



Ingeniería Geológica
Facultad: Geología-Minería

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero en Geología

**Título: EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS POR FALLOS DE LA
PRESA INACTIVA DE MOA**

Autora: Anniè Basulto Machado

Tutora: Tereza Hernández Columbié

Año 61 de la Revolución

Pensamiento

Después de todo, la ciencia es provisional: siempre está dispuesta a ampliarse o corregirse...

...Esto no es un fallo de la ciencia, sino más bien uno de sus méritos: se puede discutir libremente sobre puntos polémicos y hay múltiples caminos hacia la meta...

Isaac Asimov.

Dedicatoria

Dedico mi trabajo a mi familia por apoyarme todos estos años y sacrificarse por mí dándole todo para convertirme en una profesional, a mis abuelos que son como mis padres, a mis padres, hermanos, primos, tíos y en general a todos aquellos que creyeron en mí y estuvieron a mi lado sin importar los obstáculos de la vida.

Agradecimientos

En primer lugar le doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta aquí, le agradezco a mi familia por su comprensión y apoyo por comportarse de una manera incondicional en especial a mis abuelos y a mis padres y hermanos Anniellis y David, a mis amigos, a mis compañeros de aula y vecinos por su apoyo durante todo este proceso.

A mis profesores, especialmente a mi tutora Teresa Hernández Columbié por su apoyo, comprensión y su ayuda durante todo este tiempo, al profesor José Nicolás Muñoz quien ha sido un ejemplo de integridad y de sabiduría para mí, y en general a todo el colectivo de profesores que me han apoyado y me han mostrado su afecto.

Resumen

La presa de colas inactiva de Moa ha permanecido por un largo período sin la adecuada protección, presenta un deterioro avanzado, sin embargo estas son obras que requieren un control sistemático para prevenir los riesgos por fallos que en ella pueden ocurrir. La existencia de un alto grado de saturación de las colas almacenadas en la presa, es uno de los principales problemas que acrecientan el nivel de riesgo de la obra ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos. El incremento de la probabilidad de la ocurrencia de los riesgos por fallos que pueden ocasionar pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio ambiente y en algunos casos pérdidas de vidas humanas, requiere de una evaluación detallada de los riesgos a producirse. El objetivo de esta investigación es zonificar los riesgos por fallos ante peligros naturales y tecnológicos de la presa de colas inactiva de Moa. Se aplican métodos cualitativos y cuantitativos para la evaluación de los riesgos. Los resultados alcanzados se basan en evaluar los riesgos por fallos de la presa de colas. Se propone un plan de medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos negativos evita la ocurrencia de desastres ante la liberación de colas al medio por destrucción de la estructura.

Summary

Moa's prey of inactive tails has remained for a long period without the adequate protection, presenting an advanced deterioration, however these are works that require a systematic control to prevent the risks for failures than they can happen in her. Existing a height I harrow of saturation of the tails stored in the prey, being one of the principal problems that increase the level of risk of the work in front of phenomena hidrometeorológicos and seismic. Incremented the probability of the funny remark of the risks for failures that cost-reducing losses, degradation and contamination of the midway and in some cases lost of human lives can cause. The application of qualitative and quantitative methods allowed determining the zones that economy and the ambient midway, the results of the evaluation of the risks of the work find in bigger risk in front of the collapse of the prey, that can cause damages on the population, they constitute tools of work for the overtaking in the local government, the CITMA and another institutions of the municipality. The plan of reduction of disasters guarantees the prevention, mitigation and correction of the possible impacts to generate.

ÍNDICE

Pensamiento.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Summary.....	v
INTRODUCCIÓN	1
Estado del arte	4
Esquema general del Análisis de Riesgos: bases conceptuales.....	6
Actividad antrópica	8
Influencia del agua en el comportamiento de las colas.....	9
Estudios del impacto ambiental de las presas de colas.....	10
Mecanismos de riesgos de fallos de la presa de residuos mineros	14
Deslizamientos	15
Sismicidad.....	16
Licuefacción. Tipos de licuefacción	17
Mecanismos de disparo de la licuefacción estática: tubificación, y erosión	17
Fallo de estructuras auxiliares.....	23
CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	30
1.1 Introducción	30
1.2 Localización geográfica del área de estudio.....	30
1.3 Clima.....	31
1.4 Hidrografía del medio y su impacto antrópico.....	31
1.4.1 Régimen de las lluvias	31
1.4.2 Escurrimiento superficial.....	32
1.5 Geomorfología del territorio.....	33
1.6 Geología de la región.....	34
1.7 Geología del área de estudio.....	36
1.8 Tectónica del área de estudio	37
1.9 Sismicidad del área de estudio.....	38
1.10 Riesgo sísmico	40

1.11 Suelos	40
1.12 Recursos minerales	41
1.13 Infraestructura económica	41
1.14 Construcción y operación de la presa de colas inactiva de Moa	41
Conclusiones parciales	43
1. Las condiciones físico-geográficas y geológicas del área de estudio favorecen el incremento del nivel de riesgo de la misma ante los fenómenos naturales como sismos o lluvias producto deteriro existente en esta estructura.	43
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LOS RIESGOS POR FALLOS DE EN LAS PRESAS DE COLAS	44
2.1 Introducción	44
2.2 Etapas de la investigación	44
2.2.1 Etapa preliminar	44
2.2.2 Etapa de trabajo de campo	45
2.2.3 Etapa de gabinete.....	45
2.2.4 Análisis de los indicadores de riesgos por fallos	45
2.2.5 Evaluación de los riesgos por fallos en las presas de colas. Los pasos para la evaluación del riesgo, se explican a continuación:	46
2.3 Análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros en las presas de colas	48
2.4 Elementos en riesgos ante fallos de la presa de colas	49
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE RIESGOS POR FALLOS DE LA PRESA DE COLAS INACTIVA DE MOA	51
3.1 Introducción	51
3.2 Elementos en riesgo ante fallo por sobrepaso de la presa de colas	51
3.3. Análisis de los indicadores de riesgos por fallo según el trabajo de campo	54
3.4 Análisis de la vulnerabilidad sísmica de la presa.....	59
3.5 Análisis de la vulnerabilidad hídrica de la presa.....	60
3.6 Zonificación de la presa de colas inactiva de Moa para la evaluación de los riesgos ante el fallo generado por peligros naturales o antrópicos.	61
3.7 Caracterización de los daños parciales.....	62
3.8 Caracterización de los daños directos. Resultados de la evaluación o análisis cuantitativo de los riesgos por fallos.....	65
3.8.1 Cálculo de los riesgos totales por grupo de peligros.....	68
3.8.2 Medidas de prevención, mitigación o corrección de impactos.....	69

Conclusiones parciales	71
CONCLUSIONES	72
1. La caracterización de las condiciones geológicas del área de estudio de la presa de colas inactiva de Moa demostró que la obra posee una alta vulnerabilidad física, debido a: los suelos de cimentación de la presa están constituidos por estratos inestables, areno arcillosos de humedad y plasticidad de media a alta y pertenecientes a los depósitos del Cuaternario, existencia de un alto nivel de agrietamientos, deslizamientos, erosión y destrucción parcial del dique perimetral.	72
2. La determinación de los indicadores de fallos en las presas de colas son: sobrepaso, deslizamientos y erosión; y los elementos que se encuentran en riesgo, como las instalaciones económicas la población, el medio ambiente y los residuos almacenados en la presa.....	72
3. La zonificación de la presa de colas inactiva de Moa de los riesgos ante fallos por naturales o antrópicos demostró que: las zonas A y B de la presa presentan un riesgo muy alto, asociados con los altos niveles de inestabilidad existentes y los daños a instalaciones como a las Empresas Eléctrica y de la Construcción que alcanzan el 35 y 33 % respectivamente, el resto de las entidades son impactadas en menor grado debido a ser menos vulnerables. Se proponen medidas que garantizan la prevención, mitigación o corrección de impactos generados ante fallos de la presa de colas	72
RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	1

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de las presas de colas están 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 de forma sistemática su altura, sobre un suelo de cimentación generado por las propias colas a medida que se van depositando.

Las presas de colas son obras que requieren un control sistemático para disminuir los riesgos por fallos que en ella puede haber. Los principales mecanismos de riesgos por fallos registrados están asociados con: ocurrencia de terremotos, sobrepaso, problemas de cimentación, tubificación, fallo en las estructuras auxiliares, erosión del dique, subsidencias o colapso del terreno y deslizamiento del talud; este último es el mecanismo de fallo más frecuente.

La presa de colas inactiva de Moa ha permanecido por un largo período sin la adecuada protección, esta presenta un deterioro avanzado de la obra; dando lugar a un escenario de riesgos para la seguridad y salud de las personas, así como para el medio ambiente y las actividades económicas situadas en su entorno, en Iberoamérica estos tipos de presas son conocidas como pasivos ambientales. Por lo que es evidente el insuficiente conocimiento de los riesgos por fallos que representa la presa ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos y sismos.

El riesgo por fallos de las presas se incrementa en el tiempo en dependencia del volumen de material depositado, la calidad de los parámetros geotécnicos y la complejidad geológica imperante en el área.

El vertido de residuos al medio ambiente por rotura de una presa de colas del proceso minero metalúrgico tiene frecuentemente consecuencias ambientales catastróficas, aunque la misma no se encuentre en funcionamiento. Estos fallos se deben fundamentalmente por la acción del agua, la sismicidad, su peso y aquellos elementos estructurales que en determinado momento las convierten en inestables.

En el municipio de Moa, las zonas montañosas son susceptibles a la ocurrencia de los peligros y riesgos asociados a deslizamientos o movimientos de masas en sus taludes y laderas, esto se debe a las condiciones geológico existentes.

Los estudios de estabilidad de las presas de colas se adecuan al tipo de obra en construcción, los principales aspectos que se consideran son: la composición química de los residuos, su estado físico, el espacio disponible para su disposición y las características físico -mecánicas de las colas.

La existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros metalúrgicos almacenados en las presas es uno de los principales problemas que favorecen el proceso de fallo de las presas. Las consecuencias de estos fallos se revierten en grandes pérdidas económicas, degradación, contaminación del medio y en muchos casos pérdidas de vidas humanas.

La seguridad de las presas de colas no debe centrarse exclusivamente sobre la estructura u obra de ingeniería con un enfoque determinante, sino también debe considerarse como un peligro tecnológico.

Problema científico

Insuficiente conocimiento de los daños que puede provocar el fallo de la presa de colas inactiva de Moa ante la ocurrencia de peligros naturales o antrópicos, existiendo un incremento de la probabilidad de daños sobre la población, la economía y el medio ambiente.

Objeto de estudio

Presa de colas inactiva de Moa.

Campo de acción

Riesgos por fallos de la presa de colas inactiva de Moa.

Objetivo general

Zonificar los riesgos por fallos ante peligros naturales y tecnológicos de la presa de colas inactiva de Moa.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las condiciones físico-geográficas y geológicas del área de estudio.
2. Determinar los elementos en riesgo e indicadores de fallos de la presa de colas.
3. Zonificar la presa de colas inactiva de Moa para la evaluación de los riesgos ante fallos.
4. Implementar de medidas que garanticen la prevención, mitigación o corrección de impactos generados ante fallos de la presa.

Hipótesis

Si se zonifica los riesgos por fallos ante peligros naturales y tecnológicos de la presa de colas inactiva de Moa se podrá determinar los factores que intervienen en el proceso de fallo de la presa de colas, esto permitirá la evaluación de los riesgos en cada zona y definir los niveles de riesgos existentes.

