

Valoración del sistema de monitoreo implementado en la presa de colas de la fábrica Pedro Sotto Alba

Yailan Cantillo Frómata

ycantillo@ismm.edu.cu

Teresa Hernández Columbié

tcolumbie@ismm.edu.cu

Universidad Moa (Cuba)

Jorge Luis Urria Abraira

jurra@moanickel.com.cu

Bárbara Yanela Leyva Estrada

bleyva@moanickel.com.cu

Empresa Moa Nickel S. A.

Resumen: Se evaluaron los métodos de monitoreo existentes, funcionamiento y nivel de influencia en la estabilidad física para la prevención, corrección o mitigación de riesgos por fallos de la presa de colas de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa. El procesamiento de los datos obtenidos de los diferentes instrumentos de control, permitieron identificar los sectores más vulnerables de la obra ante amenazas naturales o antrópicas. El trabajo se basó en la recopilación de las mediciones de monitoreo del control topográfico, ensayos geotécnicos de humedad del material utilizado en la construcción y los resultados de la geofísica de Ground Penetration Radar (GPR); además de la evaluación de las imágenes satelitales y fotografías correspondiente a un periodo de un año de trabajo. Los resultados de los instrumentos indican la existencia de desplazamientos verticales y horizontales en la zona norte entre 10 a 12 cm, unido a la existencia de surcos y cárcavas de gran magnitud favorecen la ocurrencia de deslizamientos en los diques del sector norte. Se propone un plan de medidas de prevención, corrección o mitigación de los probables impactos negativos a producirse ante un fallo de la presa de colas.

Palabras clave: riesgos geotécnicos; mecanismo de fallos; desplazamientos; método de monitoreo.

Assessment of the monitoring system implemented in the Pedro Sotto Alba tailings dam

Abstract: The existing monitoring methods, operation and level of influence on physical stability for the prevention, correction or mitigation of risks due to failures of the tailings dam of the Pedro Sotto Alba de Moa company were evaluated. The processing of the data obtained from the different control instruments, allowed to identify the most vulnerable sectors of the work before natural or anthropic threats. The work was based on the compilation of topographic control monitoring measurements, geotechnical moisture tests of the material used in construction and the results of the Ground Penetration Radar (GPR) geophysics; in addition to the evaluation of satellite images and photographs corresponding to a period of one year of work. The results of the instruments indicate the existence of vertical and horizontal displacements in the northern zone between 10 to 12 cm, together with the existence of furrows and gullies of great magnitude, favor the occurrence of landslides in the dikes of the northern sector. A plan of measures for the prevention, correction or mitigation of the probable negative impacts to occur in the event of a failure of the tailings dam is proposed.

Keywords: geotechnical risks; failure mechanism; displacements; monitoring method.

Introducción

La minería es una actividad que aporta un alto valor económico a la sociedad donde se desarrolla. El proceso de extracción trae consigo efectos negativos en el medio ambiente, producto al desbroce y vertimiento de los residuos conocidos como colas, resultado del procesamiento de las menas de interés.

En el proceso de extracción de níquel y cobalto, contenidos en las menas lateríticas de Moa, se generan desechos sólidos y líquidos los cuales son almacenados en construcciones específicas denominadas presas de colas. Estos residuos se han depositado desde los años sesenta, cuando comenzó la explotación de los yacimientos lateríticos en la fábrica comandante Pedro Sotto Alba de Moa hasta la actualidad. Esta planta es una de las más eficientes del mundo, y como resultado de su proceso de obtención del mineral, cada día genera en promedio más de 8 000 t secas de residuos lixiviados que son depositados en la presa de colas.

En los diferentes periodos de construcción y operación de la presa de colas no siempre se han tenido en consideración todos los requerimientos técnicos para la conservación de las mismas, provocando en ocasiones la falla de la estructura. Esto está influenciado además por no contar con el conocimiento necesario para el manejo de los residuos ácidos provenientes del proceso tecnológico de lixiviación ácida de alta presión.

El diseño de construcción se hace a través del método aguas arriba, y el concepto general de su diseño, se basa en la proyección de diques de contención perimetrales que van aumentando su altura de forma sistemática adoptando una disposición de acuerdo al método constructivo empleado.

Los fallos de las presas de colas causan, generalmente, desastres ambientales irreversibles para el medio ambiente, la economía y la sociedad. Garantizar la estabilidad física de estas estructuras se logra por medio de un sistema de monitoreo eficiente que permita predecir el comportamiento de las obras, y con ello la activación del plan de reducción de desastres para prevenir, corregir o mitigar posibles impactos negativos.

Los análisis de los incidentes históricos de las presas de colas realizados por Rodríguez & Oldecop (2009) demuestran que existe una relación directamente

proporcional entre los mecanismos de fallos por deslizamientos de taludes, erosión y sobrepaso, el método constructivo aguas arriba y el número de incidentes de fallos ocurridos.

