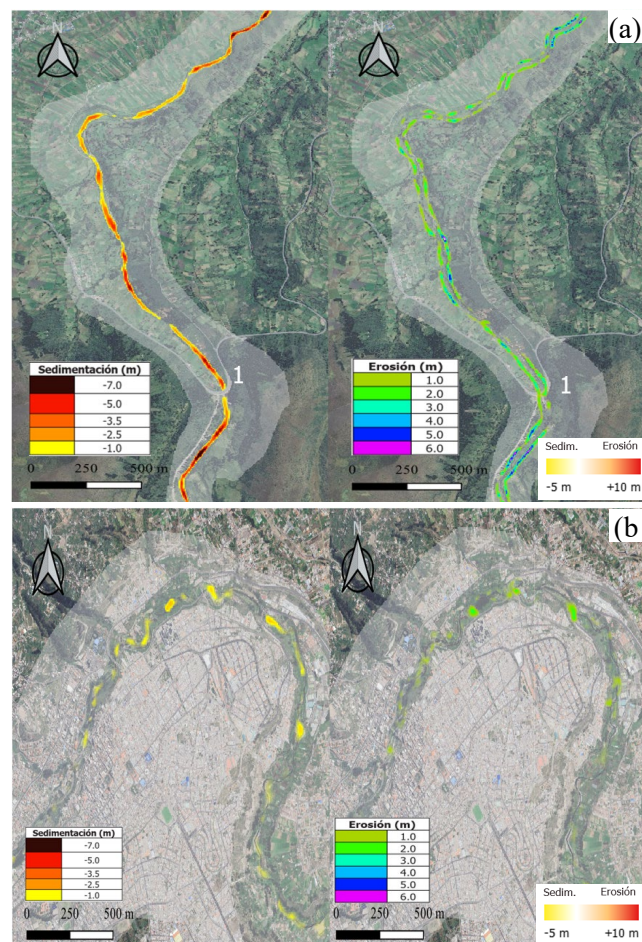


Figura 9. (a) Escenario 2B, mapa de erosión y sedimentación, zona a 3 km aguas debajo de la presa; (b) Escenario 2B, mapa de erosión y sedimentación, zona urbana.

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 10 indica la evolución del fondo del río desde la zona del embalse hasta aguas abajo del mismo, llegando hasta la zona de un puente vehicular, el mismo que trabaja como sección de control. El tiempo total de simulación fue de aproximadamente 8 horas para el tránsito de toda la crecida. La brecha se empieza a formar a partir de 25 min, antes de este tiempo no existe transporte de sedimentos en el lecho. A partir de este tiempo, empieza la rotura de la presa y se activa el módulo de transporte de sedimentos.

