

Estudio de rotura de una presa de jales en la zona centro-norte de México

Alma Itzel Rivera Flores*; José Antonio Bonilla Porras*

*Knight Piésold Consulting S.A. de C.V., Av. Presidente Masaryk No. 29, Piso 11, Polanco V Sección, Miguel Hidalgo, (C.P. 11560) Ciudad de México, México.

irivera@knightpiesold.com

Resumen

El análisis y modelado de rotura de presas de jales se utiliza en la industria minera para evaluar las consecuencias potenciales ante la ocurrencia de una falla hipotética en un bordo. La Asociación Canadiense de Presas (CDA, 2021) establece directrices para el análisis del rompimiento de presas de jales que fueron utilizados por Knight Piésold en el modelado de la rotura de un bordo ubicado en la zona centro-norte del país. El sitio se caracteriza por un clima semiárido templado con una temporada de lluvias entre julio y septiembre. El depósito de jales está limitado por el terreno natural en sus extremos sur y oeste, y por el bordo analizado al norte y este. El análisis se basa en la definición de distintos escenarios hidrológicos al momento de la falla hipotética, la determinación del modo y mecanismo de falla y el análisis de los volúmenes de agua y jales que potencialmente escurrirían en el caso de una rotura. La modelación se desarrolla en dos partes principales: (1) análisis de la brecha (geometría, tiempo de formación e hidrograma de salida) y (2) la propagación de la inundación hacia aguas abajo. Los modelos se implementaron en el software FLO- 2D. Los resultados consisten, principalmente, en la generación de mapas de inundación y riesgo. Para el bordo seleccionado, los análisis sugieren que las inundaciones provocadas por la rotura del bordo abarcarían parcialmente caminos y asentamientos humanos en condiciones de tormenta, por lo que existe riesgo de pérdida de vidas humanas. Por otro lado, en condiciones hidrológicas promedio, la inundación es menor y no supone un riesgo importante para la población cercana. La aplicación de este análisis se toma como guía para el desarrollo de planes de emergencia y la clasificación de las estructuras, basada en la evaluación de daños potenciales.

Palabras Claves: presas de jales, análisis de rotura de presa, climatología, inundación.

Abstract

Dam break analysis and modeling are used in the mining industry to assess potential consequences in the event of a hypothetical failure of an embankment. The Canadian Dam Association (CDA, 2021) provides guidelines for the analysis of tailings dam failures, which were utilized by Knight Piésold to model a failure of a tailings dam located in north-central Mexico. The site is characterized by a temperate semi-arid climate with a rainy season from July to September. The tailings deposit is bounded by natural ground at its southern and western ends and by the analyzed embankment to the north and east. The analysis involves defining different hydrological scenarios at the time of the hypothetical failure, determining the failure mode and mechanism, and estimation of water and tailings volumes that could be released in the event of dam failure. The modeling is carried out in two main parts: (1) breach analysis (geometry, formation time, and outflow hydrograph), and (2) flood wave propagation downstream. The models were implemented using the FLO-2D software. Results primarily consist of the generation of the flood and risk maps. For the selected embankment, the analysis suggests that floods caused by the dam failure would partially affect roads and human settlements, under storm conditions, representing a risk of loss of life. In contrast, under fair-weather conditions, the flood is less severe and does not represent a significant risk to nearby populations. This analysis serves as a guide for developing emergency plans and classifying structures based on potential damage assessment.

Keywords: tailing dam, dam break analysis, climatology, flood inundation.

Introducción

La rotura de presas de jales supone un riesgo significativo para las comunidades aledañas y el medio ambiente. Este trabajo presenta el análisis de rotura para una presa de jales en la zona centro-norte de México, considerando las particularidades del material almacenado y las condiciones hidrológicas de la región. La presa tiene una altura máxima de 24 m, una capacidad máxima de jales de 850,000 m³ y una capacidad máxima de agua de 68,000 m³. El diseño no incluye un vertedor de excedencias. A través de la aplicación de un modelo numérico, se estimaron las consecuencias potenciales de una rotura, lo que permite tomar medidas preventivas y proporcionan información valiosa para la gestión de riesgos.