La International Commission On Large Dams (ICOLD) revela que los fallos de las presas de colas activas a nivel mundial están relacionados con deslizamientos del talud (22 %), terremotos (17 %), sobrepaso (18 %), otros fallos (27 %) y de origen desconocidos (16 %) (ICOLD, 1995). De la Cruz (2017) concluye que el agua es el principal factor que influye en las condiciones de fallo o rotura para que se produzca una liberación de residuos al medio ambiente. La existencia de un sistema de monitoreo es vital para mantener un control de los posibles fallos a ocurrir.

Hernández & Guardado (2014) y Hernández & Ulloa (2014) aportan valiosos resultados para el conocimiento del riesgo que representan las presas de colas para el medio ambiente, la población y la economía del país, además reconoce el valor que poseen los instrumentos de monitoreo para mantener la seguridad de estas estructuras.

La existencia de insuficientes estudios sobre la influencia del sistema de monitoreo durante todo el ciclo de vida de los proyectos de las presas de colas, provoca niveles de incertidumbre muy altos sobre la estabilidad física de las mismas. El propósito de este trabajo es demostrar la necesidad de mantener un sistema de monitoreo integrado a todas las etapas de construcción, operación, cierre y post cierre de las presas de cola, garantizando de forma preventiva la ocurrencia de accidentes o colapsos de las estructuras.

Materiales y métodos

Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio

Geográficamente el área de estudio se encuentra al noreste de la planta procesadora de níquel Pedro Sotto Alba en el municipio de Moa, situado en la parte más oriental de la provincia de Holguín. Limita al norte con el Océano Atlántico, al este y sur con la provincia de Guantánamo y al oeste con los municipios de Sagua de Tánamo y Frank País (Figura 1).

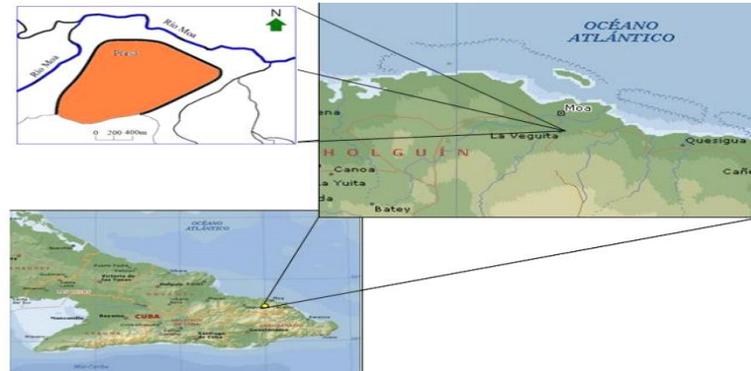


Figura 1. Ubicación geográfica de la presa de colas de la empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

El relieve es escarpado donde el 6% de la superficie es de llanuras aluviales fundamentalmente y el 94 % montañas. La presa de colas se construye en el valle aluvial del río Moa. Al Sur se desarrolla un relieve montañoso con macizos muy intemperizados y erosionados que están diseccionadas por los cauces de los ríos Moa, Cabaña y el arroyo Los Lirios, conformando la red de drenaje principal que tributa hacia el área de estudio.

Según Ariosa *et al.* (2003) el territorio de Moa se caracteriza por su gran complejidad, debido a la superposición de eventos con edades y estilos diferentes, que directa o indirectamente intervienen en la génesis, desarrollo y conservación de los yacimientos ferroniquelíferos; dando origen al cinturón plegado, representado por la corteza oceánica del arco volcánico cretácico, las cuencas superpuestas de primera y segunda generación y los sedimentos noeplatafórmico. De acuerdo a los informes ingenieros geológicos en cuanto a la litología local se localizan los siguientes tipos de suelos: sedimentos de ríos que han sido depositados sobre la llanura costera y los sedimentos marinos, en base o pie de las montañas, formando una red complicada de sedimentos del periodo cuaternario.

Guardado y Riverón (1997) refieren que la tectónica de la región es sumamente compleja, estando representada por estructuras disyuntivas de diferentes tipos, magnitudes y edades, estructuras explicativas poco visibles, pero existentes y discordancias estructurales que permiten la división en pisos estructurales.

El procesamiento de las grietas de los alrededores de la ciudad de Moa, determinó 6 familias, correspondiendo 3 de ellas a las asociadas a los planos de cabalgamiento (rumbo NNW), con ángulos de buzamientos bajos a ligeramente altos, con grietas

cerradas o rellenas de milonita o brecha tectónica, siendo grietas de cizalla y uno de los sistemas más antiguos.

