

Evaluación de la vulnerabilidad global en presas de colas. Moa, Cuba

Global vulnerability assessment of tailings dams. Moa, Cuba

Teresa Hernández Columbié

Universidad de Moa, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-6388-8997>

tcolumbie@ismm.edu.cu

Rafael Guardado Lacaba

Universidad de Moa, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0003-1075-8176>

rguardado@ismm.edu.cu

RESUMEN

El cambio climático constituye un detonante de los riesgos por fallos de las presas de colas de la industria minera. Este factor, incrementa la vulnerabilidad ante peligros de origen natural y antrópico de las obras, ocurriendo un incremento de los incidentes medioambientales de estas estructuras, a medida que alcanzan mayor altura, poniendo en riesgo a la población, la infraestructura y el ambiente. En esta investigación se realiza una evaluación de la vulnerabilidad de una presa de colas ante diferentes amenazas hidrometeorológicas, sísmicas y tecnológicas, determinando a través de la aplicación de métodos cualitativos y cuantitativos la vulnerabilidad global de la obra. Se realiza una zonificación para la evaluación de la peligrosidad ante eventos de origen natural y antrópicos. El resultado de la evaluación de la vulnerabilidad global es “muy alta” en las zonas B, C y D de la obra y “alta” en la zona A. El nivel de predisposición de ser dañada la estructura es “muy alto”.

ABSTRACT

Climate change is a risk trigger for tailings dam failures in the mining industry. This factor increases the vulnerability to natural and anthropic dangers of the works, resulting in an increase of environmental incidents of these structures, as they reach greater height, putting at risk the population, the infrastructure and the environment. In this research, an evaluation of the vulnerability of a tailings dam to different hydrometeorological, seismic and technological hazards is carried out, determining through the application of qualitative and quantitative methods the global vulnerability of the work. A zoning is carried out for the evaluation of the danger of natural and anthropic events. The result of the global vulnerability assessment is “very high” in zones B, C and D of the construction site and “high” in zone A. The level of predisposition to damage the structure is “very high”.

Recibido

03/10/2022

Aceptado

29/03/2023

PALABRAS CLAVE

Presas de colas; riesgos; cambio climático.

KEYWORDS

Tailings dams; risks; climate change.

INTRODUCCIÓN

Las presas de colas o de relaves son estructuras de alta complejidad ingenieril, formadas por material friable, que tienen entre sus funciones almacenar los residuales sólidos del proceso minero metalúrgico. El concepto general de su diseño es construir diques de contención perimetrales que aumentan su altura, sobre un suelo de cimentación artificial generado por las propias colas a medida que se van depositando o por material de empréstito (Hernández. T., 2015).

En su investigación Adiansyah et al, (2015), refieren que los volúmenes de residuos, junto con las características peligrosas de los mismos, en algunos casos, generan impactos irreversibles que convierten el manejo de relaves mineros en una cuestión crucial. La composición físico-química de los relaves supone grandes desafíos adicionales para lograr paisajes física y químicamente estables que no representen riesgos como el drenaje ácido de las minas. La falta de manejo de los relaves puede resultar costosa, con graves e irreversibles consecuencias, incluso a veces catastróficas. El desconocimiento de la vulnerabilidad de estas obras incrementa los riesgos de desastres en la actualidad.

Es un hecho conocido que un gran número de los fallos de las presas de colas tienen diferentes orígenes, donde el factor fundamental está en la acción del agua, la sismicidad, su peso y aquellos elementos estructurales que en determinado momento las convierten en inestables. El colapso de las presas de colas de Brumadinho, Las Marianas (Brasil, 2015-2019), Mount Polley (Canadá, 2014), Kentucky (USA, 2000), Borsa (Rumania, 2000) y Anazcóllar, (España, 1998), constituyen ejemplos de fallos catastróficos.

La acción del cambio climático transforma el comportamiento de las variables climatológicas de forma impredecible, la ocurrencia de eventos de lluvias extremas o sequías severas ocurren cada vez con mayor frecuencia, esta alteración climática dispara los peligros de origen natural y provoca que las operaciones incorrectas en las obras produzcan mayores daños de origen tecnológico. Las presas de colas no están diseñadas para almacenar agua y son diseñadas para que el líquido acompañante de la pulpa se acumule, por proceso de decantación, en depósitos desde donde se bombea hacia el proceso metalúrgico, esto garantiza un proceso de recirculación de agua que permite la recuperación de los metales concentrados y del agua, bajando los costos de producción del producto final (Hernández, 2015).

Los grandes depósitos de colas en Cuba, aparecen a partir de la explotación de los depósitos lateríticos en los actuales municipios de Mayarí, en las zonas de Nicaro 1948 y Moa 1961. En la región de Moa existen cinco presas de colas, dos en operaciones, dos en cierre y una inactiva transformada en pasivo ambiental desde 1970.

Hernández et al, (2014), refieren en su trabajo que Moa hoy tiene el mayor peso específico de presas de colas en el país, existen reportes históricos de la ocurrencia de colapsos parciales en estas obras, las cuales han vertido significativas cantidades de colas al medio, provocando la contaminación de grandes extensiones de suelos, del sector costero, la colmatación de los cauces por acumulación de sedimentos, la destrucción de los bosques de galería de los ríos Moa, Cabañas y arroyo Los Lirios, además de un impacto visual negativo.

Atendiendo a las severas y, a veces, irreversibles consecuencias económicas, sociales y ambientales ocasionadas por una mala gestión de los relaves, es imprescindible utilizar metodologías para el manejo de residuos mineros (Adiansyah et al, 2015).

En la determinación del escenario de seguridad se debe tener en cuenta el grado de vulnerabilidad que posee la presa de colas ante la acción de peligros hidrometeorológicos, los cuales pueden desencadenar diferentes riesgos por deslizamientos de diques de contención y colapsos parciales o totales de la presa de colas (Hernández et al. 2021).

Wilches-Chaux (1988), plantea que la vulnerabilidad es la incapacidad de una comunidad para “absorber” mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente. Inflexibilidad ante el cambio. Incapacidad de adaptarse al cambio, que para la comunidad constituye, por las razones expuestas, un riesgo. Este propio autor, declara en su trabajo “La Vulnerabilidad Global”, que es necesario anotar que la vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, es decir, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características (internas y externas) que convergen en una comunidad particular.