Estado del arte

Como consecuencia de actividad minera y de los procesos industriales asociados al beneficio y transformación, existe un enorme legado de minas e instalaciones en estado de abandono, sin que muchas de ellas se hayan sometido a un proceso adecuado de cierre o rehabilitación, lo que da lugar a escenarios de riesgo para la seguridad y salud de las personas, así como para el medio ambiente y las actividades económicas situadas en el entorno. En Iberoamérica son conocidos como “pasivos ambientales mineros” (PAM). Los PAM son aquellos elementos, tales como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o paralizadas, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente. La existencia de pasivos ambientales mineros afecta a numerosos lugares de Iberoamérica y de la Península Ibérica: entorno de Río Tinto, Sierra Minera de Cartagena, Cordillera del Cóndor, Cerro Rico de Potosí, Río Pilcomayo, área de Zaruma

Portobelo, cuenca alta del Río Santa, etc. Toneladas de metales pesados son arrojadas a los ríos y lagos desde las viejas instalaciones de residuos. El polvo fugitivo amenaza la salud de poblaciones enteras. La posibilidad de rotura de grandes presas de lodos o relaves representa un peligro real para demasiadas personas y recursos. Además, la diferencia fundamental entre la minería activa y la minería abandonada es que la asignación de responsabilidades no está clara muchas veces. De hecho, uno de los principales escollos para resolver la problemática que supone la minería abandonada es la asignación de responsabilidades, o la definición de fórmulas para el reparto de las mismas entre

propietarios de los terrenos, organismos de la administración, grupos empresariales, antiguos beneficiarios, etc. (Arranz González y Alberruche del Campo, 2008).

La problemática de la minería abandonada, en países con una importante minería histórica, ha obligado al desarrollo de políticas y actuaciones públicas encaminadas a conocer y controlar el riesgo que representan. En Europa han existido diversas iniciativas relacionadas con la elaboración de inventarios de sitios mineros abandonados, aplicando metodologías de análisis de riesgos con el objeto de establecer una jerarquización de estos pasivos basada en la amenaza que representan para la población y el medio ambiente. Sin embargo, la más destacable de todas las iniciativas, planteada para obligar a todos los estados miembros de la Unión Europea, es la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. En ella se establece que los Estados miembros deben confeccionar y actualizar periódicamente un inventario de las instalaciones de residuos cerradas, incluidas las instalaciones de residuos abandonadas situadas en su territorio, que tuvieran un impacto medioambiental grave o que pudieran convertirse, a medio o corto plazo, en una amenaza grave para la salud de las personas o para el medio ambiente. Las metodologías para la realización de inventarios y para la evaluación preliminar de riesgos de las instalaciones de residuos cerradas o abandonadas (Alberruche del Campo et al., 2014). En paralelo a estas actividades, y empleando las citadas metodologías, el IGME ha venido desarrollando trabajos de inventario y evaluación de riesgos de instalaciones de residuos mineros cerradas para la Dirección General de Política Energética y Minas (MICYT). La metodología de evaluación de riesgos elaborada puede considerarse un sistema de evaluación del riesgo simplificada (ERS) o de análisis preliminar del riesgo de instalaciones de residuos mineros. Perú cuenta con una normativa específica que regula la gestión de pasivos mineros, a través de la Ley No. 28271, de fecha 02 de julio de 2004, modificada por la Ley No. 28526 de fecha 25 de mayo de 2005, y la Ley No. 242 de fecha 26 de junio de 2008; y el Reglamento No. 059 EM de fecha 14 de enero de 2009. La normativa define a los PAMs como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras abandonados o inactivos, y que constituyen un riesgo permanente o potencial para la salud de la población, el ecosistema

circundante y la propiedad. Mediante la promulgación de estas normas, se da cuenta de la necesidad de inventariar, priorizar e intervenir para la remediación de áreas afectadas por pasivos ambientales mineros, de forma gradual, en función de los niveles de riesgos que representen, priorizándose la atención de las que generen mayor riesgo sobre la salud y seguridad de las personas y la calidad del ambiente. En esencia, por tanto, la normativa peruana persigue objetivos semejantes a la normativa europea.

Esquema general del Análisis de Riesgos: bases conceptuales.

Riesgos

Es definido como la proximidad o posibilidad de un daño. En caso en que dicho daño suceda el desenlace puede ser fatal.

Riesgos económicos. Se relacionan con la vulnerabilidad que se produce cuando se realizan inversiones y la situación económica puede llegar a afectar dichas inversiones por cambios. Estos pueden ser diversos, sea por políticas públicas, empresariales, aparición de otros competidores, cambios en la compra de los consumidores, entre otros. Normalmente para disminuir a este tipo de riesgos se utiliza la inversión a corto plazo. Cuanto antes se obtiene el beneficio, hay menos posibilidades que los riesgos afecten las ganancias.

El riesgo es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias. Cuando se realiza un Análisis de riesgo cuantitativo en seguridad de presas, este tema se suele reducir aun único número: el producto de la probabilidad de fallo por sus consecuencias. Probabilidad de fallo en el contexto del análisis de riesgos de presas, el concepto de fallo no se limita exclusivamente a la rotura catastrófica de la presa sino que abarca cualquier suceso que acarree consecuencias negativas. En este sentido, los términos de fallo y rotura se emplean de manera intercambiable en este documento, dándoles el significado más amplio. Conceptualmente, la probabilidad de fallo de la presa se puede definir mediante la siguiente ecuación

$$p(r) = \int p(c) \cdot p(r|c), \quad (1.1)$$

Donde $p(r)$ es la probabilidad de fallo, $p(c)$ es la probabilidad de que se presenten unas determinadas cargas o sollicitación y $p(r|c)$ es la probabilidad condicional de rotura dada dicha sollicitación. Una característica de la metodología de Análisis de Riesgo es que no se limita en su planteamiento a una única forma de fallar sino que se estudian todas las posibles maneras en que la presa pueda fallar. Cada una de ellas se conoce como modo de fallo. Así, la probabilidad total de fallo es la suma de las probabilidades de cada modo de fallo.

Consecuencias: existen varios efectos adversos o consecuencias que se pueden dar al producirse el fallo de una presa: daños económicos directos: son los ocasionados directamente por el impacto de la inundación y son los más visibles. Incluyen el coste de los daños a la propia presa. Daños económicos indirectos: son los que se dan tras el impacto del evento y reflejan la interrupción de la economía y otras actividades en la zona. Daños a personas: en principio, además de contemplar la pérdida de vidas humanas, los daños a las personas también pueden incluir otros aspectos como el número de heridos de mayor o menor gravedad, pero por su difícil cuantificación los análisis cuantitativos suelen centrarse sólo en el primer aspecto. Otros daños: como pueden ser los daños medio ambientales, el trastorno social, la pérdida de reputación, la afección al patrimonio histórico o cultural todos ellos difícilmente cuantificables y por lo tanto tratados habitualmente de forma cualitativa.

El análisis de riesgo es una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que permite integrar toda la información referente a la seguridad de la presa que se analizan por separado en otros documentos. Por ejemplo, un cálculo hidrológico y de laminación puede mostrar que la presa no es capaz de laminar las avenidas que la normativa recomiende. Un cálculo de estabilidad que arroje un coeficiente de seguridad menor que el recomendado muestra que la presa puede tener un problema de seguridad en ese sentido. Durante las actividades de mantenimiento se puede detectar si las operaciones de drenajes funcionan adecuadamente. El seguimiento de la monitorización de la presa puede detectar un aumento de las filtraciones, un desplazamiento de un bloque o un aumento de las presiones intersticiales y permitir actuar sobre él antes de que derive en un problema mayor. Al realizar o revisar un plan de emergencia se pueden diseñar medidas que aumenten la seguridad de la población en caso de rotura de presa. Actualmente, todos estos aspectos están cubiertos, sin embargo no se cuenta con una herramienta que permita integrarlos y medir la importancia que cada

uno tiene sobre la seguridad de la presa. Es precisamente esta capacidad integradora una de las mayores ventajas del análisis de riesgo. Al realizar un análisis de riesgo, se confecciona un modelo global de la presa que incluye desde las solicitaciones (hidrológicas, sísmicas o cualquier otra) hasta las consecuencias, pasando por la respuesta del sistema. Este modelo de riesgo de la presa se nutre de la información que proporcionan los distintos documentos de seguridad de la presa. También es posible evaluar el impacto y la eficiencia de posibles medidas de reducción de riesgo e incluso Es posible comparar de forma homogénea la eficiencia de medidas de reducción de riesgo en diferentes presas. Por último, se pueden realizar modelos conjuntos de sistemas de múltiples presas que permitan optimizar su gestión conjunta. El modelo de riesgo es la herramienta que permite integrar toda información concerniente a la seguridad de la presa y producir resultados útiles para la toma de decisiones. Revisiones de seguridad explotación normal mantenimiento y vigilancia, planes de emergencia, normas de explotación.

Actividad antrópica

Uno de los mecanismos de fallos lo constituye la acción del hombre. Desde el uso de suelos, las construcciones de la red vial y el incumplimiento de las normas de construcción han incrementado los fallos de las obras por deslizamiento.

La presa de Tapo Canyon (ver Figura 1) de 24 m de altura, ubicada en California, construida por el método aguas arriba; se utilizaba para el almacenamiento de residuos finos provenientes del lavado de áridos, colapsó durante la ocurrencia del terremoto de Northridge California, 1994.



Figura 1. Vista aérea de la presa de Tapo Canyon previa a su rotura (izquierda) y rotura de la presa causada por el Terremoto de Northridge en 1994 (derecha) (Foto de Northridge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley).

La presa se había iniciado en la depresión de una antigua cantera. La presa llevaba dos años inactiva al momento del fallo. Sin embargo, en la mitad este se continuó con el lavado de los residuos de camiones mezcladores de hormigón, hacia la mitad oeste del depósito se localizaba una laguna en contacto directo con la presa.

Esta acción provocó la saturación de los diques de contención y unido al factor disparador, la ocurrencia del terremoto indujo la licuación del material de la presa, que se encontraba saturado debido a la proximidad de la laguna y las actividades de lavado. Los residuos licuados se desplazaron por una brecha de unos 60 m de ancho.

El fallo implicó el flujo de una gran cantidad de residuos a lo largo de 180 m aguas abajo (Harder y Steward, 1996).

Afortunadamente, por estar ubicada en una zona despoblada, no provocó víctimas ni otras pérdidas económicas importantes.

Influencia del agua en el comportamiento de las colas.

La mayor parte de los depósitos de colas existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico. Esto es, las colas mezcladas con agua (generalmente el agua proviene los procesos de molienda y flotación), con la consistencia de un lodo, son bombeadas a través de tuberías hasta el punto de descarga en el depósito.

La proporción de sólidos: agua del material que se vierte en una presa de colas tradicional suele ser cercana a 1.1 en peso. Puesto que el peso específico de las partículas sólidas que forman las colas es relativamente elevado (particularmente en los residuos de la minería metálica donde puede encontrarse entre 2 y 5 g/cm³), el agua puede representar entre el 65 y el 80% del caudal de lodo vertido.

Factores que intervienen en el proyecto de una presa

Existen múltiples factores que intervienen en el proyecto de una presa que se deben tener en cuenta antes de construir una presa, sin embargo los que a continuación se indican son sin dudas los mas importantes en lo que se refiere a la selección del tipo de presa, así se pueden evaluar y prevenir lo posibles riesgos por los fallos de la presa que en un futuro representa un potencial escenario peligro.

La topografía de la región, la cual define la localización más adecuada del sitio y las dimensiones aproximadas de la cortina, la ubicación probable del vertedor y la necesidad o no de construir diques auxiliares.

Las colas se caracterizan por ser sedimentos friables, sueltos de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez (ante el agua). Las colas provienen de los residuos de los procesos mineros metalúrgicos.

La alta capacidad de fluidez puede tener lugar de diferentes formas, desde muy lenta, lenta, a rápida hasta llegar a un movimiento catastrófico. La movilidad de las colas indica que existe una inestabilidad en el medio, así como una pérdida de resistencia y la deformabilidad de este suelo, (Barrera, S. 1998).

Estudios del impacto ambiental de las presas de colas.

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es una técnica generalizada a nivel mundial, empleada de forma especial por los organismos internacionales y que, reiteradamente, a través de los programas de acción, se ha reconocido como un instrumento adecuado para la preservación de los recursos naturales y la defensa del medio ambiente. La EIA es uno de los instrumentos de la gestión y la política ambiental cuya implementación ha permitido introducir, en programas y proyectos de obras o actividades, significativas medidas para la protección del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, y se consolida como una importante herramienta para la toma de decisiones.