Según su orden las fallas principales son: Sabana o La Española, Moa, Cabañas, Quesigua y el cuarto sistema de fracturas que aparece en el territorio, corresponde a estructuras sublongitudinales que aparecen en toda el área.

La zona donde está ubicada la presa de colas se corresponde con una llanura aluvial, sobre el zócalo de antiguos macizos de rocas metamórficas, originada por los ríos Moa, cabaña y los lirios, la cual transicional hacia una llanura fluvio-marina-deltáica hacia el norte cerca de la desembocadura.

La presa de colas se localiza en el valle aluvial del río Moa, que la rodea en la parte W y N; por el este la bordea el arroyo Los Lirios. El aumento de los niveles en el cauce del río Moa por crecidas o avenidas grandes trae como consecuencia el represamiento de este debido al gran volumen de azolves, lo que hace retroceder los flujos del arroyo Los Lirios potenciando el efecto erosivo sobre los taludes aledaños al sur de la presa de colas.

Metodología y volúmenes de los trabajos realizados

La metodología aplicada en la investigación parte de la recopilación bibliográfica, búsqueda de informes técnicos, proyectos, licencias ambientales, reportes de incidentes medio ambientales, reportes de monitoreo y datos de trabajos ejecutados en la región y el área de estudio. Se dividió el trabajo en dos etapas fundamentales:

Etapas I: recopilación de la información y revisión bibliográfica

Etapas II: procesamiento de la información (obtención e interpretación de resultados).

Primera etapa: recopilación de la información

En esta etapa se realizó una búsqueda de los reportes técnicos emitidos por las diferentes entidades relacionadas con el control y monitoreo de la presa de colas. Se crearon una serie de gráficos y tablas con los datos obtenidos a partir de la interpretación de los resultados de la evaluación estadística del año 2021 y en algunos casos hasta julio del 2022.

El análisis se enfocó en el análisis de los datos aportados por los métodos de monitoreo empleados en cada una de las etapas de la presa, como medidas preventivas ante la probabilidad la ocurrencia de fallos en las construcciones ingenieriles de este tipo.

Los instrumentos y métodos de monitoreo existentes en la presa de colas son: piezómetros (cuerda vibrante), pozos hidrológicos, monumentos topográficos, medición del caudal y sólidos en las salidas de los drenes, imágenes satelitales, fotografías, pluviómetros, resultados de los ensayos geotécnicos (proctor, humedad, granulometría y compactación), estudios geofísicos y observaciones directas en el terreno.

En esta etapa se realizó el análisis de los monitoreos que se realizan para la prevención de posibles fallas que puedan existir en la presa de Pedro Sotto Alba, Moa. Así como la evaluación de los estudios realizados en las investigaciones precedentes donde se identificó el empleo el pluviómetro, piezómetro, monumentos para el control topográfico y determinaciones de proctor, humedad, granulometría, compactación. La implementación de métodos geofísicos como tomografías eléctricas y el Ground Penetration Radar (GPR) se ha evaluado como un posible método de monitoreo para el estudio del basamento rocoso y de sectores vulnerables de la presa; pero este último no se ha generalizado.

Los piezómetros son elementos de monitoreo que se utilizan para mediciones del agua subterránea. En ellos se pueden medir parámetros como la profundidad del nivel freático y la presión intersticial del terreno en suelos y rocas. Permiten la extracción de muestras de agua para determinar sus componentes o incluso para detectar la presencia de elementos contaminantes como los hidrocarburos. El uso de los piezómetros es amplio en temas de geotecnia e hidrogeología.

Los piezómetros del tipo de cuerda vibrante son los instalados en la presa de colas. Se utilizan para controlar, además del nivel freático, las variaciones de las presiones intersticiales del terreno en el punto donde están instalados. La medición de la frecuencia vibratoria se realiza mediante un cable tensado a una membrana y un tubo principal; la medición se realiza por medio de una bobina electromagnética.

Los pozos hidrológicos están instalados por toda la presa de colas, su ubicación responde a los resultados de los estudios hidrogeológicos, la existencia de agua tipo

artesiana dentro de las colas requiere de un seguimiento del comportamiento de la misma dentro de la presa, el nivel de las aguas se controla periódicamente, además se toman muestras de aguas para determinar el nivel de sólidos en suspensión, pH y otros elementos de interés.

Los monumentos (Mon) son un marcador fijo relativamente permanente utilizado en topografía, tal como un bloque de hormigón o una placa de acero, con la inscripción de la localización y la cota. Aporta información sobre la cantidad de monumentos existentes y frecuencia de control. En la presa existen 4 monumentos y son controlados semanalmente bajo condiciones normales, ante la ocurrencia de un sismo o lluvias de gran intensidad son monitoreados diariamente.