El sitio se caracteriza por un clima semiárido templado con vegetación escasa y una temporada de lluvias entre julio y septiembre. La topografía aguas abajo del sitio es relativamente llana, con pocos drenajes definidos, y generalmente, se inclina de sur a norte. El principal curso de agua fluye, generalmente, hacia el noroeste.

Se delinearon los siguientes objetivos para los estudios de brecha e inundación: (1) definición de escenarios hipotéticos de falla; (2) modelado numérico de la brecha, incluida la estimación del hidrograma de salida en caso de falla; (3) modelado numérico bidimensional de la inundación; (4) mapeo e identificación de las extensiones, profundidades, velocidades y peligros de la inundación aguas abajo; y (5) estimaciones de las pérdidas potenciales de vida (PLL) aguas abajo.

Materiales y métodos

Definición de escenarios hidrológicos

De acuerdo con CDA (2021), se definen, al menos, dos escenarios hidrológicos: (1) condiciones extremas, y (2) condiciones promedio. El primer escenario considera que la presa está llena a su máxima capacidad de jales y de agua al momento de la falla. Al mismo, se asume que el cauce aguas abajo conduce un gasto asociado a un periodo de retorno de 100 años. El segundo escenario asume que la presa está llena a su máxima capacidad de jales, pero la superficie del agua se encuentra en su nivel promedio por encima de los jales al momento de la falla. Aguas abajo se considera el escurrimiento medio en el cauce.

Los niveles de agua al interior del depósito al momento de la falla, los volúmenes almacenados y los gastos en el cauce de aguas abajo correspondientes a cada escenario se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones asumidas al momento de la falla para distintos escenarios.

Escenario hidrológico	Cond. Extremas	Cond. Promedio
Nivel máx. agua (msnm)	2,215.1	2,213.1
Vol. almacenado agua (m ³)	68,000	8,000
Vol. almacenado jales (m ³)	850,000	850,000
Gasto cauce aguas abajo (m ³ /s)	186.0	0.0

Con base en cada escenario hidrológico, se determina el volumen de jales que sería liberado en caso de una falla hipotética. La metodología se basa en la construcción de un cono de falla alrededor de la brecha hipotética con una pendiente del 5% (Figura 1). Se asume, entonces, que sólo el volumen de jales por arriba del cono de falla sería liberado en caso de la rotura del bordo. Asimismo, e independientemente del escenario hidrológico, se asume que el volumen de agua almacenado saldría por la brecha en su totalidad. El volumen total liberado se obtiene como la suma del volumen de jales por encima del cono de falla, el volumen almacenado de agua y el volumen del material estructural del bordo que se pierde como consecuencia de la falla.

Modo y mecanismo de falla

La selección del modo y mecanismo de falla se asume con base en los análisis geotécnicos del bordo. Se concluyó que, para el caso del bordo analizado, la falla hipotética sería consecuencia de un colapso provocado por la falla de la cimentación.

Localización, geometría y tiempo de formación de la brecha

Aunque se analizaron diferentes ubicaciones potenciales para la ocurrencia de una brecha, se seleccionó el extremo oriente del bordo ya que plantea la ruta más directa con infraestructura relevante (Figura 1). La geometría de la brecha se estimó con base en la utilización de varias ecuaciones de regresión (empíricas) publicadas a partir de fallas de presas históricas y utilizando criterios técnicos (por ejemplo, USBR, 1982; Von Thun & Gillette, 1990). Los anchos varían en función de la profundidad de la brecha y de los volúmenes de liberación de cada escenario. La metodología asume que la brecha tiene una geometría rectangular.