La presa de colas No. 2 de Moa requiere de estudios que profundicen en el grado de vulnerabilidad de la presa ante los peligros naturales y tecnológicos, esto conlleva al incremento de la probabilidad de fallo de esta obra en escenarios vulnerables para las personas, propiedades y el medio natural. La ocurrencia de varias rupturas de los diques de contención ha provocado daños significativos a la economía, la población y al medio del entorno donde está ubicada esta estructura.

En la presente investigación se evalúa la vulnerabilidad global de la presa ante diferentes peligros, se aporta el diseño de una guía para la selección de los métodos de protecciones físicas, químicas, vegetales o mixtas que garantiza la selección adecuada de los materiales que aportan la estabilidad de los terrenos y disminución de vulnerabilidad de la estructura, las comunidades aledañas, propiedades industriales cercanas y el medio ambiente. Además, se logra incrementar el nivel de percepción del riesgo ante la ruptura de las presas de colas en Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La presa de colas No. 2 de Moa se encuentra ubicada hacia el este oriental de Cuba, en la provincia Holguín, al sureste de la ciudad de Moa. Desde los inicios de su construcción ha presentado problemas de estabilidad, debido a los estratos de baja resistencia presentes en los suelos de cimentación, estos se corresponden con los del valle aluvial del río Moa (ver Figura 1).



Figura 1. Presa de colas No. 2. Nota: La presa fue construida sobre el valle aluvial del río Moa. Fuente: Autores.

Para el desarrollo de la investigación se realiza un estudio geoambiental descriptivo del área de trabajo y de las propiedades geotécnicas de la presa de colas No. 2 de Moa. Se aplicaron varias técnicas para la recopilación de la información necesaria como: entrevistas, consultas a expertos y procesamiento de base de datos históricas. Se empleó la metodología de Wilches-Chaux (1988) y se aplicaron métodos de evaluación matricial de probabilidad e impacto tanto cualitativa y cuantitativamente para los factores condicionantes y disparadores de fallos de la presa de colas.

El software Slope/W© fue empleado para el análisis de la estabilidad de los taludes de la presa. La evaluación de la peligrosidad se realiza tomando como referencia investigaciones realizadas por diferentes organizaciones internacionales de Japón, Estados Unidos, Inglaterra y Australia. Los autores realizan modificaciones en base a las condiciones particulares de la obra objeto de estudio.

Los análisis geotécnicos realizados indican que las colas estudiadas, se clasifican como suelos combinados con índices de plasticidad entre 4 y 7 (CL- ML), estas muestras corresponden a un limo arcilloso con baja plasticidad. Los materiales clasificados como MH son limos de alta compresibilidad y plasticidad media. El

material ML son limos de baja compresibilidad y ligera plasticidad. La densidad de las partículas sólidas varía entre 1,8 y 3,8 g/cm³. El elevado peso específico está condicionado por la composición dada por grandes cantidades de metales pesados. La cohesión es baja, tiene un máximo de 22 kPa. El ángulo de fricción interna varía entre 25 y 42 grados.

Análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros en la presa de colas

Los factores condicionantes y disparadores de los peligros determinados, por los autores, como los de mayor incidencia en la investigación son:

- Factor litológico: representa la composición de los materiales que intervienen en la construcción de la presa: suelos de la cimentación, suelos como materiales de construcción de los diques y las colas.
- Factor topográfico: el elemento analizado es la pendiente de los taludes de los diques de la presa de colas. La pendiente de los taludes es la definida en los criterios de diseño para la construcción tanto para la vertical (V) como para la horizontal (H), (talud interior V-1:H-1.5 – y talud exterior V-1:H-3). La influencia de la pendiente sobre el desarrollo de fallos, se determina comparando el estado de los taludes cuando se incumple con lo establecido en los criterios del diseño constructivo.
- Factor estructural: representan los diferentes diques que componen la presa de colas. Los indicadores analizados fueron la relación de paralelismo entre los diques y el espesor de las capas.
- Factor climático: se toman en consideración los indicadores que caracterizan la situación climática del medio y el territorio como son: lluvia, régimen de lluvias, temperatura y humedad, se tiene en cuenta la variabilidad que el cambio climático ha provocado sobre estos indicadores.
- Factor hidrológico: representado por el balance hídrico en la presa de colas, el nivel freático, la existencia de cursos de agua y sistemas de drenaje, son una herramienta clave para los cálculos de entradas, salidas y volúmenes almacenados de agua.
- Factor geotécnico: corresponde con las propiedades geotécnicas de los suelos y colas. Los ensayos utilizados: humedad, límites de plasticidad, peso específico, distribución granulométrica, compactación, permeabilidad, licuefacción y deformabilidad y resistencia al cortante fueron el resultado de los ensayos realizados en varias campañas de investigaciones de campo, in situ como el *standard penetration test* (SPT, por sus siglas en inglés) y el *Cone Penetration Test* (CPT, por sus siglas en inglés), y pruebas de laboratorio, con el objetivo de determinar las propiedades físico-mecánicas para los análisis de estabilidad y diseño de taludes.
- Factor sismo: presenta aquellos indicadores que caracterizan la situación sismológica del medio como son: intensidad y magnitud, la actividad tectónica manifestada por las fallas activas y poco activas del territorio, y los movimientos que tienen lugar en el medio de baja e intensa magnitud.
- Factor uso del suelo: representa el grado de uso del terreno según indicadores

como redes técnicas donde se tomará en consideración los tipos de conducción de las aguas y las colas. En el uso del suelo intervienen además los indicadores urbanos e industriales, agrícolas y los suelos que quedaron agrupados en el concepto de ocupación del terreno. Este factor se valora a través del análisis matricial cualitativo y cuantitativo y es confirmado por reconocimiento de campo y un análisis auxiliar de fotografías satelitales. Está dividido en tres clases fundamentales: áreas en operación, áreas abandonadas, y áreas rehabilitadas.

- Factor acción antrópica: representado por la actividad humana, el tránsito de vehículos pesados, el manejo de los taludes y los focos de sobrecargas que se pueden producir en la presa.