Para la problemática de las presas de colas en los países con alto desarrollo económico se presentan soluciones innovadoras que permiten la protección del medio ambiente desde las operaciones de construcción hasta el cierre y poscierre de las presas, sin embargo, la realidad es muy diferente en las naciones con economías deprimidas, donde estas presas

son fuentes de contaminación de los ecosistemas (Rodríguez 2011). La ocurrencia de catástrofes ante el colapso de presas de colas, debido a causas naturales o antrópicas, son evidencias de EIA incorrectamente realizadas por las compañías diseñadoras de estas obras Zandarín&Rodríguez 2008). En España, muchas de estas presas se han destruido por motivos diferentes. El más reciente y devastador accidente de este tipo fue el colapso de la presa Aznalcóllar, la rotura de sus diques provocó la contaminación de grandes extensiones de terreno de áreas naturales, lo que demostró la inexistencia o deficiente EIA del proyecto constructivo (Alonso & Gens 2008). En la actualidad se reconoce la necesidad de realizar EIA de proyectos con altos riesgos ambientales a través de metodologías más integradoras que abarquen el mayor espectro de probabilidades de fallo debido a las situaciones extremas que está provocando el cambio climático a nivel mundial (Sánchez-Espinosa 2010). En Cuba existen regulaciones ambientales para toda actividad que genere deterioro del medio ambiente. En esa dirección, se estableció la EIA como uno de los niveles fundamentales de la gestión ambiental y se promulgó la Ley 81 del Medio Ambiente, que establece la obligatoriedad de Minería y Geología, para prevenir, minimizar o mitigar los efectos negativos del medio ambiente sobre cualquier actividad (CICA 2001). Los procesos inversionistas en la industria del níquel aseguran el incremento de las producciones de Ni+Co, lo que está intrínsecamente ligado a la generación de mayores volúmenes de residuales sólidos y líquidos, que deben almacenarse de forma segura en las presas de colas. Estos residuos poseen propiedades altamente contaminantes para el medio ambiente, lo cual exige el estricto cumplimiento de las regulaciones ambientales y la realización del estudio de impacto de estas obras. Las regulaciones cubanas de la actividad minera se recogen en la Ley 81 de Medio Ambiente y en la Ley 76 de Minas, así como en varios decretos leyes que regulan la explotación racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

Las presas de colas deben ser estructuras seguras, estables en el tiempo y no producir afectaciones al ambiente. Para minimizar y controlar los riesgos asociados a su construcción se debe prestar especial atención a las etapas de diseño, construcción y operación, además de una planificación para las etapas de cierre y poscierre (Rodríguez-Pacheco 2011). La construcción de presas de colas de la industria del níquel datan de la década de los 40, y

en su mayoría se encuentran situadas en la cercanía de ríos, arroyos y del mar, lo que hace más complejo su manejo. El incumplimiento de las regulaciones ambientales en el pasado provocó que estas obras se transformaran en grandes focos de contaminación. En la actualidad ocupan más de mil hectáreas, y captan miles de metros cúbicos de colas diariamente, a lo que hay que añadir que sus playas y diques de contención no poseen coberturas de protección para su estabilización física y química.

Los impactos sobre los componentes ambientales:

A) Aire

1. Emisión de polvo
2. Incremento de la contaminación del aire
3. Contaminación por gases
4. Disminución de la cantidad de polvo y gases en la atmósfera

B) Agua

5. Contaminación de las aguas superficiales
6. Afectación de la calidad de los acuíferos subterráneos
7. Modificación de la red hidrográfica
8. Rebosamiento
9. Disminución del nivel de sedimentos en el agua
10. Creación de una nueva red de drenaje

C) Suelo

11. Inestabilidad de los terrenos
12. Aumento de las probabilidades de la licuefacción

- 13. Incremento de la erosión
- 14. Incremento de la compactación
- 15. Destrucción de la geomorfología del área
- 17. Modificación del paisaje natural
- 18. Afectación de la calidad de los suelos

D) Biótico

- 19. Modificación del hábitat
- 20. Destrucción de la flora terrestre y acuática
- 21. Afectación de la fauna terrestre
- 22. Destrucción de la fauna acuática
- 23. Migración de la fauna
- 24. Retorno parcial de la fauna y la flora

E) Socioeconómico

- 25. Cambios en la economía regional
- 26. Deterioro en calidad de vida de los pobladores
- 27. Pérdida de atributos del paisaje.

De forma general, los impactos que afectan los componentes ambientales se manifiestan de forma extensa, con un significado alto. Las acciones más negativas del proyecto están enmarcadas en el proceso de construcción de los diques y de la operación de la presa de colas, las cuales inciden significativamente sobre todos los Componentes ambientales del medio. La magnitud de los mismos exige de un plan de prevención, mitigación y corrección de impactos diseñado detalladamente para cada caso en particular. Las medidas de

prevención, mitigación y corrección de impactos son de gran importancia dentro del proceso de evaluación de impactos del medio ambiente.

Mecanismos de riesgos de fallos de la presa de residuos mineros.

El colapso de una presa de colas y el vertido de estas al medio, puede tener consecuencias catastróficas e irreversibles; por lo que importante el estudio de los mecanismos de riegos para conocer la forma en que se han producido históricamente su rotura. Estos antecedentes constituyen una referencia necesaria para aprovechar toda esta experiencia para la identificación y prevención de los riesgos en las presas de colas.

Los resultados obtenidos del análisis de 251 casos de fallos accidentes en presas de residuos mineros muestran que estas se producen tanto en las que están en operación como en las inactivas o abandonadas. Las principales causas de riesgos por fallos de la presa son:

- Deslizamiento del talud.
- Terremotos o actividad sísmica
- Sobrepaso.
- Problemas de fundación.
- Tubificación.
- Falla por problemas en las estructuras auxiliares.
- Erosión del dique.

El problema principal que favorece el proceso de fallo es la existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros tecnológicos almacenados en las presas. Las consecuencias de estos fallos se reflejan en grandes pérdidas económicas, degradación y contaminación del medioambiente y en algunos casos, pérdidas de vidas humanas. Un ejemplo de ello lo constituyen los desastres ocurridos en el Brasil en los años 2015 y 2019

al fallar dos grandes presas de colas que ocasionaron la muerte de más de 200 personas y la destrucción de miles de hectáreas de tierras fértiles y la contaminación de los recursos hídricos de la región. Ver Figura 2.



Figura 2. Daños ocasionados por rotura de las presas de colas “Las Marianas” y “Brumadinho” en Brasil. Tomado de Google 2015 y 2019.

Deslizamientos

El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza.

En particular, para las presas de colas, se han identificado tres situaciones que comúnmente desencadenan un deslizamiento de talud:

- Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud.
- Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recremento y
- Licuefacción de las zonas saturadas de la presa de colas debido a una acción sísmica.

El desarrollo de presiones de poro está relacionado con el ritmo de recremento excesivo, que no permite la disipación de presiones de poro o por el tránsito de maquinaria pesada, (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008).

Los estudios anteriores han identificado que el deslizamiento del talud de la presa o de toda la presa sobre su cimentación, como la causa más frecuente de fallo, (ver Figura 2).

En la Figura 2 se muestra la zona de mayor inestabilidad del talud de una presa de cola por aproximación del nivel freático, debido a la elevación del nivel de agua en la laguna de decantación y su desplazamiento hacia la zona de playa.

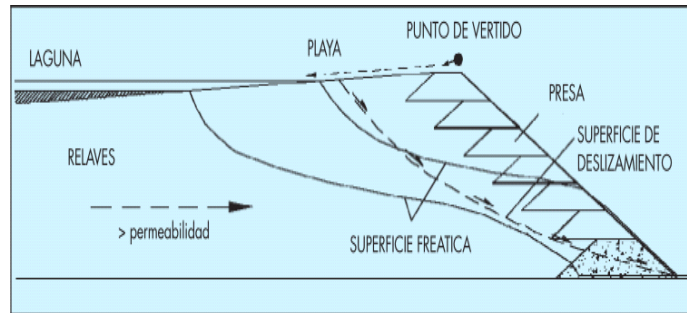


Figura2. Deslizamientos provocados por ascenso del nivel freático, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.

Sismicidad

El análisis de la sismicidad como mecanismo de fallo, activado a través de la ocurrencia de terremotos, se ejemplifica mediante el estudio de casos históricos.

En la presa El Cobre con altura de 35 m, ubicada en Chile, se encontraba inactiva por un período de dos años en el momento de su fallo; sólo se usaba esporádicamente como depósito temporal de agua favoreciendo que el nivel de saturación en el depósito se mantuviera elevado, aún cuando el clima de la región se mantenía relativamente seco. El método constructivo empleado fue el de aguas arriba.

El terremoto de La Ligua ocurrido el 28 de marzo de 1965, de magnitud 7.5 grados en la escala de Richter, con epicentro localizado a 70 Km, a una profundidad focal 60 Km, provocó el fallo de la presa El Cobre por licuación de los relaves.

El desplazamiento por el valle (12 Km) de alrededor de un millón de metros cúbicos de lodo, provocó la destrucción de un asentamiento poblacional ubicado aguas abajo de la presa y la muerte de 300 personas. La velocidad de la avalancha se estimó en unos 20 Km/h, a pesar de que la pendiente del terreno natural era bastante baja, sólo unos 3°.

La pendiente final de equilibrio de la superficie de los relaves vertidos fue de sólo 3.5°, lo que indica una bajísima resistencia residual del material, (Oldecop, L., et. al. 2008).

El manejo incorrecto del agua dentro de la presa, en este caso de estudio, jugó un papel fundamental en la ocurrencia del fallo, combinado con la actividad sísmica.

Licuefacción. Tipos de licuefacción

La licuefacción de suelo describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado.

Este fenómeno es frecuente que ocurra en suelos granulados sueltos saturados o moderadamente saturados con un drenaje pobre.

Mecanismos de disparo de la licuefacción estática: tubificación, y erosión.

Tubificación

Los procesos de tubificación provocan mecanismos de fallos que se inician por afloramiento de agua freática en un talud, lavado de partículas hacia materiales más gruesos o el exterior. La pérdida de material genera un proceso de erosión retrógrada, que va ampliando la vía de agua, y, por lo tanto, el caudal y la capacidad de provocar más erosión. El proceso provoca la desestabilización del talud de la presa, incitando la aparición de chimeneas o deslizamientos, generando una brecha.

El aumento de las tensiones de corte sobre las colas provoca su licuefacción estática y el flujo a través de la brecha.

Erosión

Las propiedades de los materiales que componen los diques, las características pluviométricas de la región y la no existencia de una protección de los taludes, favorece la acción de la erosión superficial de los taludes provocando la presencia de surcos y cárcavas que arriesgan la estabilidad de la obra.

El diseño de las presas de colas considera que las aguas no deben ser vertidas, por la carga contaminante asociadas a estas. Esta consideración, provoca la existencia de grandes volúmenes de aguas acompañantes de las colas, más las aportadas por las lluvias. El agua es uno de los agentes fundamentales en los procesos erosivos.

El arrastre de material inicia un proceso de erosión remontante que va ampliando la vía de agua y por lo tanto el caudal y la capacidad de provocar más erosión. Este proceso acaba por desestabilizar el talud de la presa, provocando la aparición de chimeneas o deslizamientos y en definitiva la aparición de una brecha.

Fallos por desbordamiento, tubificación y erosión

Los fallos por desbordamiento, tubificación o erosión ocurren en las presas de colas de manera similar a las presas de embalse de materiales sueltos. Ambos tipos de presa son igualmente sensibles a estos problemas. Sin embargo, las circunstancias que desencadenan estos mecanismos de fallo en las presas de colas son diferentes a las de una presa de embalse. La hidrología de una presa de colas en muchos casos está condicionada por el hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y aun la que ingrese accidentalmente en la presa no se puede verter al medio. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o nívicas, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, en cambio, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, entonces en las previsiones hidrológicas habrá que tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escorrentía superficial ingrese en el depósito.

A lo largo del proceso de construcción y llenado del depósito de colas la morfología y estructura del mismo cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de desbordamiento. Una operación inadecuada puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro problema que puede llevar al desbordamiento.

Un ejemplo interesante de fallo por desbordamiento es el de la presa de Merriespruit (Sudáfrica), ocurrida en 1994. El caso fue descrito por Fourie y Papageorgiou (2001) y Fourie et al., (2001). La presa era de tipo anular con planta rectangular y almacenaba colas de un proceso de extracción de oro. Tenía al momento de su rotura 31 metros de altura y su construcción había comenzado 16 años antes. El recrecimiento se hacía hacia aguas arriba, utilizando las mismas colas como material de construcción y permitiendo su secado para favorecer su consolidación por acción de las fuerzas capilares. El exceso de agua que se acumulaba en el centro de la presa se evacuaba a través de una tubería hacia un depósito interno.