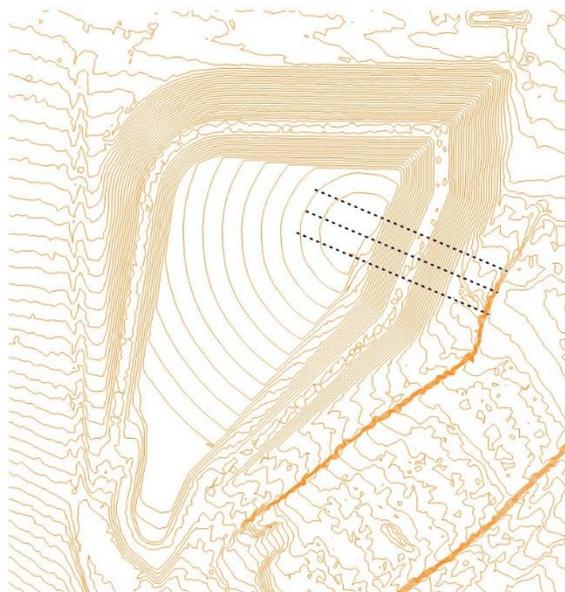


Figura 1. Localización de la brecha hipotética en el depósito de jales (Elaboración propia).

De la misma manera, los tiempos de formación de las brechas se estimaron con base en ecuaciones de regresión en la literatura (por ejemplo, USBR, 1982).

Modelo de brecha

La modelización numérica de la brecha se realizó utilizando el módulo «BREACH» del software FLO-2D (2018). El módulo «BREACH» simula la erosión progresiva a través de la presa y proporciona el hidrograma de salida como consecuencia de la rotura.

Modelo de propagación de la inundación

La modelización numérica de la inundación se realizó utilizando el software FLO-2D (2018). Las simulaciones se realizaron utilizando la rutina de flujo no newtoniano, que considera los esfuerzos de fluencia y la viscosidad del fluido como funciones de la concentración de sólidos a lo largo del curso de agua en dirección hacia aguas abajo.

Se estimaron los resultados de la inundación a cada kilómetro aguas abajo de la presa a lo largo de un alineamiento de referencia de 12 km que se aproxima a la línea central del cauce.

El modelo utilizó un espaciado de 20 m en la malla de cálculo utilizada para la representación de la topografía aguas abajo y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,06. Cabe señalar que la viscosidad, y no el coeficiente de rugosidad de Manning, es el principal parámetro de resistencia al flujo en fluidos no newtonianos.

La avenida de 100 años y el caudal medio anual se supusieron en el cauce aguas abajo para los escenarios de condiciones extremas y condiciones promedio, respectivamente. No se dispone de datos sobre los caudales en la región, por lo que se realizaron estimaciones sintéticas de los caudales de 100 años mediante modelos de precipitación-escorrentía. El análisis indicó que para condiciones extremas, el gasto es de hasta 186 m³/s, mientras que, para condiciones promedio, el gasto es cercano a 0.0 m³/s.

Estimación de pérdida potencial de vidas

Habiendo identificado la población en riesgo (PAR, por sus siglas en inglés), las estimaciones de pérdida potencial de vidas (PLL, por sus siglas en inglés), para cada escenario, se realizaron con la Metodología del Reclamation Consequence Estimating Methodology (RCEM, USBR, 2015). Esta metodología se basa en estadísticas de fallas históricas de presas de agua e incluye relaciones de la tasa de mortalidad frente al producto máximo de la profundidad del flujo y la velocidad del flujo (peligro máximo de inundación).

La CDA (2021) recomienda que la pérdida de vidas humanas en un evento de rotura de presa se evalúe en términos de impactos incrementales. Para ello, se contabilizan las pérdidas de vida asociadas a un evento de inundación natural (periodo de retorno de 100 años) y se restan de las pérdidas asociadas al evento de rotura combinado con la misma inundación natural. Este enfoque también es sugerido por el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (ICMM, 2020).

Resultados y discusión

Esta sección incluye solamente resultados generales del estudio.