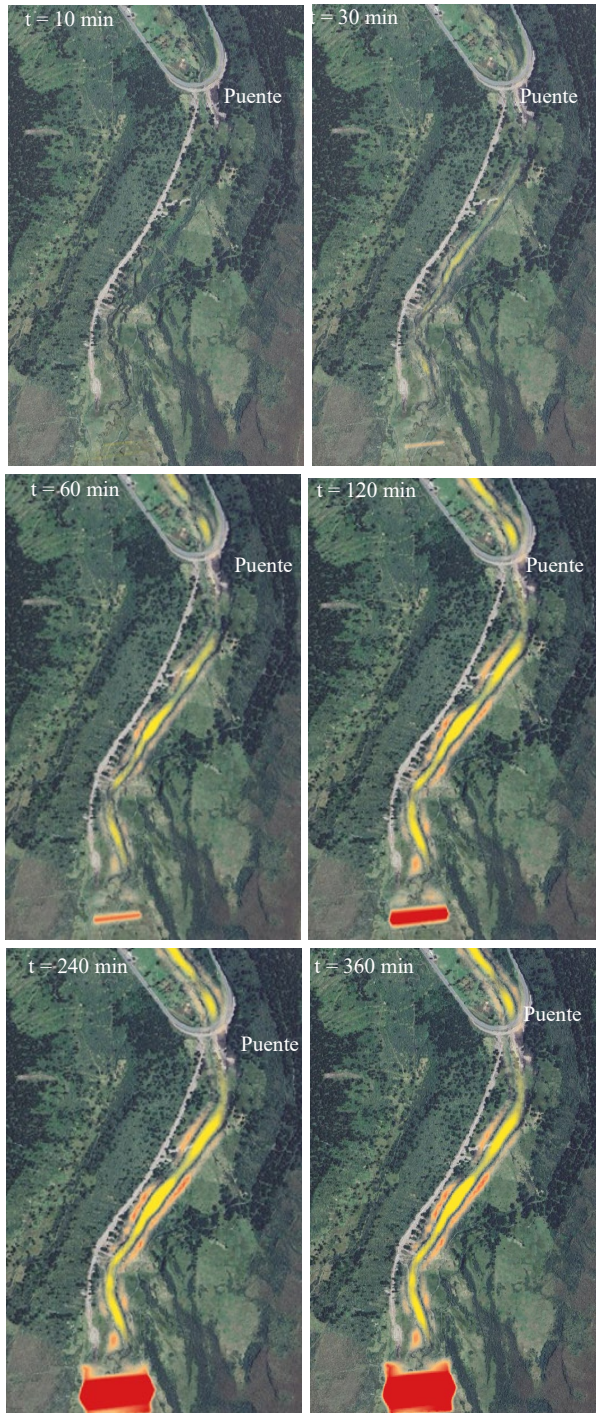


Figura 10. Variación del lecho de fondo aguas abajo del embalse. Mapa de erosión (+) y sedimentación (-) para distintos tiempos de análisis
Fuente: Elaboración propia

El transporte de sedimentos se hace notorio a partir de 30 min (cercano al tiempo de formación de la brecha), aguas arriba de la presa alcanzaría un valor de 1.25 m de erosión, en el instante inicial. Se puede observar que el material erosionado se ha depositado aguas abajo de la presa.

El lecho del río ha alcanzado su equilibrio a partir de las 4 h, para el tiempo transcurrido de 6 h aguas abajo de la presa el material sedimentado alcanzaría los 5 m de altura (color amarillo), en el margen izquierdo el proceso erosivo sería entre 4 a 5 metros (color naranja), lo cual podría provocar daños en la vía adjunta a esta margen. El tiempo de llegada de la crecida al puente sería de 5 min y la velocidad de alrededor de 18 m/s. En las cercanías de la presa, los calados de agua alcanzarían los 16.0 m y velocidades de hasta 35.0 m/s.

Se realizó la comparación entre el hidrograma tras la rotura considerando fondo fijo y fondo móvil (Fig. 11). Existe una diferencia entre los dos escenarios, el hidrograma considerando el transporte de sedimentos es mayor. En este caso, el caudal fue de 238.0 m³/s mayor que el caudal para el evento extraordinario de 1000 años. Esto supone un incremento del 4.3 % con respecto a la simulación con fondo fijo. Estos resultados muestran concordancia con los obtenidos en trabajos previos como Sanz-Ramos et al. [6], cuyos resultados en el hidrograma de rotura muestran un incremento del 4.1 % respecto al hidrograma de rotura considerando únicamente fondo fijo. Por lo tanto, analizar un evento de rotura de presa considerando el transporte de fondo móvil influye directamente en el hidrograma de rotura, con la característica de que el sedimento se deposita hacia aguas abajo.

La Fig. 12 indica la evolución del fondo del río producto del tránsito de la crecida por la rotura de presa en una sección ubicada a 5 km de la presa y 3 km del puente vehicular. Se puede observar que después de transcurrida 1 hora del evento, la erosión tendería al margen derecho del río, alcanzando valores máximos de 1.8 m. La Fig. 13 muestra la variación del calado de agua en el tiempo para la misma sección, desde el tiempo inicial de rotura hasta un valor de 30 min, se evidencia una elevación del flujo de 4.0 m de agua entre los 13 min y 20 min para posteriormente decrecer. Es decir que, el caudal máximo descargado, llega en un tiempo de alrededor de 20 minutos. También existiría un equilibrio entre los valores de erosión y sedimentación luego de 5 horas de simulación, cuyos valores alcanzaría los 2 y 3 m.