El fallo de la presa de Merriespruit, ocurrida en 1994. La causa de la rotura fue el desbordamiento provocado por el aporte de agua durante una tormenta de lluvia. En la Figura 3 se visualiza la brecha desde aguas abajo y primera línea de casas del pueblo afectadas por la avalancha de lodo. Detalle de la brecha y escarpa dejada por el material escapado medio para luego ser reutilizada en el proceso de extracción. Debido a que la demanda de agua del proceso de extracción era variable y a una inadecuada capacidad del depósito intermedio, era habitual que una cantidad importante de agua quedara almacenada en la presa. En el mismo sitio donde se produjo la rotura, la presa había presentado problemas de filtración y de inestabilidad en el pie del talud. En 1991 se colocó, como medida paliativa, un contrafuerte de escollera. Casi un año antes de ocurrir la falla el llenado del depósito fue suspendido. Sin embargo el vertido de colas continuó de forma esporádica y también ocurrieron escapes de colas desde depósitos vecinos que estaban en operación. Puesto que estos vertidos ocasionales ocurrieron siempre en el mismo costado del depósito, la laguna de decantación fue empujada gradualmente hacia el borde opuesto (el que luego fallaría).



Figura 3. La falla de la presa de Merriespruit, ocurrida en 1994.

Una foto satelital obtenida 3 semanas antes de la falla muestra que la laguna se encontraba en contacto directo con la presa y lejos de la toma de la tubería de decantación, impide la posibilidad de extraer los excesos de agua. No se conoce la altura de resguardo al momento de la falla, pero se estima que era escasa. La falla de la presa de Merriespruit se inició con una tormenta de lluvia que aportó 50 litros/m². Si bien la falla ocurrió por la noche y por lo tanto se conocen pocos detalles, se ha llegado a la conclusión de que el mecanismo que inició la falla fue el desbordamiento (Fourie et al., 2001). La brecha dejó escapar 600000 m³ de colas que fluyeron a lo largo de 3 km (Figura 3). El pueblo vecino de Merriespruit fue inundado con una ola de lodo que alcanzó 2,5 metros de altura destruyendo varias casas y matando a 17 personas. El agua vertiendo por el coronamiento erosionó la cara exterior del talud iniciando una brecha de erosión retrocedente.

Es posible que pequeños deslizamientos locales aceleraran el proceso de erosión. El vertido continuado de agua erosionó también el material de estos deslizamientos acumulado al pie del talud. Al desaparecer la estructura de soporte exterior donde el material era más resistente, las colas más finas y con elevado contenido de agua del centro del depósito comenzaron a ser sometidas a tensiones de corte crecientes. Todo Mecanismo de falla por desbordamiento. La erosión de la cara externa produce un aumento de las tensiones de corte sobre las colas hasta que ocurre la inestabilidad o licuefacción estática. El mecanismo de falla progresiva puede contribuir al proceso. Este proceso sucedió relativamente rápido,

el aumento de las tensiones aplicadas sobre las colas ocurrió en condiciones prácticamente no drenadas. Fourie y Papageorgiou (2001) realizaron ensayos no drenados de las colas almacenadas en la Presa de Merriespruit, encontrando que para las densidades y niveles de confinamiento que existían en la presa, su comportamiento es de tipo contractivo y por lo tanto potencialmente licuable. En un determinado momento el proceso descrito provocó que la resistencia de pico no drenada del material fuera superada. A partir de ese momento también es posible que el mecanismo de falla progresiva haya contribuido a acelerar la rotura. El resultado fue lo que se conoce como “licuefacción estática” de las colas. La inestabilidad que se inicia localmente se extendió a una gran masa de colas que fluyó a través de la brecha en forma de líquido viscoso.

Problemas en la cimentación

El análisis de los fallos por problemas en la cimentación se ejemplifica mediante el estudio del caso del fallo de la presa de Aznalcollar (1998), (ver Figura 4).



Figura 4. Rotura de la Presa de Aznalcollar, 1998. (Foto tomada de Oldecop. L.)

La serie de fenómenos que contribuyeron a que el fallo ocurriera, estuvieron relacionados con la cimentación seleccionada para la construcción de la presa. La presa es de tipo anular, con recrecimiento hacia aguas abajo y una pantalla impermeable de arcilla en su cara de aguas arriba.

El suelo de cimentación estaba constituido por una delgada capa aluvial de aproximadamente 4 m³ de espesor; depositada sobre arcillas marinas carbonatadas, con un

espesor mayor a 60 m. Las propiedades geológicas y mecánicas de estas arcillas, conocidas como “arcillas azules”, fueron determinantes en el mecanismo de fallo.

Las pruebas de ensayo al corte directo de estas arcillas, muestran un comportamiento extremadamente frágil, con una rigidez inicial elevada, un pico de resistencia muy agudo y una caída de resistencia abrupta.

La permeabilidad de la arcilla es muy baja, entre $(2 \text{ y } 7 \times 10^{-9})$ cm/s (Alonso y Gens, 2006). La superficie de deslizamiento, plana con una ligera inclinación (2°) en la dirección del movimiento, se desarrolló en las arcillas frágiles de la fundación, a 13 metros por debajo de la superficie natural del terreno.

Los factores que probablemente contribuyeron al fallo (Alonso y Gens, 2001, Olalla y Cuellar, 2001), relacionados con el cimiento, se mencionan seguidamente:

- 1) La presencia de planos de estratificación, que determinaron el mecanismo de deslizamiento,
- 2) La fragilidad, que probablemente provocó un mecanismo de fallo progresivo,
- 3) La baja permeabilidad, que impidió la disipación de las presiones de poros generadas por la construcción de la presa.

En general, los materiales que presentan un pico de resistencia seguido de una pérdida de resistencia, pueden desarrollar lo que se denomina fallo o rotura progresiva. Ésta consiste en que, en el material de una cierta zona de la estructura que se encuentra sometida a mayores tensiones o deformaciones que el resto, se supera la resistencia de pico.

En esta zona se produce por lo tanto una inestabilidad local, ya que, si la deformación aumenta, la resistencia continúa disminuyendo. Por lo tanto, para restablecer el equilibrio, el exceso de tensión debe ser transferido a zonas vecinas; siempre y cuando no se supere la resistencia de pico de lo contrario se inicia una rotura en cadena, que puede terminar en una rotura global de la estructura.

Los materiales frágiles son más propensos a desarrollar este tipo de mecanismo ya que se necesitan deformaciones (o desplazamientos) relativamente pequeños para hacer que el material supere el pico de resistencia (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008).

Fallo de estructuras auxiliares

La bibliografía consultada refiere que la mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallos en los sistemas de decantación del agua de la presa.

En las presas donde se utilizan los sistemas de decantación del agua, a partir de tuberías que corren por el fondo del depósito que conducen el agua desde la base hacia el exterior, es frecuente el fallo de estos conductos. Estas, provocan filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático; o la creación de una vía de escape para los residuos mineros de poca consistencia.

Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la falla, la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. A un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass. Esto se hizo mediante un tubo de acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando las colas hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación.

Subsidencia

Los reportes de fallos de presas de colas por subsidencia son escasos, en la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) sólo se registran tres casos de un total de 221 reportados. Estos fallos por subsidencia están asociados a la actividad minera subterránea, donde por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), el fallo consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se estaban realizando actividades de extracción (Oldecop, L. y Rodríguez, R, 2008). Los casos de fallos de presas de colas por subsidencia no son frecuentes. En cambio,

el caso de la presa de Iwiny (Polonia) parece ser una auténtica fallo por subsidencia de la fundación (ICOLD, 2001). ÉL fallo ocurrió en 1967 y la información publicada es escasa. La presa estaba construida a través de un valle. Las actividades de extracción se hacían de forma subterránea. Una de las galerías había avanzado, aproximándose a la presa desde aguas arriba, por debajo de la posición del depósito de colas. Al momento de la falla el extremo de la galería estaba a 200 metros del eje de la presa. Una zona de falla de unos 20 metros de espesor cruzaba la presa cerca de su estribo izquierdo.

Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la falla, la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. A un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass. Esto se hizo mediante un tubo de acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando las colas hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación.

La alta capacidad de fluidez puede tener lugar de diferentes formas, desde muy lenta, lenta, a rápida hasta llegar a un movimiento catastrófico. La movilidad de las colas indica que existe una inestabilidad en el medio, así como una pérdida de resistencia y la deformabilidad de este suelo, (Barrera, S. 1998). Ç

Diseño, construcción, operación, cierre, post cierre y monitoreo

Los siguientes autores abordan en sus investigaciones las etapas de vida de las presas de colas, desde el diseño hasta el poscierre y monitoreo: ICOLD., 1989, 1995, 1996, 1999 y 2000; Alarcón, J., y Barrera, S., 2003; Espinace, R., 2008; Rodríguez, R., 2011b; Hernández, T., y Guardado, R., 2014.

Las presas de colas se construyen progresivamente a lo largo de todo el período de explotación minera y procesamiento metalúrgico. Las variaciones en los diseños de construcción se relacionan con cambios importantes en el régimen de operación, la variabilidad de la carga hidráulica o inestabilidad de los cimientos.

En el proyecto de la presa pueden ocurrir cambios y ajustes durante la etapa de construcción, para responder a las necesidades de producción de la planta metalúrgica o para corregir los problemas que se detecten. Es difícil definir la extensión de la etapa de cierre en el tiempo, lo que implica dificultades para el tratamiento estadístico de los eventos extraordinarios.

El funcionamiento hidráulico de las presas de colas está condicionado por un conjunto de procesos naturales, geológicos, climáticos y de interacciones que se realizan en el entorno.

El funcionamiento hidráulico del depósito, tanto durante su etapa de construcción y operación, como después de su cierre y abandono, es determinante para establecer las condiciones de estabilidad física. (Figura 5).

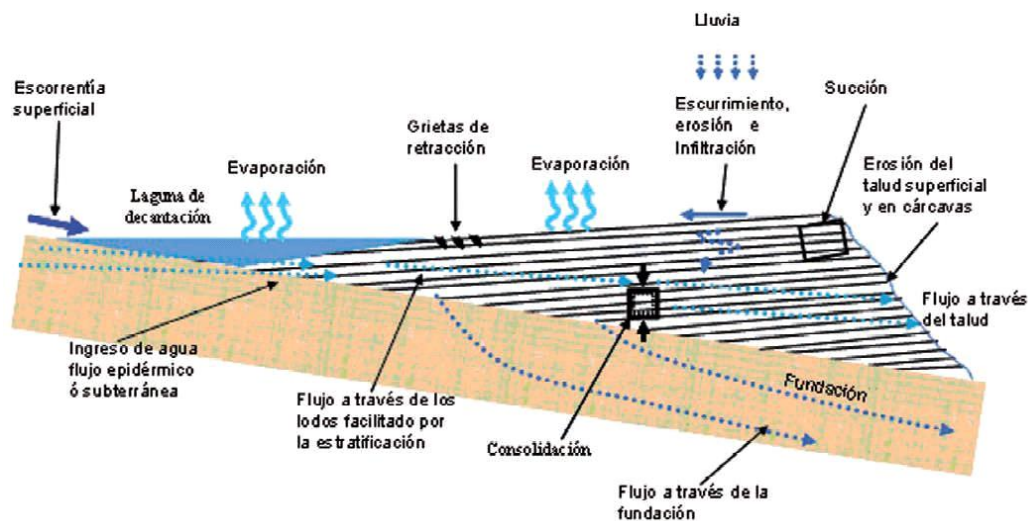


Figura 5. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros tecnológicos con los factores que afectan su funcionamiento (Zandarín, M.T. 2009).

Esta característica implica importantes diferencias en el diseño, en los procedimientos constructivos, en los controles de calidad de la construcción y en los procedimientos y sistemas de auscultación y control de la seguridad.

Los estudios existentes sobre la rehabilitación presentan los métodos de estabilización de terrenos de forma general: Blight, G., 1987; Gray D.H. et. al., 1996; Green, D., 2001; Suárez, J., 2002; Fonseca, R., 2004; Hernández, T. y Guardado, R., 2010.