Elementos en riesgo

En este artículo se realiza un análisis de los elementos en riesgo en el área de estudio, teniendo presente el nivel de exposición de los mismos ante el riesgo de fallo de la presa de colas, los cuales son:

- Población: se analiza que la presa de colas limita hacia el suroeste con la comunidad La Veguita, este asentamiento posee un total de 214 viviendas, y existen seis casas ubicadas a menos de 100 m del dique inicial de la presa de colas. El sector oeste de la presa limita con tierras de uso agrícola.
- Presa de colas: los análisis se basan en las vulnerabilidades de esta obra ante la acción de peligros naturales y tecnológicos y en la importancia de lograr minimizar los daños sobre la misma por su influencia en el proceso industrial y los daños que puede ocasionar su fallo sobre la población, el medio ambiente e instalaciones, así como la pérdida de grandes reservas de minerales que contienen las colas.
- Instalaciones: se valora la existencia de varias instalaciones industriales y de comunicaciones. Existen caminos mineros y de acceso a la población de La Veguita, pozos de abasto de agua a la población, red de piezómetros y puntos de control geodésico.
- Medio ambiente: se evalúan las probabilidades de daños a producirse por fallos en la presa de colas, sobre la red hídrica, además del suelo, la flora y fauna.

Estimación de los peligros naturales y tecnológicos en la presa de colas

En la Tabla 1 se distinguen cinco grados de ese peligro, desde la muy baja hasta la muy alta. La clasificación cualitativa de los peligros, por factores aparecen en la Tabla 2.

Tabla 1: Categorización y evaluación del peligro por fallo de los diques

Descripción	Suma total de los pesos
Peligro muy bajo (MB)	≤ 30.0
Peligro bajo (B)	30.1 – 60.0

Peligro medio (M)	60.1 – 80.0
Peligro alto (A)	80.1 – 90.0
Peligro muy alto (MA)	≥ 90.1

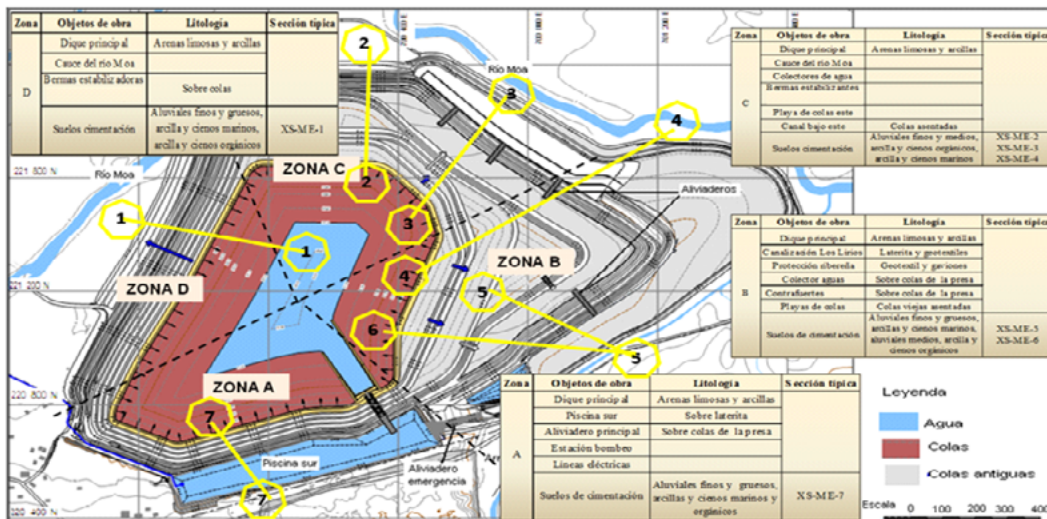
Tabla 2: Peso de los diferentes factores que condicionan y disparan los fallos en la presa de colas

Familia de factores	Tipos de factores	Peso en el análisis
Factores que caracterizan la susceptibilidad a fallos	Litología del suelo (diques y fundación)	20.0
	Estructura	5.0
	Topográfico	10.0
	Hidrológico	10.0
	Clima (temperatura y humedad)	1.0
	Uso de suelo	5.0
Factores que desencadenan fallos (eventos generadores)	Sísmicos	15.0
	Clima (lluvias)	4.0
	Zonas hidrológicas críticas, redes técnicas y nivel de antropización	10.0
Eventos ingeniero geológicos	Evidencias de ocurrencia	20.0
Sumatoria total		100.0

Zonificación para la evaluación de la vulnerabilidad por fallos de la presa de colas

Hernández (2015) en su investigación propuso la sectorización de la presa de colas No. 2 en cuatro zonas (A, B, C y D) con el objetivo de realizar un análisis detallado de la vulnerabilidad de la obra, partiendo de la identificación de los peligros de origen natural y antrópico de la presa de colas. El comportamiento geotécnico de la presa bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas se analiza a partir de varias secciones transversales por zonas (ver Figura 2).

Figura 2. Zonificación de la presa de colas No. 2.



Nota: la figura muestra objetos de obras por zonas, litología y sección típica. Fuente: Hernández (2015).

Factores de inestabilidad en la presa de colas

La estabilidad de la presa de colas depende de los factores condicionantes relacionados con las aguas subterráneas, la tectónica, la topografía, la textura y estructura de los materiales, así como su alteración o degradación mecánica. Los factores detonantes en las presas de colas pueden ser eventos naturales como las lluvias, los sismos, la erosión, los deslizamientos, la licuefacción o artificiales como cortes, rellenos, deforestación y operacionales de la presa de colas.

La existencia de la presa Nuevo Mundo, la cual almacena más de 100 millones de m³ de agua, y su ubicación en la cuenca superior de la presa de colas No. 2 constituye un riesgo potencial, pues un colapso de esta estructura, provocaría la destrucción total de la presa objeto de estudio. En el análisis de todos estos factores se tiene en cuenta la influencia del cambio climático, fundamentalmente, en la periodicidad e intensidad de los eventos meteorológicos, además de la interrelación de estos factores naturales con la acción antrópica presente en el área.

Metodología empleada para el desarrollo de la investigación

La metodología empleada se basa en la propuesta de Wilches-Chaux (1988), la cual identifica diez componentes o niveles de la vulnerabilidad global en los desastres, que conducen a determinar los tipos de vulnerabilidad. Entre estos se encuentran el económico, social, político, técnico, ideológico, cultural, educativo, geológico, institucional y físico; en este último se sitúan las vulnerabilidades que se evalúan en las edificaciones: la estructural, la no estructural y la funcional.

Determinación de las vulnerabilidades

Clasificación cualitativa de la vulnerabilidad global por cada grupo de eventos generadores de fallos, en cada zona y sus elementos estructurales y no estructurales.