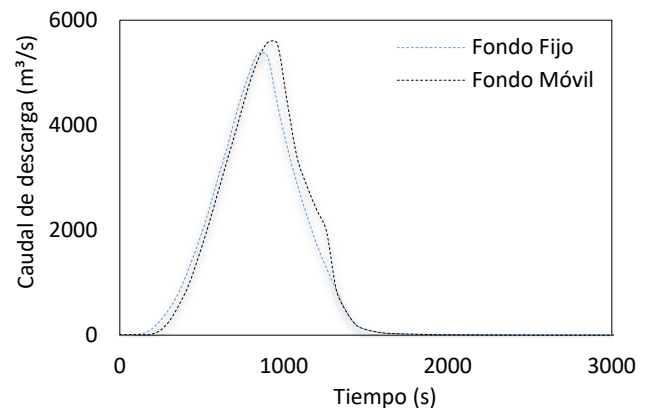


Figura 11. Hidrograma tras la rotura de la presa considerando fondo fijo y móvil.
Fuente: Elaboración propia

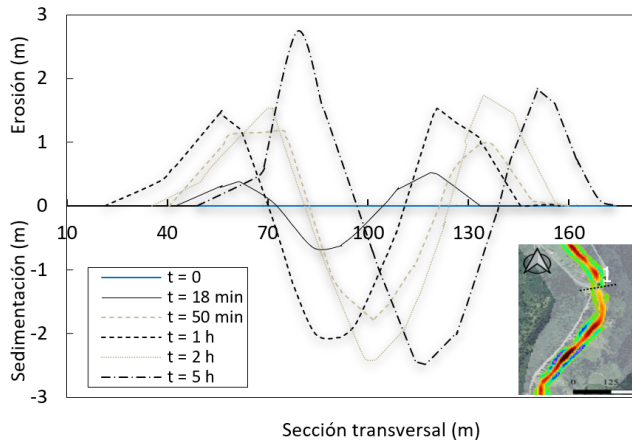


Figura 12. Evolución del fondo del cauce en el tiempo, Punto 1 a 5km de la presa
Fuente: Elaboración propia

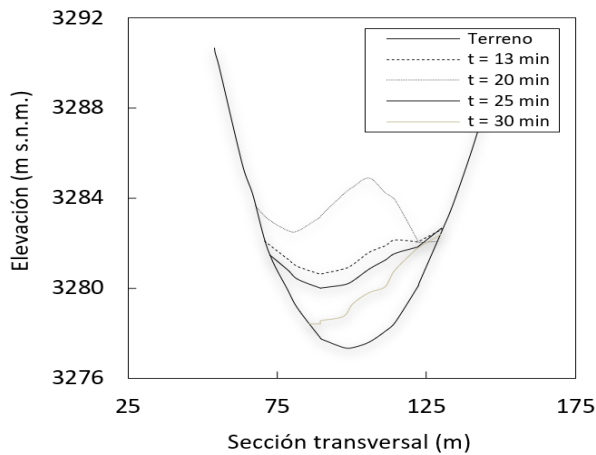


Figura 13. Variación del calado de agua en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.

Criterios para la categorización de la presa

Datos	Altura mínima (m)	Volumen de almacenamiento (m³)	Longitud de coronación (m)	Área afectada (ha)
Guía Técnica Española	> 10.0	>100.000	> 500	> 5000
Proyecto	39.0	3'065.000	380	417,8

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinados los parámetros necesarios para la clasificación de la presa y, en base a lo expuesto acerca de la Guía Técnica Española se establece, en la Tabla 4, la siguiente clasificación:

Al cumplirse dos de los parámetros establecidos, se determina que la presa se clasifica dentro del grupo de “grandes presas”. De igual forma, a la presa se la considera según el riesgo potencial dentro de la “Categoría A”, en razón que:

- Existe afectación al núcleo urbano.
- Afectación a servicios esenciales.
- Posibles daños materiales a infraestructura civil.