La temática comienza a ser tratada con mayor profundidad a partir de la década de los 90, debido a los grandes desastres ocurridos en presas de colas en esa etapa. Los estudios presentan una perspectiva general sobre los problemas e incertidumbres que implica el cierre en las presas de colas, en particular cuando se trata de evaluar efectos a largo plazo.

En los últimos años se muestran técnicas muy novedosas que brindan protecciones físicas y químicas muy efectivas, pero de costos muy elevados, por lo que actualmente se le brinda una mayor atención a los métodos de protección empleando la bioingeniería, al resultar menos costosa y sus soluciones son más amigables con el medio, debido a la combinación de elementos naturales como la vegetación y en menor proporción materiales artificiales. Los métodos de protección de taludes son tratados de forma general.

Legislación y normativas internacionales

Los investigadores y organizaciones internacionales siguientes: ICOLD., 1989; UNDRO., 1979 y 1990; Unitet States Committee on Large Dams (USCOLD).1994, 1992 y 1989; Rogge, J.R., 1992; López, A., 1996; Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC). 1998; Asociación de Minería de Canadá., 2000; Hortelano, A. y Casas, A., 2003; han realizado aportes importantes al establecimiento de regulaciones para el control de áreas minadas abandonadas y de las presas en general.

En los países con grandes explotaciones mineras existe un amplio soporte legislativo sobre las regulaciones para la construcción, operación y cierre de presas de colas; estos se rigen por el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD), organización rectora en el mundo de las grandes presas. Esta temática aún es insuficiente con respecto a las obligaciones en las operaciones y el manejo de estas obras.

En los países latinoamericanos la construcción, operación y cierre de las presas de colas constituye un gran problema debido a los fallos de las presas por incumplir con las normativas de diseño y violar las regulaciones existentes, lo que ha provocado el abandono

de las presas de colas, fuentes de contaminación del medio, que ponen en riesgo a la población, la infraestructura y al medio que existe aguas abajo.

Estado de la temática de la protección de las presas de colas en Cuba

La reducción de riesgos naturales en Cuba es una prioridad, su estrategia se sustenta en un marco legal que comprende leyes, decretos, resoluciones ministeriales, entre otras. La base institucional para su implementación y el control de su cumplimiento es sólida.

En 1962 es establecida la Defensa Popular como baluarte para la protección de la población y su economía, contra las agresiones y sabotajes del imperialismo norteamericano y de los peligros naturales, la cual se transforma en Sistema de Medidas de Defensa Civil. El sistema se fue perfeccionando con nuevas experiencias y leyes, una de estas últimas es el Decreto Ley 170 del Sistema de Medidas de Defensa Civil, de mayo de 1997.

La base legal cubana en materia de reducción de riesgos de desastres abarca 3 leyes, 7 decretos leyes, 13 decretos, 21 resoluciones ministeriales y 1 directiva, entre las que podemos citar:

1- La ley 75 de la Defensa Nacional, del 21 de diciembre de 1994, en el Capítulo XIV se define el Sistema de Medidas de Defensa Civil y se otorgan responsabilidades a los Presidentes de las Asambleas Provinciales y Municipales del Poder Popular como líderes de Defensa Civil en sus respectivos territorios. Establece también, que las medidas de la defensa civil deben ser coordinadas y ejecutadas por los organismos estatales, las entidades económicas y las instituciones sociales. En esta ley se establecen además las principales medidas a cumplir para la protección de la población y la economía.

2- El decreto ley No. 170, del Sistema de Medidas de la Defensa Civil, como cuerpo legal específico referente a la Defensa Civil, define ampliamente todos los aspectos relacionados con la reducción de riesgos de desastres en la República de Cuba. En este decreto se define por primera vez la “reducción de desastres” como el “conjunto de actividades preventivas, de preparación, respuesta y recuperación, que se establecen con la finalidad de proteger a la población, la economía y el medio, de los efectos destructivos de los desastres naturales”.

3- Decreto ley No. 262, Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa. Establece la consulta obligatoria de todas las inversiones realizadas en el país al correspondiente nivel de Defensa Civil, con el fin de incorporar las medidas de reducción de riesgo de desastres. Esto incluye a los planes, programas y proyectos de desarrollo nacional.

4- Directiva No. 1 del Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil (EMNDC), 2017, aprueba lo siguiente:

- La "Apreciación general de peligros de desastres en Cuba",
- Implementar las acciones para la prevención de desastres a todos los niveles, de los organismos y órganos estatales, entidades económicas e instituciones sociales,
- Establecer durante la respuesta a las situaciones de desastres, las fases de Aviso, Informativa, Alerta y Alarma y los plazos,
- Elaborar la documentación para la reducción de desastres, a partir de lo establecido en la propia Directiva No. 1.

Esta regulación no declara a las presas de colas como obras de peligros tecnológicos, existiendo la necesidad de particularizar en el conocimiento de la gestión de los riesgos por fallos de estas estructuras.

5- Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres, EMDCN, 2012: Esta guía tiene como objetivo normar metodológicamente la participación de las estructuras de las administraciones provinciales y municipales, de los organismos de la Administración Central del Estado, de las entidades presupuestadas, del sistema empresarial y de las formas de producción no estatales, así como de los Consejos de Defensa y sus grupos de trabajo en la organización y dirección del proceso de reducción de desastres. Se declara además que el proceso de reducción puede ser enriquecido con las experiencias y particularidades de cada territorio, órgano, organismo, entidad y forma de producción de la economía. En los órganos y organismos estatales y sus entidades y en las

demás formas de producción de la economía, el nivel de riesgo se determina por grupos de especialistas designados con el empleo de las metodologías que se elaboren al efecto.

La Defensa Civil cubana, de manera sistemática, realiza un análisis objetivo de las premisas de desastres que afectan al territorio nacional, con la finalidad de evaluar los diferentes elementos que reducen los riesgos de desastres y adoptar las decisiones pertinentes para perfeccionar los mismos. Esto ha permitido desarrollar los mecanismos establecidos, para incluir el peligro y la reducción del riesgo de desastres en el proceso de desarrollo integral del país y en los proyectos de inversión, el aseguramiento financiero y material de las medidas de reducción de desastres, con énfasis en el nivel local, así como determinar con objetividad el rol de cada órgano, organismo, entidades e instituciones sociales en el proceso de reducción de riesgo de desastres.

La Ley # 81 de Medio Ambiente, emitida en el año 1997, no incluye a las presas de colas como uno de los focos de contaminación más violentos al medio natural. Los fallos de las presas de colas son escenarios que no fueron contemplados en esta ley medio ambiental, lo que favorece a la no percepción de los riesgos que representan estas obras para el hombre, las propiedades y el ambiente.

CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Introducción

En el presente capítulo se hace una caracterización físico-geográficas y geológicas del área de estudio, se determinan los mecanismos de fallos de estas obras ante peligros naturales y tecnológicos.

1.2 Localización geográfica del área de estudio

La presa de colas se ubica en el municipio Moa provincia Holguín, al sureste de la ciudad de Moa, al suroeste del puerto (a unos 2500 m aproximadamente), al oeste de las instalaciones industriales de la Moa Nickel S.A y al este de la empresa eléctrica del municipio Moa (Figura 6), ocupando un área de aproximadamente 45310 m².

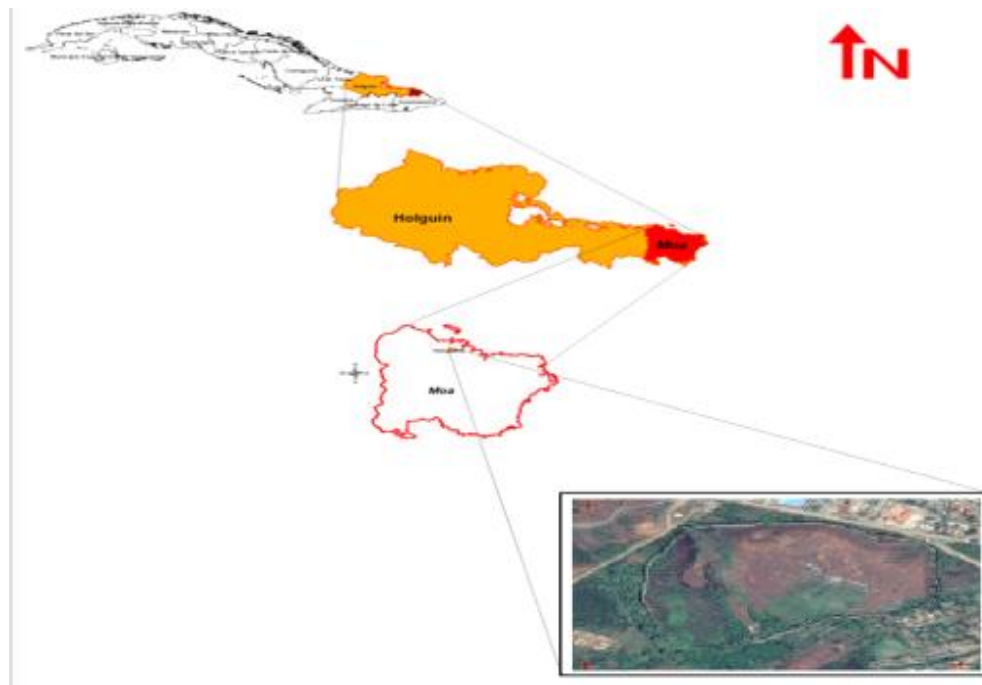


Figura 6. Esquema de ubicación geográfica del área de estudio.

1.3 Clima

El clima de la zona es del tipo tropical húmedo, con gran cantidad de lluvia, incluso en el mes más seco. Este está influenciado por la orografía, ya que las montañas del grupo Sagua-Baracoa sirven de barrera a los vientos alisios del NE, los cuales descargan toda su humedad en forma de abundantes precipitaciones en la parte norte. La distribución de las precipitaciones se caracteriza por dos períodos de lluvia, (Mayo -Junio) y (Septiembre - Enero) y dos períodos de seca (Febrero - Abril) y (Julio - Agosto). En un año, la precipitación media es 1624 mm y según los análisis estadísticos de 21 años (1989–2009) el total anual varía entre 767 – 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos. Los períodos húmedos comprendidos entre los meses de septiembre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 168 - 336 mm y mayo - junio con un promedio de 149 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses de febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia de 94 mm y los meses de julio y agosto con un acumulado promedio de 100 mm de precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 21.5 C y 30.41 C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta octubre y los más fríos de diciembre a marzo; los meses más lluviosos mayo, octubre, noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto.

1.4 Hidrografía del medio y su impacto antrópico

1.4.1 Régimen de las Lluvias

La región de Moa se ha caracterizado por un intenso régimen de lluvias asociado con la interacción de la zona costera y las zonas montañosas. Los registros de lluvias en el territorio han reportado valores de hasta 700 mm en el mes de diciembre del año 2017. Las mediciones de las precipitaciones de los últimos tres años (2015-2017), obtenidas de los registros de los pluviómetros ubicados en el municipio (Tabla 1), muestran que en la zona de Moa está influenciada por la actividad y acción de las aguas. Las precipitaciones atmosféricas pueden constituir un detonante de fallo si estas no son adecuadamente controladas en el interior de la presa de colas.

Tabla 1. Estadística de las precipitaciones, periodo 2015 al 2017.

Mes	Año 2015 (mm)	Año 2016 (mm)	Año 2017 (mm)
Enero	169.5	359.9	35.6
Febrero	279.1	231.7	70.4
Marzo	175.8	96.2	436.9
Abril	78.1	137	51.4
Mayo	462.1	258.5	175.9
Junio	7.2	70.7	23.6
Julio	37.4	141.2	69.8
Agosto	88.2	102.9	310.1
Septiembre	63.6	118.4	314.0
Octubre	78.5	359.8	194.0
Noviembre	406.0	252.4	754.3
Diciembre	114.3	162.2	380.8
Promedio Anual	163.3	190.9	234.7

1.4.2 Escurrimiento superficial

El drenaje natural superficial y subterráneo (Figura 7), unido a las intensas precipitaciones propician la erosión hídrica: laminar, en surcos y en cárcavas. La magnitud de la erosión de los taludes de la presa de colas es elevada, en forma de surcos y cárcavas de gran profundidad. Las cárcavas cortan los estratos de aluviales de la base de la presa de colas, y en forma de erosión vertical y horizontal que acelera el proceso de degradación del material que forma el talud. El arrastre de las aguas hacia el interior de la presa ha incrementado la vulnerabilidad, arriesgando la integridad física del dique de contención.