El sistema propuesto considera los siguientes pasos para evaluar la vulnerabilidad global (VG):

- Determinación de la vulnerabilidad física (VF)
- Determinación de las vulnerabilidades complementarias (VC)
- Cálculo de la vulnerabilidad global (VG)

a) Vulnerabilidad física (VF)

Este proceso se divide en el análisis de las siguientes vulnerabilidades:

- Vulnerabilidad estructural
- Vulnerabilidad no estructural
- Vulnerabilidad funcional de la instalación

b) Vulnerabilidad estructural de la presa de colas

Análisis de la vulnerabilidad estática y pseudoestática de la presa: el software Slope/W© fue empleado para el análisis de la estabilidad. Los cálculos se basaron en las secciones típicas transversales de las distintas zonas de la presa. Los factores de seguridad estáticos mínimos, se fundamentan en las normativas de seguridad de la Canadian Dam Association (CDA) y la ICOLD, se considera factores de seguridad de 1.50 y de 1.30 durante el cierre de la instalación y para las operaciones respectivamente, debido a la no existencia de normativas de seguridad en Cuba para las presas de colas.

Análisis de la vulnerabilidad sísmica de la presa: está basado en los datos geotécnicos, litografía, las cargas y/o aceleraciones sísmicas introducidas en el modelo de estabilidad:

- 0,16g para el Terremoto de Diseño (TD) de 1 en 200 años.
- 0,23g para el Terremoto Básico de Operaciones (TBO) de 1 en 500 años.
- 0,32g en el Máximo Terremoto Creíble (MTC) de 1 en 1000 años.

Análisis de la vulnerabilidad hídrica de la presa: el objetivo principal de la gestión del agua es disminuir los impactos en las zonas aguas abajo de la presa de colas, al extender el tratamiento del sobrenadante y los escurrimientos. Los aliviaderos y canales se diseñaron para una probabilidad de 1 en 1 000 años para 24 horas de duración, las dimensiones de los aliviaderos y el canal de salida se calcularon, para los gastos de la tormenta de 1 en 1 000 años, los mismos aseguran la evacuación de las aguas de las lluvias.

c) Vulnerabilidad no estructural de la presa de colas

Análisis de la vulnerabilidad del equipamiento tecnológico: por las características funcionales de la presa como depósito de las colas que son bombeadas desde la planta de lavado a contracorriente, el equipamiento tecnológico consta de: 1-Redes de tuberías asentadas a todo lo largo de sus diques. 2-El punto de bombeo del agua recuperada. 3-El sistema de líneas eléctricas y de comunicaciones internas.

d) Vulnerabilidad funcional y organizacional

Se definen los más importantes aspectos de la estabilidad de los procesos, según la capacidad de producción. Deben analizarse aspectos tales como: 1- Incidencia del fallo de la presa en el proceso productivo, 2- Solución espacial de los objetos de obra, en particular de las tuberías para el traslado de las colas y agua, energía, comunicaciones, 3- Resultado de los derrumbes parciales, destrucción de puentes de tuberías y 4- Influencia de la presa en la paralización de cualquiera de las obras de infraestructura del territorio.

Después del análisis de los eventos de tipo progresivo que ocurren dentro del período de vida útil de la presa de colas (ver Tabla 3) se definen los niveles de la vulnerabilidad física en la presa de colas, con sus correspondientes porcentajes de afectación. Las vulnerabilidades se clasifican desde baja (VB), media (VM), alta (VA) y muy alta (VMA).

Tabla 3: Clasificación de la vulnerabilidad física

Proceso	Nivel de vulnerabilidad			
	VB ≤ 25 %	VM: 26 a 50 %	VA: 51 a 75%	VMA: 76 a 100%
Erosión superficial en taludes	Laminar o eólica	Con surcos aislados	Con surcos extendidos	Con cárcavas
Erosión interna en taludes	Suelos poco permeables y nivel freático bajo	Suelos de medio a permeables y nivel freático medio	Suelos permeables y nivel freático alto con drenes	Suelos permeables y nivel freático alto sin drenes
Deslizamientos	Brechas puntuales de menos de 1 m de ancho	Brechas puntuales entre 1 m a 3 m de ancho	Varias zonas con brechas entre 1 m a 3 m de ancho	Segmentos con brechas mayores a 3 m de ancho
Agrietamientos por sismos o débiles cimentaciones	Fisuras superficiales	Grietas medias superficiales	Grietas gruesas superficiales	Redes de grietas superficiales extendidas

Derrames de agua, colas, errores operacionales o accidentes	Una vez al año	Tres veces al año	Cinco veces al año	Más de cinco veces al año
-------------------------------------------------------------	----------------	-------------------	--------------------	---------------------------

e) Vulnerabilidades complementarias (VC)

Las cuatro vulnerabilidades que se analizan para el cálculo de la vulnerabilidad complementaria de la presa de colas son: vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE), vulnerabilidad económica (VE), vulnerabilidad social (VS) y vulnerabilidad científico-tecnológica (VCT).

La vulnerabilidad complementaria (VC) a diferencia de la física, es común para toda la presa, sus zonas y elementos estructurales y no estructurales, y es el promedio de las vulnerabilidades complementarias consideradas y se calcula por:

$$VC = \frac{VAE + VE + VS + VCT}{4} \tag{1}$$

En los casos de cada una de las vulnerabilidades complementarias, se registran las variables que más peso tienen en su evaluación y sus características, luego el valor final es el promedio de las correspondientes a cada variable, calculada por medio de la expresión siguiente:

$$V_j = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_i}{N_i} \tag{2}$$

Donde:

V_j - Vulnerabilidad promedio en %

$V_1 + V_2 + \dots$ - Vulnerabilidades por cada variable en %

N_i - Cantidad de variables evaluadas

Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE). Las variables para evaluar esta vulnerabilidad se fundamentan en las condicionales atmosféricas, la composición y calidad del aire y el agua, y las condiciones ecológicas. Su valoración aparece en la Tabla 4.

Tabla 4: Vulnerabilidad ambiental y ecológica.