Condiciones hidrológicas extremas

De acuerdo con el análisis de las ecuaciones empíricas, las características de la brecha para el escenario de condiciones hidrológicas extremas son:

- Altura: 17.0 m
- Ancho: 45.0 m
- Tiempo de formación: 0.4 horas

Con base en las recomendaciones incluidas en CDA (2021) y ICMM (2020), se estimó el volumen total de salida (jales, agua y material de relleno del bordo) en 629,000 m³ compuesto por:

- 520,000 m³ de jales almacenados por encima del cono de falla.
- 68,000 m³ de agua almacenada en el depósito al momento de la falla.
- 41,000 m³ de material estructural del bordo.

Los resultados del modelo de brecha indican un gasto de salida pico de 730 m³/s a 0.30 horas de haber iniciado el proceso de rotura en el bordo. El hidrograma de salida tiene una duración total de 0.65 horas (Figura 2). La concentración de sólidos se estimó en un 43%.

Los resultados del modelo de inundación aguas abajo sugieren una atenuación del gasto pico del 95% al primer kilómetro aguas abajo de la brecha, del 97% al segundo kilómetro y del 99% a los 12 kilómetros. Los tirantes máximos oscilan de 0.3 m a 1.3 m, mientras que las velocidades del flujo se encuentran entre 0.3 m/s y 1.4 m/s.

El análisis de población en riesgo (PAR) sugiere la presencia de 5,337 personas que potencialmente serían afectadas por la inundación natural asociada a un periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, para ese mismo escenario (sin considerar la contribución del volumen liberado por la rotura de la presa), no se identificaron pérdidas potenciales de vida (PLL).

Al incluir la contribución del evento en condiciones hidrológicas extremas, se estima un incremento de población en riesgo (PAR) de 53 personas. Aún en este escenario, las estimaciones no

sugieren que haya pérdidas potenciales, si bien es probable que la infraestructura aledaña al depósito y varias comunidades aguas abajo se inunden. Es importante resaltar que la contribución de los volúmenes a causa de la falla del bordo no impactaría de manera significativa las consecuencias asociadas al evento de tormenta. Lo anterior se observa, por ejemplo, en la variación en el área de la mancha de inundación, que incrementa de 55.3 km² a 55.8 km².

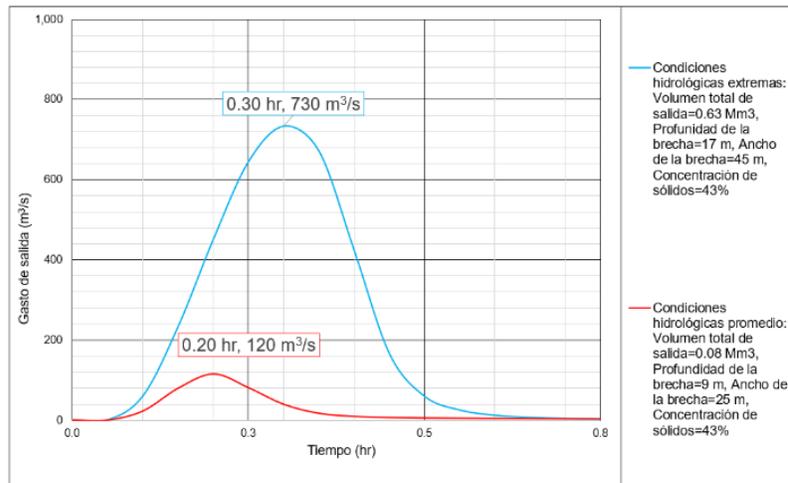


Figura 2. Hidrogramas de salida de la brecha en diferentes escenarios hidrológicos (Elaboración propia).

Condiciones hidrológicas promedio

De acuerdo con el análisis de las ecuaciones empíricas, las características de la brecha para el escenario de condiciones hidrológicas extremas son:

- Altura: 9.0 m
- Ancho: 25.0 m
- Tiempo de formación: 0.3 m

Con base en las recomendaciones incluidas en CDA (2021) y ICM (2020), se estimó el volumen total de salida (jales, agua y material de relleno del bordo) en 82,000 m³ compuesto por:

- 68,000 m³ de jales almacenados por encima del cono de falla.
- 8,000 m³ de agua almacenada en el depósito al momento de la falla.
- 6,000 m³ de material estructural del bordo.