La medición del caudal y sólidos en suspensión en las salidas de los drenes, este método se realiza mensualmente bajo condiciones normales, con la ocurrencia de lluvias intensas el monitoreo se realiza con mayor frecuencia, el incremento de los caudales de aguas o del nivel de los sólidos en suspensión indica la necesidad de incrementar el monitoreo de los demás instrumentos para evitar que se activen mecanismos de fallas en la presa de colas. Los drenes supervisados se encuentran en la salida del aliviadero de emergencias de la piscina Sur, en la Extensión Norte y el contrafuerte oeste la obra.

Las imágenes satelitales se realizan a través de la información generada por vuelos de drones y modelos digitales del terreno (MDT), este control se realiza dos veces al año bajo condiciones normales, la frecuencia depende de la existencia de sectores vulnerables a la ocurrencia de fallos.

La toma de fotografías, se realiza periódicamente ante la presencia de fenómenos que denoten la activación de procesos de probables fallos en los diques u otras áreas de la presa de colas incluyendo las estructuras auxiliares como aliviaderos, tuberías, bombas, líneas eléctricas o de comunicación.

El control a través de pluviómetros es otro método de control de las precipitaciones atmosféricas. En la presa están instalados dos piezómetros, además se toman datos de otros instrumentos existentes en el Moa Oriental y en la derivadora del río Moa.

Los resultados de los ensayos geotécnicos (proctor, humedad, granulometría y compactación) se realizan diariamente y están asociados a la construcción de los

diques. Los diques son levantados por capas de 30 cm, con una humedad máxima de 23 %. A través de la toma de muestras de suelos y mediciones *in situ* de la humedad y de la densidad se define la calidad de la construcción ejecutada. De no cumplirse con las normas de diseño la construcción se paraliza hasta que se corrijan los parámetros de calidad del proyecto.

Los métodos geofísicos se encargan del estudio de la tierra desde de vista físico, su objetivo es estudiar los fenómenos relacionados con su estructura, condiciones físicas e historia evolutiva. El GPR es un sistema electromagnético diseñado para la localización de objetos, exploración y estudio no destructivo bajo la superficie de la tierra. Este método se aplica en la geología al estudio e investigación del basamento rocoso permitiéndonos descubrir fallas y estructuras geológicas presentes en el subsuelo rocoso.

Las observaciones directas en el terreno, se basan en inspecciones que se realizan de forma diaria durante la jornada de trabajo, los jefes de brigadas y los operadores de la deposición de las colas revisan el buen funcionamiento de todas las operaciones de la presa, incluyendo las estructuras auxiliares.

La integración de todos los datos de los instrumentos y acciones de control aseguran el cumplimiento de los parámetros de construcción y operación de diseño de los proyectos, las desviaciones que ocurran serán corregidas y se informaran dentro de los controles de cambios de los proyectos, además se debe actualizar el plan de gestión de riesgos existente.

Segunda etapa: obtención e interpretación de resultados.

En esta etapa se realizó el análisis de los datos existente de las etapas anteriores. Se realizó el informe final en Microsoft Word 2016 como editor de texto. Para el diseño y confección de la presentación de apoyo para la exposición de los datos se utilizó el software Microsoft PowerPoint 2016.

El método constructivo de la presa de colas es el de aguas arriba (Figura 2). La construcción de los diques cumplirá con los factores de seguridad estática y pseudoestática (sísmica) requeridos para la estabilidad desde la cresta del terraplén principal.

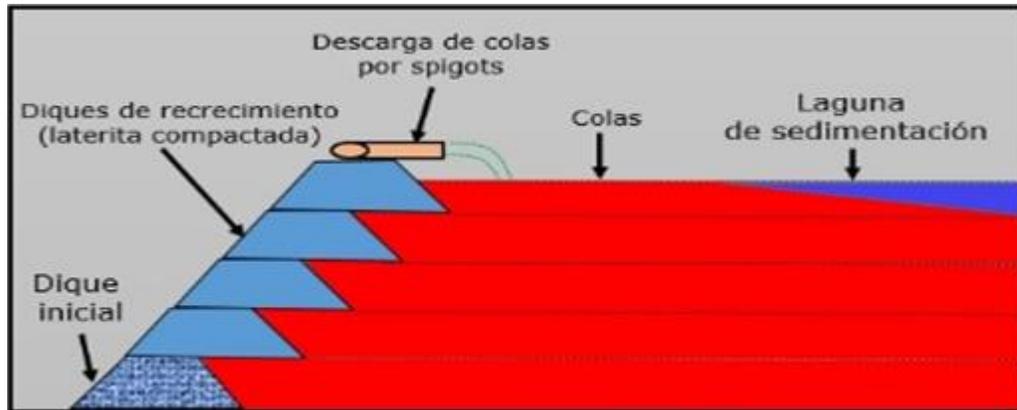


Figura 2. Sección transversal del método constructivo aguas arriba.