Variable	Nivel de vulnerabilidad			
	VB ≤ 25 %	VM: 26 a 50 %	VA: 51 a 75 %	VMA 76 a 100 %
Condiciones Atmosféricas (CA)	Temperatura normal	Temperatura ligeramente superior al promedio anual	Temperatura superior al promedio anual	Temperatura superior estable al promedio normal
Composición y Calidad del Aire y el Agua (CCAA)	Sin contaminación	Con un nivel moderado de contaminación	Alto grado de contaminación	Contaminación muy alta
Condiciones Ecológicas (CE)	Conservación de recursos naturales, no contaminación	Explotación moderada de los recursos naturales y de contaminación	Explotación alta de los recursos naturales, y contaminación	Explotación indiscriminada de los recursos naturales

Esta vulnerabilidad se calcula por la siguiente ecuación:

$$VAE = \frac{CA + CCAA + CE}{3} \tag{3}$$

Vulnerabilidad económica (VE). La Tabla 5 contiene las variables características según el nivel de vulnerabilidad económica existente en la presa. Constituida por el acceso que pueda tener la empresa a los activos económicos (tierra, infraestructura, servicios, entre otros), refleja la capacidad para hacer frente a un desastre y está determinada, fundamentalmente, por el nivel de ingresos económicos de la actividad productiva y su impacto internacional. También se incluyen los efectos en el empleo y los niveles de ingresos para la población de la región cercana a la inversión.

Tabla 5: Vulnerabilidad económica

Variable	Nivel de vulnerabilidad			
	VB ≤ 25 %	VM: 26 a 50 %	VA: 51 a 75 %	VMA: 76 a 100 %
Actividad Económica (AE)	Alta productividad y recursos bien distribuidos.	Medianamente productiva y distribución regular de los recursos.	Escasamente productiva y distribución deficiente de los recursos.	Sin productividad y nula distribución de recursos.

	Productos para el comercio exterior o fuera de la localidad	Productos para el comercio interior, a nivel local.	Productos para el autoconsumo.	
Acceso al Mercado Laboral (AML)	Oferta laboral superior a la demanda	Oferta laboral igual a la demanda	Oferta laboral menor a la demanda	No hay oferta laboral
Nivel de Ingresos (NI)	Alto nivel de ingresos	Suficiente nivel de ingresos	Nivel de ingresos que cubre necesidades básicas	Ingresos inferiores para cubrir necesidades básicas

Esta vulnerabilidad se calcula por la siguiente ecuación:

$$VE = \frac{AE + AML + NI}{3} \tag{4}$$

Vulnerabilidad social (VS). Los elementos a evaluar en la vulnerabilidad social aparecen en la Tabla 6, en ella se analiza el nivel de organización y participación que tiene la empresa minera para prevenir y responder ante situaciones de emergencia. Mayor será la vulnerabilidad de una entidad si su cohesión interna es pobre, es decir, si las relaciones que vinculan a los miembros de la misma con el conglomerado social, no se afianzan en sentimientos compartidos de pertenencia y de propósito y que no existan formas organizativas que lleven esos sentimientos a acciones concretas.

Tabla 6: Vulnerabilidad social

Variable	Nivel de vulnerabilidad			
	VB ≤ 25 %	VM: 26 a 50 %	VA: 51 a 75 %	VMA: 76 a 100 %
Nivel de Organización de la Empresa (NOE)	Totalmente organizada	Organizada	Escasamente organizada	No organizada
Grado de Relación entre las Instituciones y Organizaciones Locales (GRIOL)	Fuerte relación	Medianamente relacionados	Débil relación	No existe

Tipo de Integración entre Organizaciones e Instituciones Locales (TIOIL)	Integración total	Integración parcial	Baja integración	No existe integración
--------------------------------------------------------------------------	-------------------	---------------------	------------------	-----------------------

Esta vulnerabilidad se calcula por la siguiente ecuación:

$$VS = \frac{NOE + GRIOL + TIOIL}{3} \tag{5}$$

Vulnerabilidad científica y tecnológica (VCT). Es el nivel de conocimiento científico y tecnológico que los trabajadores de la empresa tienen sobre los peligros de origen natural y tecnológico, especialmente los que trabajan directamente o los vinculados con la presa de colas. Además, evalúa el acceso a la información y el uso de técnicas para ofrecer mayor seguridad a los trabajadores frente a los peligros quienes deben estar informados sobre las medidas de prevención y mitigación, de la importancia de la vigilancia y monitoreo, para evitar el daño o el colapso de la misma, a fin de minimizar o reducir así los riesgos. Ver Tabla 7.

Tabla 7: Vulnerabilidad científica y tecnológica

Variable	Nivel de vulnerabilidad			
	VB ≤ 25 %	VM: 26 a 50 %	VA: 51 a 75 %	VMA: 76 a 100 %
Existencia de Trabajos de Investigación sobre Desastres en la Localidad (ETIDNL)	Todos los peligros fueron estudiados	La mayoría de los peligros fueron estudiados	Existen pocos estudios de los peligros naturales	No existen estudios de ningún tipo de peligros
Existencia de control de Fenómenos Completos (EIMFC)	Empresa totalmente instrumentada	Empresa parcialmente instrumentada	Empresa con escasos instrumentos	Empresa sin instrumentos
Conocimiento sobre la Existencia de Estudios (CEE)	Conocimiento total de los estudios existentes	Conocimiento parcial de los estudios	Mínimo conocimiento de los estudios existentes	No tienen conocimiento de los estudios

Esta vulnerabilidad se calcula por la siguiente ecuación:

$$VCT = \frac{ETIDNL + EIMFC + CEE}{3} \quad (6)$$

f) Vulnerabilidad global (VG)

Para fines de la estimación o valoración del riesgo, la vulnerabilidad global (VG) se clasifica en cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. En la Tabla 8 se presenta la clasificación, descripción y valor de la vulnerabilidad global.

Tabla 8: Clasificación, descripción y valor de la vulnerabilidad global

Nivel de vulnerabilidad	Descripción/Características	Rangos de VG
VMB y VB	Presas asentadas sobre terrenos seguros, sismo-resistentes. Entidad de ingreso medio a alto, con estudios y cultura de prevención, cobertura de servicios básicos, buen nivel organizativo y participación, articulación entre instituciones y organizaciones existentes.	≤ 25 %
M	Presas asentadas sobre suelos de calidad intermedia, aceleraciones sísmicas moderadas, inundaciones muy esporádicas. Material regular y buen estado de conservación. Ingresos económicos medios, cultura de prevención en desarrollo, cobertura parcial de los servicios básicos y atención para servicios de emergencia. Entidad organizada, con participación de la mayoría, medianamente relacionada e integración parcial.	De 26 a 50 %
VA	Presas asentadas en zonas que se esperan altas aceleraciones sísmicas, con material en mal y regular estado. Entidad con escasos recursos económicos, sin conocimientos y cultura de prevención, cobertura parcial de servicios básicos, accesibilidad limitada para servicios de emergencia, escasa organización, mínima participación, débil relación y una baja integración.	De 51 a 75 %
VMA	Presas asentadas en zonas de suelos con alta probabilidad de ocurrencia de licuación y colapsos, construcción precaria. Entidad de escasos recursos económicos, sin cultura de prevención, inexistencia de servicios básicos y accesibilidad limitada para atención a emergencias; así como una nula organización y participación entre las instituciones y organizaciones existentes.	De 76 a 100 %

Esta vulnerabilidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$VG = \frac{Pf + VF + VC}{Pf + 1} \quad (7)$$

Donde:

Pf – Peso ponderado de la vulnerabilidad física en la vulnerabilidad global, que depende de la importancia socio-económica de la inversión en estudio (ver Tabla 9). VF – Vulnerabilidad física de un elemento, zona o la presa y VC – Vulnerabilidad complementaria de la presa.