4 Discusión

El presente estudio aplica la metodología propuesta por Sanz-Ramos et al. [19] para la evaluación de rotura de presas y el análisis de transporte de sedimentos aguas abajo de la presa. En este caso, para un proyecto implantado en una zona de alta montaña (3800 m.s.n.m.) y el tránsito de la crecida abarca 22 km de distancia hasta la zona vulnerable urbana (2750 m.s.n.m.). En función de los resultados obtenidos y en concordancia con trabajos previos [19], existe una diferencia entre el análisis de la rotura considerando el fondo fijo y un fondo móvil. Este tipo de proyectos deben ser complementados con escenarios hipotéticos como la rotura de una presa y apoyados con criterios y normativas como la expuesta en la Guía Técnica de España y el código norteamericano FEMA. Además, de otras consideraciones como el transporte de material de fondo y su influencia en el hidrograma de rotura. Si bien las formulaciones empíricas empleadas en el modelo numérico poseen un rango de aplicación, estas pueden variar con las del proyecto, ya que dichas formulaciones son obtenidas bajo parámetros y condiciones específicas. Esto genera la necesidad de que el modelo numérico sea calibrado y validado con datos experimentales obtenidos durante el evento. En este sentido, es necesario una extensa campaña experimental de recolección de datos de sedimento para toda la longitud de análisis. Además, de considerar una granulometría variable en el modelo numérico. Al ser la rotura de presa un hecho hipotético y que se espera nunca ocurra, si es necesario disponer de mediciones en tiempo real del tránsito de la crecida y así retroalimentar el modelo numérico para reducir la incertidumbre de los resultados.

La pendiente media longitudinal del río en la parte urbana es alrededor del 4 %, la cual influye directamente en los rangos de velocidad registrados durante la crecida, cuyo valor alcanzaría los 15 m/s y calados de agua que podrían afectar principalmente la zona urbana más cercana al cauce principal. El tiempo de llegada de la crecida luego de rotura al núcleo urbano sería de 48 minutos. En este tiempo, todas las zonas posibles de afectación deberán ya haber evacuado e informado con algún sistema de alerta temprana a la población. En lo referente a los resultados obtenidos considerando el transporte de sedimentos de fondo, existe un incremento del 4.3 % en el hidrograma tras la rotura considerando el transporte de sedimentos, respecto a la simulación con fondo fijo. Respecto a la comparación de los códigos de peligrosidad, el código español RD9/2008 muestra ser más claro a la hora de delimitar estas áreas afectadas como graves, tomando como referencia un calado de 1 m y una velocidad de 1 m/s; cuyos valores según la gestión del riesgo son acordes para zonas urbanas con alta densidad poblacional, servicios básicos, puentes, etc.

5 Conclusiones

El presente estudio analiza la rotura de presa para distintos escenarios, que contempla escenarios de funcionamiento normal y con crecida extraordinaria, análisis de los mapas de peligrosidad con el código español RD9/2008 y el código de la Agencia Federal para el manejo

de Emergencias norteamericano FEMA. En función de los resultados obtenidos, la presa analizada es catalogada dentro del grupo de “grandes presas” y en función del riesgo potencial como presa “Categoría A”. El hidrograma de rotura con la inclusión del transporte de sedimentos resulta ser mayor que el hidrograma con agua clara, lo cual muestra una concordancia con trabajos previos. Dado las altas velocidades y el régimen supercrítico del flujo durante la propagación de la onda de crecida, la afectación a la infraestructura civil sería considerable, sobre todo en los servicios básicos esenciales de la zona urbana, como se ha podido observar en eventos anteriores en zonas montañosas como el denominado “Desastre de la Josefina” (aproximadamente 2250 m.s.n.m.) en Cuenca, Ecuador. El sedimento desplazado se ubica predominantemente aguas abajo de la presa y en menor cantidad en la zona baja de la cuenca correspondiente a la parte urbana de la ciudad de Ambato. Sin embargo, existen áreas puntuales en la zona urbana afectadas por la acumulación de sedimento como el caso de tomas de agua o plantas de tratamiento. Estos criterios plantean nuevos escenarios que deben ser considerados en Ecuador, bien sea para la fase de diseño de una presa, o para la evaluación de presas existentes. En este sentido, este estudio subraya la relevancia de adaptar metodologías nuevas a condiciones geográficas y normativas locales específicas, enfatizando la necesidad de datos precisos y actualizados para mejorar la capacidad predictiva de modelos numéricos en situaciones críticas como la rotura de presas en zonas vulnerables y así evitar lo sucedido como en eventos pasados.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua del Ecuador por prestar las facilidades para el acceso a la información técnica base del caso de estudio.