La construcción de los aliviaderos garantiza el paso del flujo para eventos extremos a (tormentas de probabilidad de 1 en 1 000 años, intensas lluvias, etc.), el agua es reciclada y enviada a la planta para su aprovechamiento en el proceso de lavado a contracorriente.

Las colas son mezclados con agua, transportados por tuberías en forma de pulpa y depositados de forma regular a través de tubos de descarga situados cada 25 m (Figura 3) a lo largo del perímetro de la presa. La composición media de la pulpa que se vierte contiene de 30-40 % de material sólido y 60-70 % de líquido. El pH de la pulpa es ácido con valores entre 4 y 4,5, con una característica areno arcillosa con predominio de los limos. Los residuos están compuestos mayoritariamente por óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mg. La tasa de producción de residuos es de 10 320 toneladas secas/día, por 134 toneladas de concentrado de níquel + cobalto diarias.

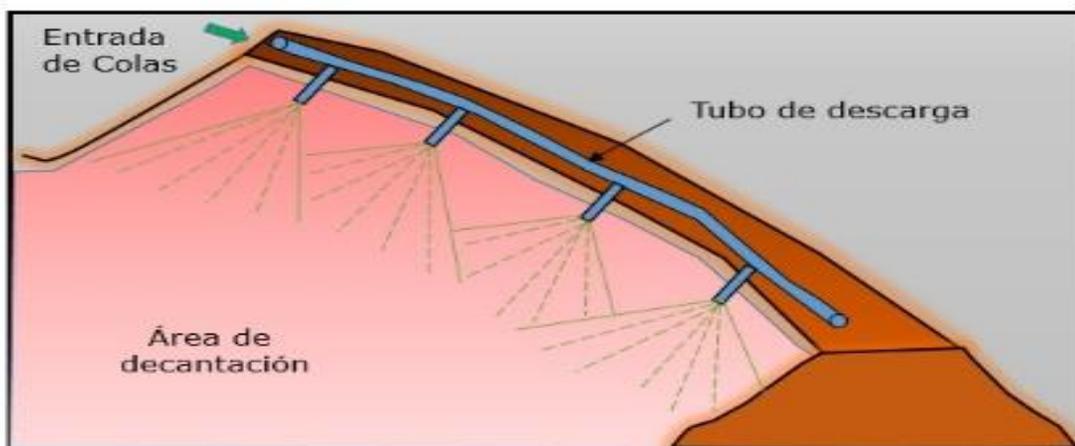


Figura 3. Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga. (ICOLD, 1989, modificado por los autores).

Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la investigación

Los trabajos de monitoreo sobre el control de puntos topográficos, piezómetros, control a través de imágenes satelitales, observación, perforaciones, estudios geofísicos, ensayos geotécnicos, forman parte de la evaluación de los riesgos y está incluido dentro del Plan de Gestión de Riesgos de los proyectos de la presa de colas, contribuyendo a establecer una zonificación de los riesgos, con sus respectivos planes de reducción de desastres.

Condiciones geotécnicas de la base de la presa colas

La construcción de la presa de colas ha presentado limitaciones de estabilidad debido a los estratos de baja resistencia presentes en los suelos de cimentación, los cuales se corresponden con los del valle aluvial del río Moa y arroyo Los Lirios. La realización de varias investigaciones geotécnicas ha permitido caracterizar los materiales que conforman la cimentación. Los estudios desarrollados fueron los siguientes: Perforaciones desde 1996 hasta el 2011. Pruebas de CPT (Cone Penetration Test, por sus siglas en inglés) y SPT en los años 1996, 2002, 2007, 2010 y 2011, instalación de piezómetros en 1996, 1998, 2002 y durante el presente año 2022 se realiza un proceso de reanimación.

Los análisis geotécnicos realizados indican que las colas estudiadas, se clasifican:

- De acuerdo con la carta de plasticidad como suelos combinados que poseen 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.
- Considerando el valor del límite líquido las colas se dividen en dos grupos según Lambe y Whitman (1991):
 - 1) Limos arcillosos con límite líquido menor de 50
 - 2) Limos arcillosos con límite líquido mayor de 50
- La existencia de índices de plasticidad tan bajos en la mayoría de los materiales y la presencia de material no plástico es un aspecto a tener en cuenta, ya que los materiales no plásticos de naturaleza limo-arenosa ante la acción de un sismo pueden comportarse como un líquido, o sea, puede ocurrir el fenómeno de la licuefacción.