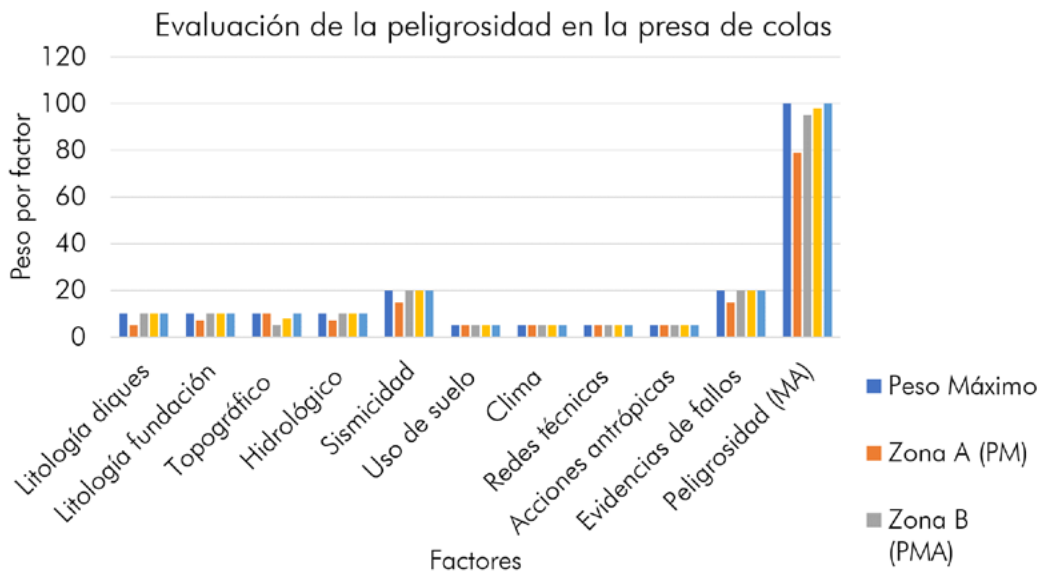
Tabla 9: Valores recomendados de P_f.

Categoría de la obra	P _f
Sector educación y cultura	1.10 – 1.30
Sector industrial	1.30 – 2.00
Sector agropecuario	1.00 – 1.20
Sector salud	1.20 – 1.50
Viviendas	1.00 – 1.15
Edificios	1.60 – 2.00

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la evaluación matricial de probabilidad e impactos de los factores que determinan el nivel de peligrosidad de la presa de colas No. 2, permite conocer que la Zona A clasifica como una peligrosidad media y las Zonas B, C y D como muy altas (ver Figura 3). El peligro de la sismicidad es muy alto para toda la presa, el incremento de la actividad sísmica en la zona eleva las probabilidades de ocurrencia de fallos ante un terremoto. Los fallos geotécnicos están representados por hundimientos existentes al noreste (0.52 m) y noroeste (0.26 m) de la obra se deben al recrecimiento de la presa sobre colas poco consolidadas, con un alto nivel de sobresaturación, la sobrecarga que provoca el peso de los diques sobre estas zonas favorece la ocurrencia del fenómeno de la licuefacción y la aparición de varias familias de grietas con orientación noreste.

Figura 3. Evaluación cuantitativa y cualitativa de la peligrosidad sobre la presa de colas. Fuente: Autores



Vulnerabilidad física (VF)

a) Vulnerabilidad estructural de la presa de colas

Los cálculos de la vulnerabilidad estructural estática se basaron en las secciones típicas transversales de las distintas zonas de la presa. Los resultados del cálculo de factores de seguridad estático y sísmico para las distintas secciones transversales según la zonación geotécnica de la presa de colas se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Cálculos de los factores de seguridad estático y sísmico para las distintas secciones transversales.

Sección transversal	Factor Seguridad Estático	Factor Seguridad Sísmico
XS-ME-1	1.59	1.21
XS-ME-2	1.34	1.2
XS-ME-3	1.39	1.31
XS-ME-4	1.25	1.19
XS-ME-5	1.61	1.26
XS-ME-6	1.47	1.2
XS-ME-7	1.4	1.38

El análisis de estabilidad promedio de las muestras de los diques en las secciones transversales se describe como:

- La sección XS-ME-7 (Zona A) posee un factor de seguridad estático de 1,4 y 1,38 sísmico. Comprende la zona más estable de la presa de colas, dentro

- de la misma aparece la piscina sur y el aliviadero principal de emergencia.
- Las secciones XS-ME- 4, 5 y 6 (Zona B) tienen un factor de seguridad superior de 1,61 durante todas las fases constructivas. En la sección XS-ME-4 no se logra satisfacer el factor de seguridad sísmico (1.19), resultado del bajo nivel de consolidación de las colas que ocupan los contrafuertes y los sedimentos marinos en los cimientos muy granulados y suaves, ubicados aguas abajo de la presa en dirección este. Se construirán varios contrafuertes para garantizar la estabilidad de la zona.
 - Las secciones XS-ME- 2 y 3 (Zona C) presenta un factor de seguridad máximo de 1,39. En esta área fue construido un contrafuerte para aumentar el factor de seguridad.
 - La sección XS-ME-1 (Zona D) satisface el factor de seguridad estático requerido de 1,30 y sísmico 1.2, se construirá un contrafuerte hacia el noroeste.