Referencias

- [1] Wahl, T., Prediction of embankment dam breach parameters a Literature Review and Needs Assessment. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, USA, 1998.
- [2] Federal Emergency Management Agency. FEMA. P-1015 Technical Manual: overtopping protection for dams. US Department of Homeland Security, USA, 2014.
- [3] Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Blázquez, A., Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), pp. 101–118, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.968226>
- [4] Carrillo, J.M., Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevuerto de presas de fábrica. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2014.
- [5] Ortega, P.R., Análisis de la lámina vertiente en el sobrevuerto de presas de fábrica. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2022.
- [6] Sanz-Ramos, M., Olivares, G., and Bladé, E., Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil, *Revista Iberoamericana del Agua*, pp. 138-147, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198>
- [7] Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Silva, N., Salazar, F., López, D., and Martínez, E., A probabilistic approach for off-stream reservoir failure flood hazard assessment. *water*, 15(12), pp. 1–19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15122202>
- [8] Sanz-Ramos, M., Blade, E., Silva, N., and Salazar, F., Avances en iber para la clasificación de balsas: proyecto acropolis. *Ingeniería del Agua*, 28(1), pp. 47–63, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20609>
- [9] Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Escolano, E., Optimización del cálculo de la vía de intenso desagüe con criterios hidráulicos. *Ingeniería del agua*, 24(3), pp. 203–218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13364>
- [10] López-Gómez, D., De-Blas-Moncalvillo, M., Cuéllar-Moro, V., Herramientas para la gestión sostenible de la sedimentación en el embalse de Marmolejo (España). *Ingeniería del Agua*, 28, pp. 1–16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20376>
- [11] Zeas, R., El deslizamiento de la Josefina tragedia nacional, proceedings Seminario internacional sobre aludes torrenciales, Galileo, pp. 87–98, Venezuela, 2019.
- [12] Palavecino, A., Modelación bidimensional del flujo generado por rotura de una presa de tierra, utilizando el programa Iber. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- [13] Acero, A., Modelación numérica bidimensional del flujo generado por rotura de la presa Mulacorral mediante Hec-Ras 5.0. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2019.
- [14] Toapaxi, J., and Acero, A., Análisis de inundación por rotura de presa utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: caso de estudio de la presa mulacorral, Provincia de Tungurahua, *Revista Politécnica*, 48(1), pp. 51–64, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n1.05>
- [15] López, A., Análisis de la amenaza por inundación en caso de rotura de la represa Chiquiurcu, en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua Ambato. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2022.
- [16] Herbozo, J.E., Muñoz, L.E., Guerra, M.J., Minaya, V., Haro, P., Carrillo, V., Manciat, C., Campozaño, L., Non-Stationary hydrological regimes due to climate change: the impact of future precipitation in the spillway design of a reservoir, case study: sube y baja dam, in Ecuador. *Atmosphere* 13, Art. 828, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13050828>
- [17] Barreto, J., Matute, R., Tenezaca, R., La Josefina, quince años después. Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2008.
- [18] iagua., El gobierno de Ecuador pone en marcha el Plan de Manejo de la zona especial de La Josefina, [online], 2013. Available at: <https://www.iagua.es/noticias/ecuador/13/05/06/el-gobierno-de-ecuador-pone-en-marcha-el-plan-de-manejo-de-la-zona-especial-de-la-josefina-30009>.
- [19] Honorable Consejo Provincial de Tungurahua. Estudios y diseños definitivos embalse Quebrada Chiquicahua. Ambato, Ecuador, 2022.
- [20] Banco de Desarrollo del Ecuador, [online], 2022. Available at: <https://twitter.com/BDEcuadorBP/status/1548114024633491458/photo/2>
- [21] Honorable Consejo Provincial de Tungurahua. Un hito de ingeniería y esperanza emerge en Tungurahua. Ambato, Ecuador, 2023.
- [22] Bladé, E., Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- [23] Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A., Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, CIMNE (Universitat Politécnica de Catalunya) 30, pp. 1–10, 2014.
- [24] Corestein, G., Bladé, E., Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo-modelo iber. *Proceedings III Jornadas de Ingeniería del Agua: La Protección Contra Los Riesgos Hídricos JIA*. Valencia, 23 y 24 de octubre, pp. 27–34, 2013.
- [25] Corestein, G., Bladé, E., Niñerola, D., Modelling bedload transport for mixed flows in presence of a non-erodible bed layer. *River Flow*, CRC Press, pp. 1611–1618, 2014.
- [26] Meyer-Peter, E., and Müller, R., Formulas for bed load transport. proceedings of 2nd meeting of the international association for hydraulic structures research, delft, 7 june, pp. 39–64, 1948.