- En la caracterización de la resistencia de las colas, se determinan los parámetros de resistencia de los materiales: cohesión (c), peso específico y ángulo de fricción interna (φ), elementos claves para estudiar y analizar la estabilidad geotécnica de los taludes, y de la presa en su conjunto. La cohesión tiene un máximo de 220 kPa, el peso específico de las colas es de 37 kN/m³ y el ángulo de fricción interna varía entre 25 y 42 grados.

Análisis de los resultados del proceso de monitoreo

Datos registrados durante el año 2022:

- Piezómetros (cuerda vibrante)
- Pozos hidrológicos
- Monumentos topográficos.

Actualmente la presa de colas cuenta con cuatro puntos de monitoreo topográficos dos localizados hacia el norte y dos hacia el este (Figura 4).

En el mes de diciembre del año 2021 hasta julio del 2022 se han realizado ocho mediciones de control para evaluar la posible ocurrencia de desplazamiento en los diques de la presa, mediante estaciones topográficas de alta precisión.

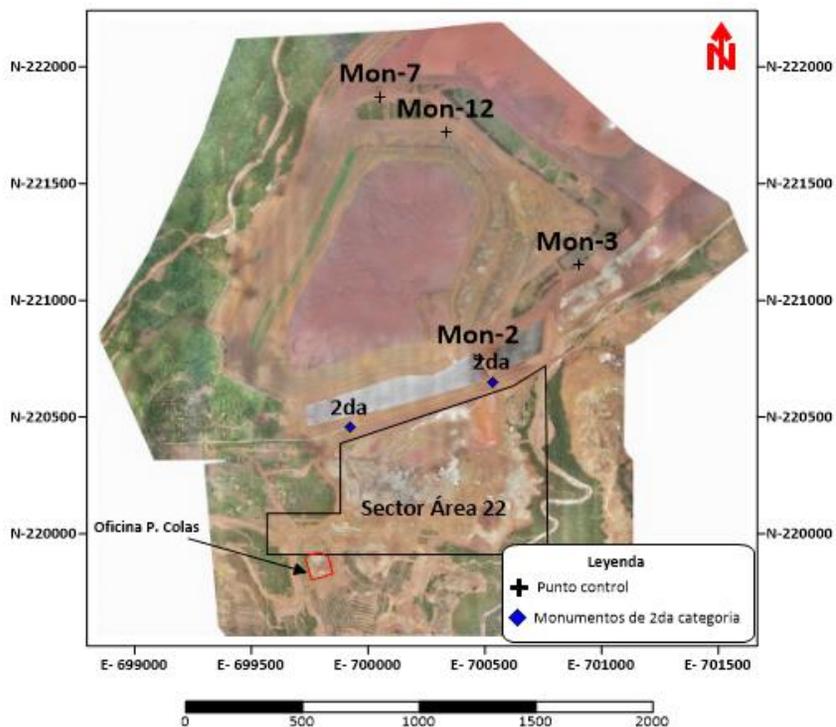


Figura 4. Ubicación de los monumentos de monitoreo en la presa de colas de Moa Nickel S.A.

La ubicación actual de los puntos de control muestra una distribución aceptable hacia el norte y el este, no siendo así hacia el sur y el oeste del dique de la presa, por lo que se sugiere se evalué incrementar los puntos de control para una mayor supervisión de los diques en esta zona de la presa.

En la Figura 5 se muestra las diferencias de desplazamiento determinadas durante los trabajos de control de campo. En la dirección este, los monumentos 7 y 12 presentan los mayores desplazamientos en los meses de abril y julio; monumentos 7 de 6 cm hacia el oeste en el mes de abril, 12 cm hacia el este en el mes de julio. El monumento 12, 4 cm hacia el oeste en el mes de abril y 6 cm hacia el este en el mes de julio.



Figura 5. Resultados del control de los monumentos topográficos dirección Este.

Los monumentos localizados hacia el norte del área de estudio (Mon 7 y Mon 12) se muestran los mayores desplazamientos, presentando el valor más alto el Mon 7 (13 cm hacia el norte en el mes de junio, en julio -10 cm hacia el sur) y el Mon 12 de (10 cm hacia el norte en el mes de junio y de -11 cm en el mes de julio con dirección al sur). (Figura 6).



Figura 6. Resultados del control de los monumentos topográficos dirección norte.

En la Figura 7 se muestran las determinaciones de desplazamiento en la dirección vertical (z) en los monumentos de la presa de colas, donde los mayores valores se identificaron en el Mon 7 de (12 cm y -7 cm en el mes de junio), el Mon 12 (6 cm y de -6 mm en abril).



Figura 7. Resultados del control de los monumentos topográficos, dirección vertical (z).

Medición del caudal y sólidos en las salidas de los drenes: Este método de control no está siendo ejecutado a través de la medición de flujómetros ni la toma de muestras de aguas, solo se inspeccionan de forma visual, lo que conspira contra la seguridad de la obra.