Martínez et al., (2017) realizan los estudios geotécnicos en las mismas secciones transversales de este trabajo, pero aplicando otro método para el cálculo del factor de seguridad, como el de los estados límites, concluyendo de la existencia de inestabilidades en la presa de colas, las cuales coinciden con las determinadas en este trabajo.

b) Vulnerabilidad no estructural de la presa de colas

La vulnerabilidad del equipamiento tecnológico en las diferentes zonas de la presa de colas posee altas probabilidades de ser dañadas ante la acción de los peligros naturales o antrópicos, aunque la misma clasifica como peligrosidad media, esta zona recibirá los mayores daños por el alto nivel de concentración de redes de tuberías de deposición de las colas y de agua, estación de bombeo, sistema de comunicación vial y de distribución de las colas por el perímetro de la presa. El resto de las zonas tiene una peligrosidad muy alta, de ocurrir algún evento los daños se centrarán en las redes de tuberías de deposición de colas y en las vías de acceso a la obra.

c) Vulnerabilidad funcional y organizacional

El nivel de funcionalidad de la presa de colas será dañado gravemente ante la acción de los diferentes peligros, las redes de tuberías, de comunicación y viales dejarán de funcionar normalmente, lo cual paralizará el proceso industrial. Se deben tomar acciones de prevención, como la construcción de un depósito de emergencia que puedan almacenar las colas por un espacio de tiempo que permita la reparación de los daños ocasionados en la presa, así como poseer otras vías de acceso a la instalación y plantas móviles de generación de energía.

La matriz final de evaluación de la VF de cada una de las zonas de las presas de colas y sus elementos estructurales y no estructurales, cualitativamente se muestra en la Tablas 11a, mientras que la cuantitativa, aparece en la Tabla 11b.

Tabla 11: a). Clasificación cualitativa de la vulnerabilidad física por zonas (VF)

Eventos naturales	A	B	C	D
Erosión superficial	25	65	90	95
Deslizamientos	25	45	70	95
Agrietamientos	20	35	80	95
Fallos por sismos	100	100	100	100
Eventos Tecnológicos	A	B	C	D
Fallos de operación	85	75	60	90
Rotura presa NM	100	100	100	100

Tabla 11: b). Clasificación cuantitativa de la vulnerabilidad física (VF) por zonas

Eventos naturales	A	B	C	D
Erosión superficial	B	A	MA	MA
Deslizamientos	B	M	A	MA
Agrietamientos	B	A	MA	MA
Fallos por sismos	MA	MA	MA	MA
Eventos Tecnológicos	A	B	C	D
Fallos de operación	MA	MA	A	MA
Rotura presa NM	MA	MA	MA	MA

Vulnerabilidades complementarias (VC)

a) Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE)

Con la evaluación de las variables se determina que existen altas temperaturas, las cuales superan los 50 °C, elevada contaminación existente en el medio por la presencia de polvo y gases tóxicos, la actividad antrópica en el área de estudio es muy significativa. Entonces, de la aplicación de la Ecuación (3) se obtiene:

$$VAE = \frac{75 + 50 + 75}{3} = \frac{200}{3} = 66.67\%$$

b) Vulnerabilidad económica (VE)

Teniendo en cuenta el comportamiento de las variables características según el nivel de VE existente en la presa (ver Tabla 5), se define como: la empresa posee una alta productividad y sus derivados se envían para el comercio exterior, por eso es de 25 %. El acceso al mercado laboral ostenta un nivel alto, ya que la oferta laboral es menor que la demanda (75 %), los niveles de ingresos son altos (25 %). De la aplicación de la Ecuación (4) se obtiene:

$$VE = \frac{25 + 75 + 25}{3} = \frac{125}{3} = 25\%$$

c) Vulnerabilidad social (VS)

Los elementos a evaluar en la VS se analizan a partir del nivel de organización y participación que tiene la empresa, para prevenir y responder ante situaciones de emergencia. Los valores de las variables mencionadas se expresan a continuación (ver Tabla 6). Nivel de organización: entidad organizada (50 %), Grado de relación entre las organizaciones locales: fuerte relación (25 %) y la Integración entre las organizaciones: integración total (25 %).

Entonces de la aplicación de la Ecuación (5) se obtiene:

$$VS = \frac{50 + 25 + 25}{3} = \frac{100}{3} = 33.33\%$$

d) Vulnerabilidad científica y tecnológica (VCT)

Los valores de las variables de la VCT (ver Tabla 7) se expresan a continuación: La mayoría de los peligros naturales fueron estudiados (50 %). Empresa totalmente instrumentada (25 %) y Conocimiento total de los estudios existentes (25 %). El valor promedio de esta vulnerabilidad es, de acuerdo con la aplicación de la Ecuación (6):

$$VCT = \frac{50 + 25 + 25}{3} = \frac{100}{3} = 33.33\%$$

La VC de la presa y sus zonas será el promedio de las puntuaciones de los cuatro tipos de vulnerabilidades evaluadas, entonces de la aplicación de la Ecuación (1) se obtiene:

$$VC = \frac{66.67 + 25 + 33.33 + 33.33}{4} = \frac{158.33}{4} = 39.5825 \approx 40\%$$

Vulnerabilidad global (VG)

En la Figura 3 y la Tabla 12 se muestra la estimación cuantitativa y cualitativa de la VG en las zonas de la presa de colas No. 2 aplicando la Ecuación (7), en función de los valores de la VF, VC y como valor de P_f se tomó 1.50.

Figura 3. Vulnerabilidad global cuantitativa de las zonas de la presa de colas No. 2.

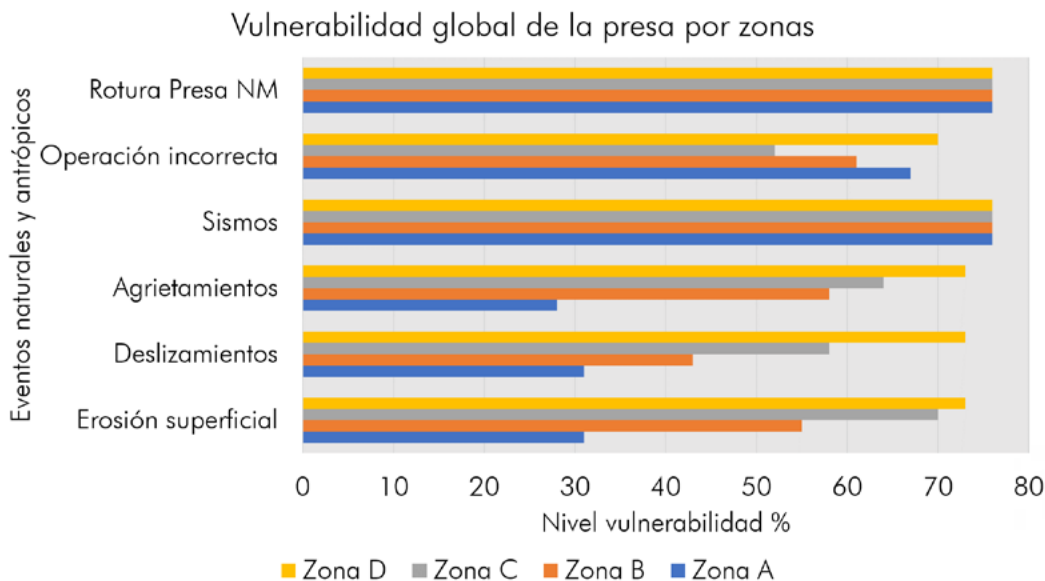


Tabla 12. Resumen de la clasificación cualitativa de la VG por zonas de la presa No.2