Los resultados del modelo de brecha indican un gasto de salida pico de 120 m³/s a 0.20 horas de haber iniciado el proceso de rotura en el bordo. El hidrograma de salida tiene una duración total de 0.40 horas (Figura 2). La concentración de sólidos se estimó también en un 43%.

Los resultados del modelo de inundación aguas abajo sugieren una atenuación del gasto pico del de casi el 100% al primer kilómetro aguas abajo de la brecha. En el caso del escenario con condiciones hidrológicas promedio, tanto tirantes máximos como velocidades de flujo máximas son cercanos a cero.

Al incluir la contribución del evento en condiciones hidrológicas promedio al escurrimiento medio, se estima un incremento de población en riesgo (PAR) nulo. De este modo, tampoco en estas condiciones, las estimaciones sugieren que haya pérdidas potenciales de vida. Los resultados sugieren que es probable que la infraestructura aledaña al depósito se inunde, pero no se esperan afectaciones en las comunidades aguas abajo.

Conclusiones

Knight Piésold desarrolló el estudio de rotura de presa para un depósito de jales en la zona centro-norte del país, cumpliendo con los cinco objetivos establecidos al inicio de este trabajo. El estudio se basó en la definición de dos escenarios hidrológicos, la determinación del modo y mecanismo de falla a partir de estudios geotécnicos, y la determinación de volúmenes liberados por la misma. Los resultados de estos análisis se incluyeron como datos de entrada de un modelo numérico bidimensional que se dividió en dos partes: brecha e inundación. En el escenario de condiciones hidrológicas extremas, los resultados sugieren inundaciones en infraestructuras aledañas al depósito y en las comunidades cercanas. Sin embargo, debe notarse que la contribución del evento a una inundación natural con 100 año de periodo de retorno puede despreciarse, ya que la mancha de inundación sólo se incrementaría en 1%. En el escenario de condiciones hidrológicas promedio, es probable la inundación de algunas infraestructuras cercanas al depósito, pero no se esperan afectaciones en comunidades cercanas.

Los resultados de este tipo de estudios deben contribuir a fortalecer la capacidad de respuesta de las empresas mineras, las autoridades y las comunidades ante eventos potencialmente catastróficos. Resulta fundamental que este tipo de análisis formen parte de los proyectos (en sus distintas etapas) en el contexto de las buenas prácticas en la industria minera nacional.

Referencias

- Canadian Dam Association (CDA). 2021. *Technical Bulletin: Tailings Dam Breach Analysis*.
- FLO-2D Software, Inc (FLO-2D). 2018. *FLO-2D Reference Manual and Software*.
- International Council on Mining & Metals (ICMM). 2020. *Global Industry Standard on Tailings Management*. August.
- United States Bureau of Reclamation (USBR). 1982. *Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of Reclamation dams*. Reclamation Planning Instruction No. 82-11. June 15.
- United States Bureau of Reclamation (USBR). 2015. *RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology, Guidelines for Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Analysis*. United States Department of the Interior. July.
- Von Thun, J.L. and A.M. Gillette. 1990. *Guidance on Breach Parameters*. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, March 13.

Acerca de los autores

La Ing. Alma Itzel Rivera Flores estudió la licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Posteriormente, estudió la Especialización en Hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

El Dr. José Antonio Bonilla Porras es egresado de la licenciatura en Ingeniería Civil por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Posteriormente, egresó como Maestro en Ciencias del Agua por el IHE Delft Institute for Water Education (Países Bajos) y como Doctor en Ingeniería Fluvial por la Universidad de Trento (Italia). Actualmente, es profesor de Hidráulica en la División de Ingeniería Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Autorización

Los autores del presente artículo autorizan a la AMH para publicar el escrito en el libro electrónico del XXVII Congreso Nacional e Internacional de la AMH, los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.