Imágenes satelitales: El análisis de imágenes tomadas de los vuelos de drones es un método de reciente aplicación, el mismo está ganando protagonismo como un método de monitoreo no invasivo. El estudio de las imágenes del vuelo del año 2021 se observaron las variaciones de altitud existentes en el sector norte de la presa de colas, se logra definir con un alto nivel de detalles la variación de las diferentes elevaciones de los diques (Figura 8).

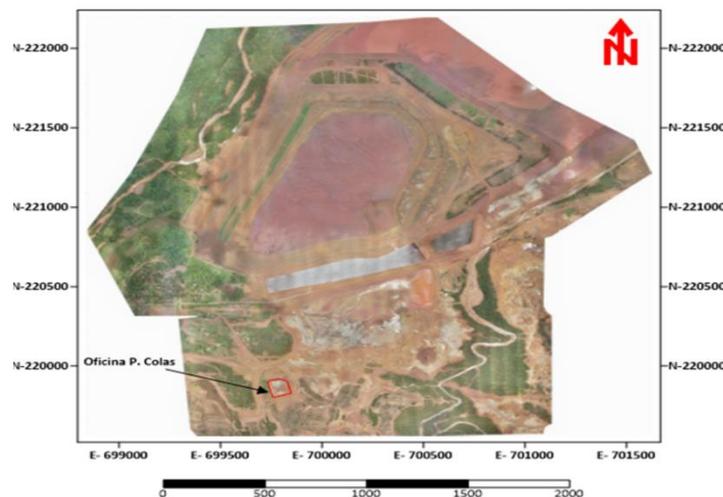


Figura 8. Imágenes tomadas de los vuelos de drones, método monitoreo de reciente aplicación (2021).

Fotografías: El análisis de las secuencias fotográficas de los sectores norte y este demuestran el acelerado desarrollo de procesos erosivos en los diques, los surcos y cárcavas existentes aceleran la activación de mecanismos de fallos como los deslizamientos.

Pluviómetros: No se cuenta con información reciente de estos instrumentos, la falta de información de los pluviómetros provoca la pérdida de una información valiosa para alcanzar resultados fidedignos en los reportes de averías ante lluvias intensas o sequías prolongadas.

Resultados de los ensayos geotécnicos

En el proceso de construcción de la presa se realizan determinaciones de humedad al material, antes de utilizarlo en los diferentes diques, los valores obtenidos deben cumplir con las normas establecidas (valor óptimo de 23 %), de forma que permitan garantizar los procedimientos establecidos.

Las determinaciones de humedad realizadas en el mes de julio del 2022 se encuentran entre 23 y 25 %, con un valor extremo de 26 %. En las capas que no cumplen con la humedad de diseño, se paraliza el proceso constructivo y se procede al escarificado para facilitar la evaporación de la humedad y por tanto acelerar el proceso de secado del material, una vez concluido este proceso se procede a la compactación del material y se procede nuevamente a la compactación de la capa y la determinación de la humedad de la misma.



Figura 9. Resultados del monitoreo de la humedad durante el mes de julio 2022, material de préstamo Los Lirios.

En el período se realizaron veintiséis determinaciones, las lluvias ocurridas en el periodo han influenciado en el incremento de la humedad, reflejado en el valor extremo de 26 %, la desviación de este parámetro incide directamente en la calidad de la construcción favoreciendo el encarecimiento del costo del metro cúbico de material compactado.

Estudios geofísicos: Los resultados de la aplicación del método geofísico Ground Penetration Radar (GPR), durante el año 2022 a través de la ejecución de tres perfiles de evaluación en las zonas donde ocurrieron fallas de los diques, para evaluar las características del basamento rocoso (Figura 9). Los resultados muestran que el basamento rocoso de los sectores estudiados presenta una alta variabilidad, lo que puede incidir en la acumulación de las aguas de infiltración, incrementando el grado de humedad e inestabilidad de la presa. En la Figura 10 se muestra en color rojo las zonas del basamento con mayor agrietamiento, relacionado con la presencia de fallas tectónicas, aspecto que debe ser estudiado con otros métodos de mayor precisión.