Eventos Naturales	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
Erosión superficial	M	A	A	A
Deslizamientos	M	M	A	A
Agrietamientos	M	M	A	A
Fallos por sismos	MA	MA	MA	MA
Eventos Tecnológicos	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
Fallos por operación	MA	MA	A	MA
Rotura Presa Nuevo Mundo	MA	MA	MA	MA

La evaluación de la vulnerabilidad global en cada una de las zonas de la presa de colas por tipo de eventos, se detalla a continuación:

El fallo ante la ocurrencia de un sismo provoca una vulnerabilidad muy alta dentro de los eventos naturales para todas las zonas, la erosión superficial, los deslizamientos y los agrietamientos inducen a una vulnerabilidad alta, para las zonas B, C y D, en las Figuras 4a y 4b se muestra la existencia de grandes cárcavas, grietas y deslizamientos que demuestran la veracidad de estos resultados.

Figura 4 a). Cárcava de gran magnitud en la zona C. b) Deslizamiento en diques de la zona D



Los peligros tecnológicos como fallos operacionales provocan una vulnerabilidad muy alta para todas las zonas de la obra, esto se debe a la concentración de las redes de tuberías y estación de bombeo, así como el aliviadero de emergencia. La rotura de la presa Nuevo Mundo para todas las zonas de la presa de colas induce a la existencia de una vulnerabilidad muy alta.

La ocurrencia del fallo de varios diques de la presa de colas en el año 2014 constituye una combinación de la confluencia de peligros de origen hidrometeorológico y tecnológico, esto provocó daños significativos por contaminación a la comunidad de La Veguita, la economía y al medio ambiente, además existió un alto riesgo de contaminación para los pozos de agua de abasto al 30 % de la población del municipio, así como el río Moa y los bosques de galería del entorno. Ver Figura 5.

Figura 5. Ubicación de deslizamiento de la presa, la comunidad La Veguita y los pozos de abasto de agua a la población de Moa



CONCLUSIONES

La evaluación de la vulnerabilidad global de la presa de colas No. 2 permitió alcanzar un alto nivel de información sobre la susceptibilidad de la estructura ante la acción de peligros de origen natural o tecnológico. El deterioro que ha ocasionado la erosión, el agrietamiento y los deslizamientos a los diques de contención, de forma general, incrementa la probabilidad de fallos ante casos como: la ocurrencia de un sismo, violaciones en los procedimientos de las operaciones o el colapso de la presa para agua Nuevo Mundo.

La investigación demostró que las zonas A y D poseen los mayores niveles de vulnerabilidad ante operaciones incorrectas, debido a la concentración de las redes de tuberías para la redistribución de las colas, las estaciones de bombeo de colas y aguas de recirculación hacia el proceso industrial, así como la existencia del aliviadero principal y la piscina sur. Además, la existencia de la comunidad La Veguita aguas abajo de estas zonas, indica que la misma será afectada severamente de ocurrir un colapso en la presa de colas.

Las zonas B, C y D se consideran con una vulnerabilidad global muy alta. La presencia de varios fallos geotécnicos locales como deslizamientos, hundimientos y grandes cárcavas, agravan la problemática existente. La ocurrencia del fallo de varios diques en la zona D, en el año 2014, ratifica la veracidad de los resultados de esta investigación.

Los hallazgos de este tipo de investigación aportan las informaciones necesarias para el diseño de los planes de gestión y reducción de riesgos para las presas de colas, partiendo de los resultados específicos de todos los tipos de vulnerabilidades que poseen las obras, además facilita el proceso de modelación de escenarios de forma prospectiva ante otros tipos de peligros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S. y Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108 (Part A, 1), 1050-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Álvarez. M. J. (2017). Sostenibilidad de tratamientos de residuos mineros asociados al riesgo [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo]. Archivo digital. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43659/TFMMirenJosuAlvarezAmigoRUO.pdf;jsessionid=AC3207AEA3BEED3630537DC314F549F0?sequence=6>
- Hernández, T. y Guardado, R. M. (2015). Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. *Minería y Geología*, 30(4), 55-69. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/>

- article/view/837
- Hernández, T. y Ulloa, M. (2014). Impacto ambiental de la ampliación de una presa de colas de la industria cubana del níquel. *Minería y Geología*, 30(3), 33-48. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/Hdez>
- Hernández, T. (2015). *Sistema de gestión de riesgos por fallos de la presa de colas de la empresa Pedro Sotto Alba* [Tesis doctoral no publicada, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa].
- International Commission on Large Dams [ICOLD]. (2001, s.f). *Bulletin 121: Tailing dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences.* <https://ussdams.wildapricot.org/resources/Documents/ICOLD%202001%20Bulletin%20121.pdf>
- Martínez, R., Hernández, T. y Chacón, Y. (2017). Método de cálculo de taludes por estados límites. Caso de estudio presa de colas Pedro Sotto Alba. *Avances*, 19(3), 240-244. <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/275>
- Oldecop, L., Zabala, F., Rodríguez, R. L. y Garino, L. (2008, 24 de septiembre). Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros [conferencia]. V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, Tucumán, Argentina. https://www.researchgate.net/publication/242672940_Funcionamiento_hidraulico_estabilidad_y_mecanismos_de_rotura_de_presas_de_relaves_mineros
- Wilches-Chaux, G. (1988). *La Vulnerabilidad Global*. <https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/sites/sistema-nacional-emergencias/files/documentos/publicaciones/La%2Bvulnerabilidad%2Bsocial%20WILCHES%2BCHAUX.pdf>
- WISE Uranium Project. (2020, 8 de julio). *Chronology of mayor tailings dam failures*. <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>