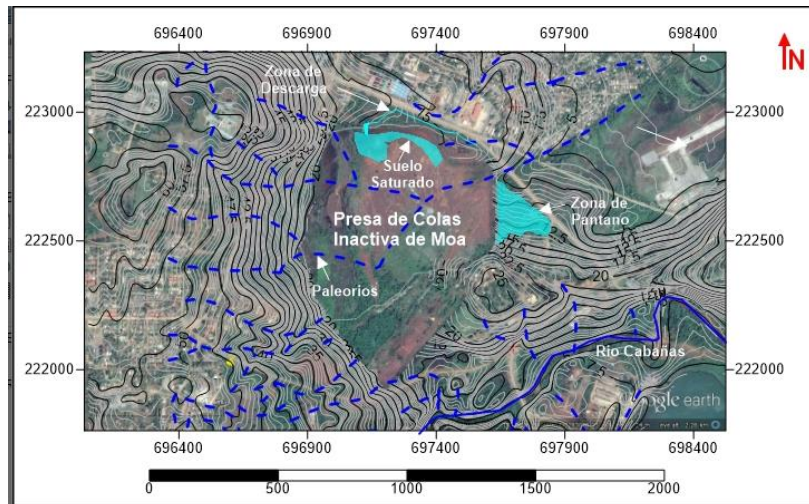


Figura 7. Zonas de drenaje superficial y subterráneo de la presa de colas inactiva de Moa.

1.5 Geomorfología del territorio

El relieve de Cuba oriental es el reflejo de la alta complejidad geológico estructural resultante de la acción de procesos compresivos durante la etapa Mesozoica y el Paleógeno, a los cuales se han superpuesto desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e interrumpidos, así como la separación en bloques del territorio (Rodríguez, A. 1998) (Figura 8). El relieve de Moa y sus áreas adyacentes está clasificado dentro del tipo de Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados (Oliva, G. 1989).

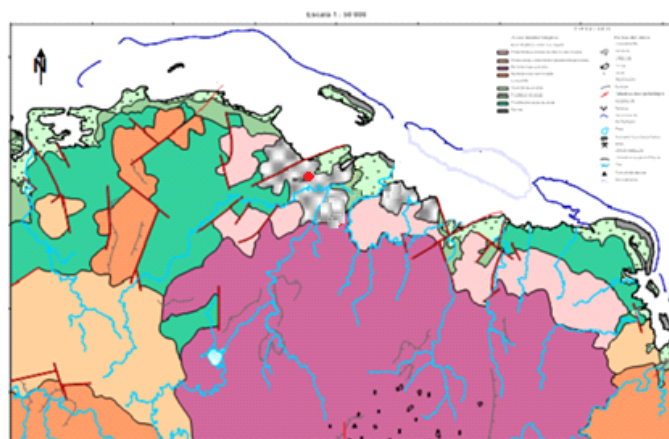


Figura 8. Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998)

1.6 Geología de la región

Cuba, estructuralmente, forma parte de la plataforma norteamericana, pero en su constitución geológica están presentes varias paleounidades tectónicas representativas de tres etapas del desarrollo del caribe: el arco de islas volcánicas del mesozoico, el del terciario y restos del protocaribe. Actualmente se encuentra separada de la placa caribeña por el sistema de fallas transformantes Oriente.

Según Iturralde-Vinent, 1996 la geología de Cuba se caracteriza por la existencia de dos elementos estructurales fundamentales: el cinturón plegado y el neoaútóctono. El cinturón plegado según el autor, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfozados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran grandes entidades paleo geográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de piggy back del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de piggy back del Eoceno Medio-Oligoceno. El neoaútóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado (Figura 9).

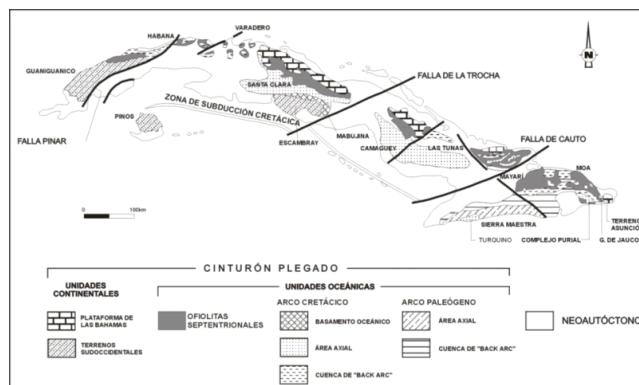


Figura 9. Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996)

Cuba Oriental, desde el punto de vista geológico, es la región al este de la falla Cauto. En esta porción de la isla las ofiolitas están asociadas a la Faja Mayarí Baracoa y han sido interpretadas como un sistema de cuencas de ante arco ubicado paleo geográficamente entre el margen Cretácico de la plataforma de Bahamas y el arco volcánico de Las Antillas, los afloramientos están separados en tres complejos: Mayarí-Cristal, Moa-Baracoa, Sierra del Convento (Iturralde-Vinent, M.A. 1996).

El complejo ofiolítico Moa-Baracoa ocupa un área de 1500 km², muestra un corte completo del complejo ofiolítico formado por peridotitas con texturas de tectonitas, cúmulos ultramáficos, cúmulos máficos, diques de diabasas y secuencias efusivo-sedimentarias. Existen numerosos cuerpos de cromitas, sill de gabros y diques de gabros y de pegmatoides gabroicos localizados en la parte alta de la secuencia mantélica en la zona de transición con los cúmulos (Proenza, J. 1998) (Figura 10).

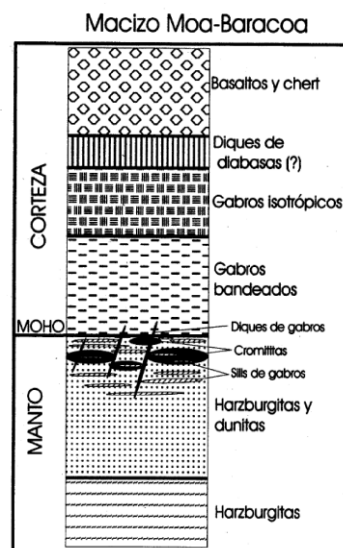


Figura 10. Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998.

En el macizo predominan las harzburgitas y peridotitas serpentinizadas, en menor medida están presentes dunitas, dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas y piroxenitas, según el diagrama de Streckeisen, 1976. El complejo ultramáfico se ha datado con una edad de Jurásico-Cretácico Temprano (Iturralde-Vinent, M.A. 1996). Se considera

que las rocas ultramáficas serpentizadas presentan un espesor superior a los 1000 m, en forma de escamas tectónicas muy fracturadas (Fonseca et al., 1985).

Sobre las rocas del complejo Moa –Baracoa se desarrollan cortezas de meteorización lateríticas donde se localizan importantes yacimientos de níquel y cobalto de la región. Los horizontes de la corteza desarrollados sobre rocas ultrabásicas, son clasificados en seis categorías locales (Ariosa, 2002, p. 88), las que se muestran a continuación, junto a sus equivalentes aceptados internacionalmente:

- OICP: Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (Ferricrete and limonitic overburden)
- Ol: Zona de ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas (laterite rouge, limonite)
- OEF: Zona de ocres estructurales finales (ferruginous saprolite, saprolite fine, laterite jaune)
- OEI: Zona de ocres estructurales iniciales (saprolite, earthy saprolite)
- RML: Zona de rocas madres lixiviadas (rocky saprolite, bouldery saprolite)
- RMA: Zona de rocas madres agrietadas, poco meteorizadas (parent rock, bedrock)

1.7 Geología del área de estudio

El marco geológico donde se encuentra emplazada la presa de colas se caracteriza por la presencia de los depósitos del cuaternario que constituyen una cobertura continua de la cimentación de la presa; y en menor medida hacia el sur de la presa se localiza la corteza laterítica sobre las rocas del complejo ofiolítico. En la figura 11 se muestra el mapa geológico del área de estudio, donde se representan las principales formaciones geológicas presentes.

Según Rodríguez, A. 1998, los depósitos cuaternarios están constituidos por calizas organodetríticas con gran contenido de fauna, predominando los moluscos contemporáneos. Aparecen también aleurolitas calcáreas, arenas margosas y arcillas. Los depósitos ubicados en los márgenes, cauces y desembocaduras fluviales están constituidos

por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial.

El área de afloramiento de los depósitos cuaternarios constituye una cobertura prácticamente continua en forma de franja a lo largo de la costa y discontinua en las partes interiores. El relieve de estos depósitos, se desarrollan en zonas de llanuras costeras débilmente onduladas, en zonas pantanosas parálidas y en las desembocaduras y cauces de los ríos sobre llanuras irregulares.

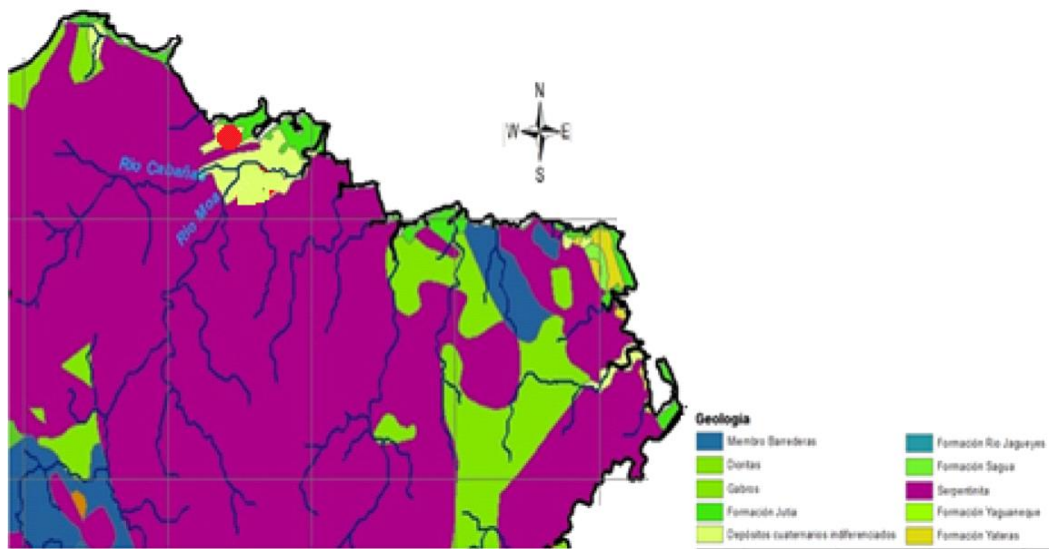


Figura11. Esquema geológico del área de estudio. Modificado de IGP, 2001

1.8 Tectónica del área de estudio

El Bloque Oriental Cubano comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, A. 1998).

En los estudios tectónicos precedentes del territorio se han reconocido cuatro sistemas de fallas que cortan a las rocas de la asociación ofiolítica y que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica.

1.9 Sismicidad del área de estudio

Aunque no se tienen reportes históricos de la ocurrencia de un terremoto fuerte con epicentro en la localidad de Moa, no se niega la posibilidad de su ocurrencia en épocas anteriores, ya que esto puede deberse a la no existencia de una infraestructura socioeconómica y cultural que permitiera el archivo de estos datos. Es de interés señalar que en Moa se reporta la percepción de muchos terremotos, algunos de los cuales tuvieron su epicentro al norte de La Española. En 1944, se reportó un sismo con una intensidad máxima de 5.0 MSK en la ciudad de Sagua de Tánamo, su epicentro pudo estar en los 20.50 de Latitud Norte y los 75.70 de Longitud Oeste (cerca de Pinares de Mayarí) y su magnitud alcanzar un valor del orden de los 4.7 Richter, que se puede considerar un sismo significativo para esta región (Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) y Geocuba, 2008-2009).