P.E. Suárez-Naranjo, obtuvo el grado de Ingeniera Civil por la Universidad Técnica de Ambato en 2019. En 2023, obtuvo el grado de MSc. en Hidráulica, con mención en Diseño de Obras Hidráulicas, por la Escuela Politécnica Nacional. Se designó como Analista de Infraestructura en el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) en la provincia de

Cotopaxi y como Supervisora Encargada de Conservación Vial en la Zonal 1 (Esmeraldas, Carchi, Imbabura y Sucumbios) en la matriz del MTOP en Quito. Actualmente, es docente en la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur. Sus áreas de interés incluyen la hidráulica aplicada, la dinámica de fluidos y la modelación numérica de procesos hidráulicos, con un enfoque en el análisis de peligrosidad hidrológica, la delimitación de áreas de inundación y la evaluación de riesgos asociados a eventos extremos.
ORCID: 0009-0002-9298-9778

P.R. Ortega-Lara, es Ingeniero Civil de la Universidad Central del Ecuador, MSc. en Diseño de Proyectos Hidráulicos en la Escuela Politécnica Nacional y un doctorado en la Universidad Politécnica de Cartagena (España) en el tema de flujos multifase en chorros de vertido libre en presas. Actualmente, se desempeña como Profesor Titular Tiempo Completo de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. También fue presidente de la Young Professionals Network EPN de la IAHR. Realizó una estadia de investigación con el IHE (Delft, Países Bajos). Es editor asociado de la Revista Hidrolatinoamericana IAHR y de la Revista Ingeniería del Agua (España). Sus áreas de interés son la Dinámica de Fluidos Computacional, modelación física experimental, flujos multifase agua-aire, presas y diseño de estructuras hidráulicas.
ORCID: 0000-0003-2697-3268

P.L. Haro-Ruiz, obtuvo el grado de Ingeniera Civil por la Escuela Politécnica Nacional en 2007. En 2010 obtuvo el Grado de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos y Ciencias del Agua, Mención Diseño de Proyectos Hidráulicos por la Escuela Politécnica Nacional. El grado de PhD en Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental lo obtuvo por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) en 2019 en Cartagena - España. Se desempeñó como Analista de Expansión en el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable desde 2008 hasta 2014, participando en la supervisión de los estudios y construcción de centrales hidroeléctricas como Sopladora, Minas – San Francisco, Coca Codo Sinclair, Cuenca Alta del Guayllabamba, y proyectos Geotérmicos como Chachimiro. Actualmente, es Subdecana y Profesora Titular Auxiliar en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de Escuela Politécnica Nacional (EPN) en Quito – Ecuador. A lo largo de su carrera académica, se ha desempeñado como Coordinadora de la Maestría en Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
ORCID: 0000-0001-5612-3075