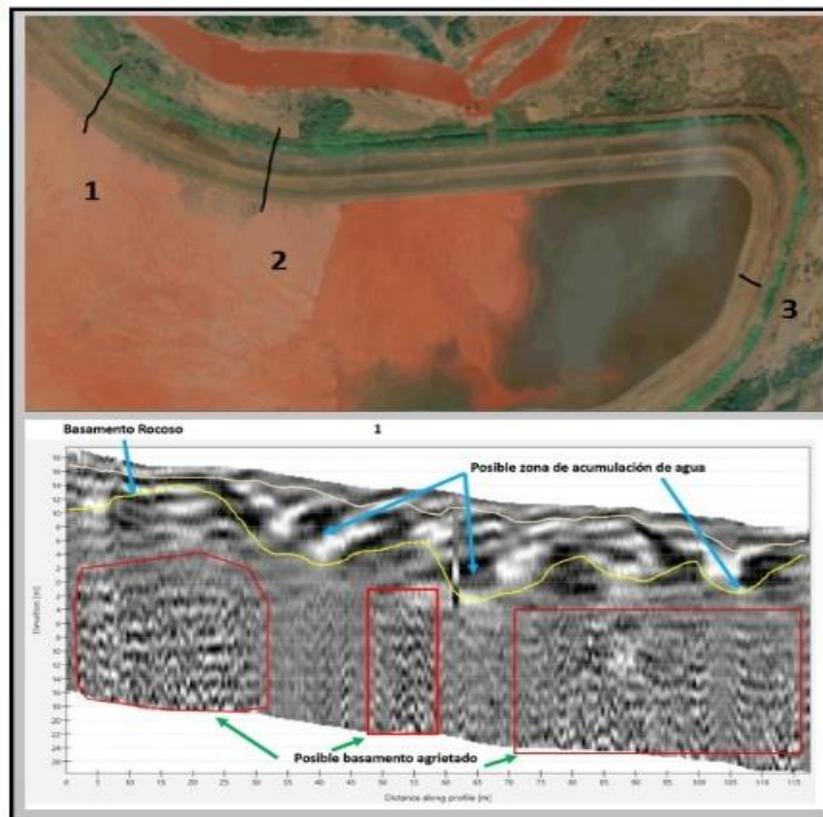


Figura 2. Resultados experimentales de Geofísica de GPR en el dique de la presa de colas.

Observaciones directas en el terreno: Las observaciones diarias realizadas a la entrada del turno de trabajo y las inspecciones que realizan los diferentes mandos de dirección son registradas en los manuales de técnica de la seguridad y el libro de operaciones de la presa de colas. Durante el periodo de investigación se registraron algunos incidentes de seguridad como la rotura de spigots, pequeños derrames de colas por obstrucción de los spigots, presencia de humedad en el talud exterior de diques, existencia de agrietamientos, presencia de hundimientos en la corona del dique y pérdida de la altura de revancha en el sector norte de la presa.

Conclusiones

Se determinó que los valores de humedad promedios son de 23 %, los valores extremos están relacionados con las lluvias ocurridas durante el período.

Los resultados del monitoreo topográfico muestran pequeñas desviaciones en la dirección N y E en la vertical; los mayores valores están relacionadas con el monumento 7 y el monumento 12 localizados hacia el norte de la presa, con valores que alcanzan 13 cm en la dirección norte y 13 cm en la vertical. Existen deformaciones visibles en los diques del sector norte que coinciden con los desplazamientos detectados en los monumentos.

Los perfiles de geofísica de GPR muestran una alta variabilidad del cimientado rocoso de la presa, con presencia de abundantes grietas donde ocurrieron las fallas de los diques, además de identificar las posibles zonas de acumulación de agua.

El no funcionamiento de los piezómetros y otros instrumentos, así como insuficientes puntos de control topográfico para el monitoreo generan altos niveles de incertidumbre con respecto al nivel de estabilidad física que posee la presa de colas en la actualidad.

Recomendaciones

Realizar un estudio para definir nuevos puntos de control topográfico de monitoreo, así como recuperar el funcionamiento de los instrumentos fuera de servicio. Extender el método geofísico indirecto de GPR para la evaluación del basamento y las zonas de posible acumulación de agua.

Referencias bibliográficas

- ARIOS, J. D.; LAVAUT, W.; BERGUES, P. & DIAZ, R. 2003. Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-CO en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. *Minería y Geología* 19(1-2): 18.
- DE LA CRUZ, S. 2017. Evaluación del fallo de presas de relaves con el método del árbol de fallos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- GUARDADO, R. Y RIVERÓN, A. B. 1997. Evaluación ingeniero geológica del territorio de Moa con fines de microzonación sísmica. *Minería y Geología* 14(2): 48.
- HERNÁNDEZ, T. Y GUARDADO, R. 2014. La bioingeniería en la estabilización de presas de colas de la industria minero metalúrgica en Cuba. *Minería y Geología* 30(4): 55-69.
- 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.
- ICOLD. 1995. *Bulletins* 99. Dam Failure: Statistical Analysis. 76p.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. 1991. *Mécanica de suelos*. 10. John Wiley & Sons, Nueva Jersey.
- RODRÍGUEZ, R. & OLDECOP, L. 2009. Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. 12(24): 7-25.