El 20 de marzo de 1992 ocurre un terremoto de magnitud 4.3 en la escala de Richter, a 15 Km. de la costa al este de la ciudad de Moa, en los 20° 48' de Latitud Norte y los 74° 48' de Longitud Oeste frente a la localidad de Cupey, a una profundidad de 5 km. Este sismo con una intensidad máxima de VI en la escala MSK en Moa, produjo agrietamientos de paredes en escuelas y edificios de viviendas de esta ciudad. Este es el primer terremoto con estas características que se registra en las cercanías de Moa.

En el período desde 1992 hasta el 19 de abril de 1998 se reportan tres sismos percibidos por la población de Moa. El primero de éstos, ocurrió el 2 de marzo de 1994 ($M_s = 5.6$), al norte de República Dominicana, el segundo ocurrió el 13 de septiembre de 1996 ($M_s = 3.3$) y el otro tuvo lugar el 19 de abril de 1998 ($M_s = 3.5$), en el macizo Moa - Baracoa, a unos 20 km. al sur de Moa, cuya réplica perceptible tuvo una intensidad de 3.0 grados MSK (Chuy, T. 1999).

El 28 de diciembre de 1998 se registró un fuerte temblor ($M_s = 5.5$) ubicado al nordeste de Moa que generó intensidades de hasta VI grados MSK, provocó agrietamiento de paredes en viviendas de mampostería y edificios multifamiliares, y fue percibido por toda la población como una sacudida fuerte del terreno. La ocurrencia de este sismo afectó la presa de colas inactiva de Moa como se muestra en la Figura 12.

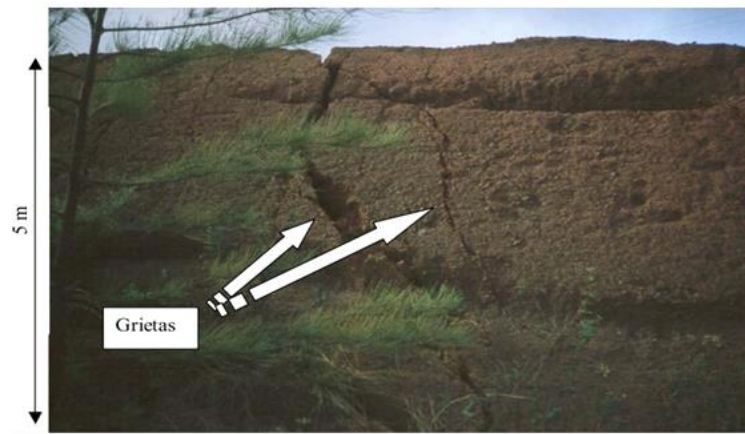


Figura 12. Grietas en muro de la presa inactiva de Moa, sismo de 1995 (Rodríguez, A. 1998)

En el período del 28 de diciembre de 1998 hasta diciembre de 1999 se registraron 24 eventos perceptibles y un total de más de 1200 réplicas, agrupadas fundamentalmente en los sectores señalados anteriormente. Hasta el 4 julio de 1999 se reportaron 16 eventos perceptibles y fueron registrados por nuestra red de estaciones 437 temblores de diferentes rangos energéticos (Arango, E. et al. 2009).

La actividad sísmica después de las series de terremotos de los años 1998-1999 ha continuado de manera significativa en la región del nordeste holguinero, una de las zonas sísmicas del territorio nacional más activas del país, prueba de esto es que durante el año 2005 se registraron un total de 101 sismos, de ellos uno de 3.7 de magnitud en la escala de Richter, el de más alta energía registrado en ese año en todo el país. Los datos estadísticos de los sismos ocurridos en las zonas de monitoreo de la región oriental y en particular en Moa – Purial hasta el año 2014 reflejan que estas zonas han continuado activas (Figura 13).

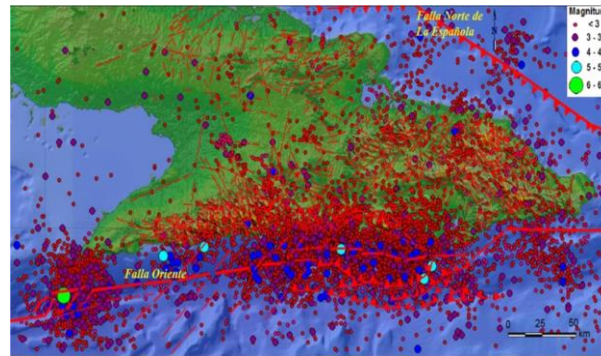


Figura13. Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014.

1.10 Riesgo sísmico

Los estudios de la sismicidad de la provincia de Holguín indican que los municipios de Moa, Frank País, Sagua de Tánamo y Cueto se localizan en una zona activa de alta vulnerabilidad para el surgimiento de grandes deslizamientos (Figura 14).

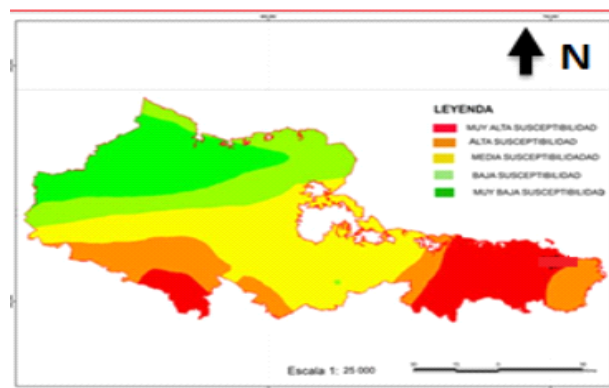


Figura14. Vulnerabilidad por deslizamientos de la provincia Holguín (Guardado, R. y otros 2012)

1.11 Suelos

En la región aparecen suelos ferríticos – púrpura de la serie Nipe, de composición arcillosa y alto contenido de peróxidos de hierro, le siguen en importancia los suelos escabrosos, poco profundos, esqueléticos de escaso desarrollo en el perfil y alto contenido de hierro. En ambos el drenaje es bueno y en ocasiones excesivo, lo que unido a sus características físico – mecánicas y las intensas precipitaciones que ocurren en la zona provoca una fuerte erosión hídrica, laminar y en cárcavas.

1.12 Recursos minerales

Moa es la región minera más importante de Cuba con 10 yacimientos lateríticos de níquel y cobalto; las reservas probadas de mineral industrial (níquel más cobalto) son de 800 millones de toneladas y se han estimado por exploración geológica en unos 3000 millones de toneladas, constituyendo la segunda reserva mundial de níquel y la primera de cobalto.

En esta zona existen también varios importantes yacimientos de cromo, que constituyen las mayores reservas del continente americano con 6.5 millones de toneladas, y uno de los más importantes yacimientos de zeolitas de Cuba con más de 20 millones de toneladas.

1.13 Infraestructura económica

El municipio de Moa se comunica por carretera con todo el país, existiendo los viales desde Moa hasta la ciudad de Baracoa y de igual forma se enlaza con la ciudad de Holguín y con el resto de país. Por vía aérea el territorio tiene comunicación con la ciudad de la Habana y Holguín. Existe además un puerto marítimo que permite el atraque de buques de mediano calado. Económicamente la región está dentro de las más industrializadas del país, no solo por sus riquezas minerales, sino que además cuenta con dos plantas procesadoras de níquel, la Comandante Ernesto Che Guevara y la Comandante Pedro Sotto Alba con capacidades de diseño original de 30 mil y 24 mil toneladas respectivamente de concentrados de Ni+Co al año, aunque en estos momentos son objeto de trabajos de ampliación.

1.14 Construcción y operación de la presa de colas inactiva de Moa

El método seleccionado para la construcción de presas de colas fue el método de “aguas arriba”, (Figura 15), el cual no fue completado dado que se detuvo la deposición de colas.

La presa se construiría de forma progresiva con “diques perimétricos”, apoyando un metro sobre el dique anterior y el resto sobre la superficie de las colas de forma tal que estas constituyen el suelo de cimentación del dique; la base de cada dique oscilaría entre 14-19 m.

La particularidad de este método es que la integridad estructural de la obra está gobernada por las propiedades y comportamiento de las colas inferiores descargadas hidráulicamente, que forman la base del talud del dique superior.

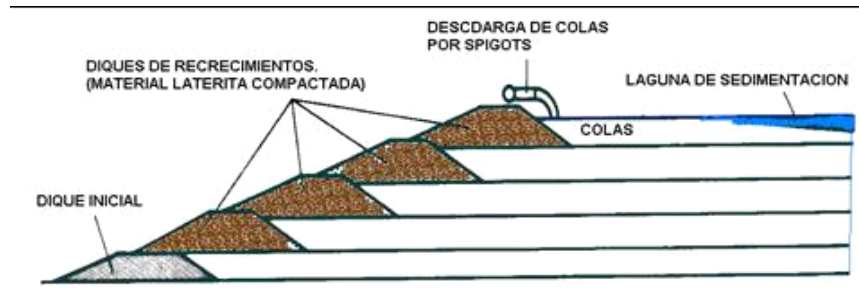


Figura 15. Sección transversal del método constructivo empleado aguas arriba, Hernández, T. 2015.

En los años 70 se detienen las operaciones de deposición de las colas al existir problemas ingenieriles que impedían el recrecimiento de los diques sin poner en riesgo la integridad física de la presa.

Las colas depositadas en la presa se componen del residuo de los proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL, por sus siglas en inglés) de la extracción de níquel y cobalto. Las menas explotadas provienen de las zonas limonítica.

Los residuos sólidos son mezclados con agua, transportados por tuberías en forma de pulpa y depositados de forma regular. Los tubos de descarga se distribuyen cada 25 metros, (ver Figura 16), en todo el perímetro de la presa de colas; garantizando un mejor aprovechamiento de la capacidad de la presa.

El pH de la pulpa HPAL es ácido, con valores entre 4 - 5; las característica de las colas son areno arcillosa, con predominio de los limos. Los residuos están compuestos mayoritariamente por óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mg, entre otros elementos.

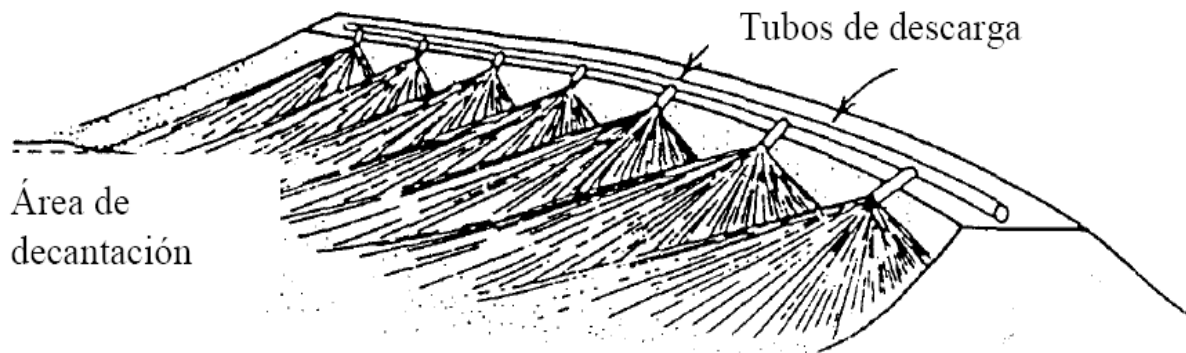


Figura 16. Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga, según ICOLD, 1989.

Conclusiones parciales

1. Las condiciones físico-geográficas y geológicas del área de estudio favorecen el incremento del nivel de riesgo de la misma ante los fenómenos naturales como sismos o lluvias producto deterioro existente en esta estructura.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LOS RIESGOS POR FALLOS DE EN LAS PRESAS DE COLAS

2.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es diseñar el procedimiento para evaluar los riesgos por fallos de las presas de colas, identificar los elementos en riesgos e indicadores de riesgos y proponer un plan de gestión de riesgos de desastres ante este fallo, para la prevención, mitigación de posibles daños ante el colapso de la presa.

2.2 Etapas de la investigación

Para la evaluación de los riesgos de las presas de colas, se dividió en tres etapas como se muestra en la Figura 17:



Figura 17. Organigrama de trabajo

2.2.1 Etapa preliminar

Búsqueda bibliográfica

La bibliografía analizada es muy escueta y fraccionada, expresando resultados muy particulares o muy generales del tema. Durante el cumplimiento de esta etapa se consultaron informes, proyectos técnicos, guías técnicas, regulaciones ambientales y de seguridad, tesis de grado y doctorales, además de publicaciones y artículos relacionados con la temática tanto en el mundo como en Cuba.

2.2.2 Etapa de trabajo de campo

Observaciones

Las visitas al campo constituyen el trabajo más significativo e importante, pues a través del mismo se inspecciona la obra y se controla visualmente las condiciones reales y actuales de la misma. Se realizaron varias entrevistas y encuesta para determinar el nivel de percepción de riesgos que tiene la población y los trabajadores del sector empresarial que se encuentra ubicado en el entorno de la presa de colas. Esta evaluación se realiza mediante las visitas al campo y el análisis de las condiciones geológicas, geotectónicas y ambientales de la obra y de toda la zona que la circunda. Se realizaron inspecciones visuales en la cual se analizó las condiciones geológicas y ambientales de toda la zona que circunda. Se tomaron imágenes que permitieron la caracterización cualitativa de los parámetros que se analizan en la etapa del procesamiento de la información, principalmente respecto a la situación actual de la presa.

2.2.3 Etapa de gabinete

Durante esta etapa se procesa toda la información acumulada durante el transcurso de las primeras etapas, este trabajo se dividió de la siguiente forma: evaluando el comportamiento de los indicadores de fallos, además de los elementos vulnerables ante fallos de la presa de colas.

2.2.4 Análisis de los indicadores de riesgos por fallos

El término “indicador” se refiere al resultado de una observación o rasgo que refleja y permite medir diferentes aspectos de una condición o componente del riesgo (Figura 18). Los indicadores de fallos son entonces valores de referencia de los peligros, la vulnerabilidad o el riesgo mismo, o cualquier otro aspecto de una zona determinada, incluyendo tanto aspectos físicos como económicos, sociales y ambientales. Los indicadores de fallos en general permiten crear una “línea de base” sobre la cual pueden hacerse comparaciones relativas o mediciones de procesos o cambios en el tiempo de cada uno de ellos. Los indicadores de fallos se pueden obtener a partir de la información de bases de datos históricos, de la información de los ordenamientos territoriales, o mediante levantamiento directo de información en campo; con encuestas, entrevistas a personal de alta experiencia

en la temática. Es posible también calcular indicadores como el de cumplimiento de las exigencias del código de construcciones vigente (como medida relativa de la calidad), el cual indica el grado en el que las edificaciones no cumplen con los requisitos del código de diseño y construcción sismo resistente del país. Se calcula mediante una evaluación aproximada del comportamiento esperado en la obra, se emplea para el efecto un nivel de peligro acorde con la normativa vigente, y se evalúa en términos relativos el riesgo resultante.

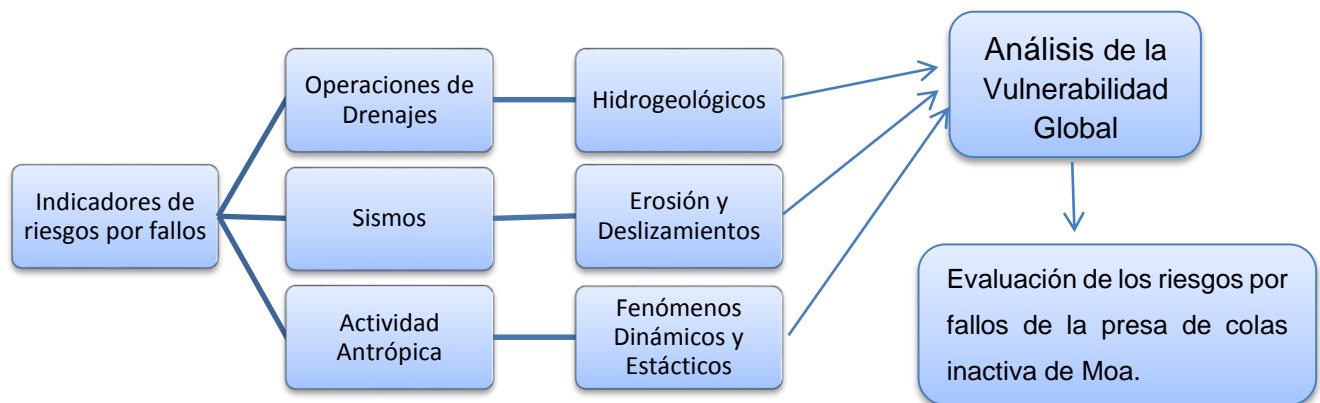


Figura 18. Flujograma para la determinación de la vulnerabilidad global y de los riesgos por fallos de las presas de colas

2.2.5 Evaluación de los riesgos por fallos en las presas de colas. Los pasos para la evaluación del riesgo, se explican a continuación:

Paso 1. Clasificación cualitativa de los peligros agrupados por cada zona de la presa:

En la Tabla 4 se resumen los resultados del nivel de peligro alcanzado por zonas, por los grupos de eventos que arrastran al fallo, que se definieron en el análisis del riesgo. Los grupos en que se conjugan los peligros para el análisis de los riesgos son: erosión superficial, deslizamientos, agrietamientos en el talud, sismos, fallos de las obras de drenajes, para evaluar los niveles de riesgos por cada zona.

Paso 2. Clasificación cualitativa de la vulnerabilidad global por cada grupo de eventos generadores de peligros, en cada zona en sus elementos estructurales y no estructurales:

El resumen de la clasificación de la vulnerabilidad se muestra en la tabla 2 y 3.

Paso 3. Determinación de los niveles cualitativos y los cuantitativos de (IR), para determinar los daños directos esperados.

La valoración de los riesgos se apoya en el siguiente razonamiento: Conocido el peligro, entendido como la posibilidad de que se presente un evento con una intensidad dada, durante un período de exposición, y conocida la vulnerabilidad, deducida como la predisposición intrínseca del elemento u obra expuesto a ser afectado o a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de ese evento, los riesgos económicos anuales pueden entenderse como, la probabilidad de que se tenga en el año “n” una pérdida o daño sobre el elemento o la obra, igual a:

$$R_n = IR * p * Ce / 100, \text{ USD/año}, \quad (1.2)$$

Donde: **(IR)** – Índice de evaluación cuantitativa de los riesgos: **(Ce)** – Costos de ejecución de los elementos de la obra, en **USD** y **(p)** – Probabilidad de ocurrencia anual del evento o peligro, es el inverso del período de recurrencia del evento evaluado, los valores empleados para cada grupo de peligros se muestran en la Tabla 10.

$$R_t = (E) (R_s) = (E) (H. V), \quad (1.3)$$

Riesgo total (**total risk - Rt**), como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir el producto del riesgo específico **(Rs)** y los elementos bajo riesgo **(E)**. En otras palabras, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general.

$$R_t = H * V, \quad (1.4)$$

Amenaza o peligro (Hazard - H), definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

Vulnerabilidad (V), como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Con los resultados del peligro y la vulnerabilidad de los pasos 1 y 2, se procede a la determinación de los niveles cualitativos y cuantitativos del riesgo (IR). Los resultados del análisis se muestran en las Tablas 7 y 8.

Paso 4. Determinación de los daños a instalaciones que pueden ser afectadas por el colapso de la presa y evaluación de los riesgos por cada zona.

Con los resultados de los valores de la probabilidad anual de ocurrencia de los eventos peligrosos sobre la presa de colas que se muestran en la Tabla 9 se evalúan en que porcentaje puede ser afectado las instalaciones que se encuentran cerca de la presa para luego hacer una evaluación de cuantitativa de los riesgos en general de los peligros por los grupos de eventos que arrastran al fallo.

Paso 5. Proponer medidas que garanticen la prevención, mitigación y corrección de impactos generados ante fallos de la presa.

2.3 Análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros en las presas de colas

El análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros debe realizarse con profundidad debido a que el mismo constituye la información básica para la evaluación de los riesgos por fallos de las presas de colas.

A continuación, se detallan los factores condicionantes y disparadores:

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 está definida en los criterios de diseño para la construcción, tanto para la vertical (V) como para la horizontal (H).

Factor clima: 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. La observación está centrada en la influencia de la variabilidad del clima sobre los 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, constituyen una herramienta clave para los cálculos de entradas, salidas y volúmenes almacenados de agua.

Factor sismo: representa aquellos indicadores que caracterizan la situación sismológica del medio: Intensidad y magnitud, la actividad tectónica constituida 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.

La caracterización de los indicadores de fallos permite realizar una evaluación de las vulnerabilidades en dependencia del nivel de cumplimiento o no de los parámetros de construcción.

2.4 Elementos en riesgos ante fallos de la presa de colas

Población: exposición de los seres humanos a eventos que induzcan pérdida o daños a los medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo.

Instalaciones: exposición de las instalaciones de importancia económica y social a sucesos peligrosos ante el colapso de la presa de colas.

Ambiental: susceptibilidad de la población, las instalaciones y el medio ambiente ante la ocurrencia de algún evento amansador.

Residuos almacenados: probabilidad de la pérdida de los recursos contenidos en las colas ante la ocurrencia de fallo en la obra.

Conclusiones parciales

1. La evaluación de los riesgos por fallos de la presa permite determinar los elementos en riesgo e indicadores de fallos por sobrepaso en las presas de colas, los cuales son:
 - Elementos: población, instalaciones económicas, las comunidades del entorno y el medio ambiente;
 - Los indicadores de fallos se corresponden con el sobrepaso, deslizamientos y erosión.
2. Se propone medidas para la prevención, mitigación o corrección de impactos ante el colapso de la presa de colas garantiza minimizar los daños sobre el medio, la sociedad y la economía.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE RIESGOS POR FALLOS DE LA PRESA DE COLAS INACTIVA DE MOA

3.1 Introducción

En este capítulo se zonifica la presa de colas inactiva de Moa para la evaluación de los riesgos por fallos de la presa de colas, se indican las zonas más vulnerables y las que se encuentran en riesgo; e implementa un plan de reducción de desastres que garantiza la prevención, mitigación y corrección de impactos generados ante fallos de la presa.

Las consultas bibliográficas y las visitas al campo permitieron evaluar las condiciones actuales de la presa con respecto a los parámetros de diseño y confirmar el insuficiente conocimiento de los riesgos por fallos que representa de la presa de colas inactiva de Moa ante peligros de origen natural o antrópicos. Las inspecciones visuales revelan que las colas depositadas no se ajustan a los requerimientos de diseño de los proyectos para la construcción de las presas de colas.

3.2 Elementos en riesgo ante fallo por sobrepaso de la presa de colas

Los factores o elementos en riesgo se evaluaron considerando la susceptibilidad ante una amenaza u ocurrencia de fenómenos de origen natural y tecnológico que pueden provocar el fallo de la presa de colas. La presa de colas se encuentra próxima a una zona habitada donde se encuentra un sector empresarial con diferentes infraestructuras de importancia económica y medio ambiental que pueden ser dañados ante la ocurrencia de algún fallo de la obra. Evaluando la ubicación de la presa de colas, se determinaron los siguientes elementos en riesgo.

Población

La presa de colas limita hacia el sur con la comunidad Armando Mestre. En dirección este se ubica la comunidad 5 de diciembre, donde han construido viviendas en la parte superior de la presa de colas, hacia el norte de la presa existen fincas destinadas al uso agrícola y ganadero.

Instalaciones económicas

Hacia el norte de la presa se ubica la Dirección Municipal de la Empresa Eléctrica, de Educación, Oficinas y almacenes de tiendas CIMEX, Carpintería de la EMA, Empresa Constructora de Moa, un centro de suministro de combustibles de CUPET en construcción, la empresa Municipal de la Agricultura de Moa, redes eléctricas, líneas de comunicaciones, y la carretera que comunica a Moa con Baracoa y Holguín. Figuras 19 y 20.



Figura 19. Instalaciones económicas

Residuos almacenados en la presa

La efectividad del mecanismo de clasificación depende de la relación sólido/agua con que se vierten las colas al depósito, a medida que aumenta la concentración de sólidos del material vertido (colas más espesas), la efectividad del mecanismo de clasificación disminuye. En concentraciones de sólidos de 16 % la clasificación se considera muy efectiva y para 38 % el mecanismo se inhibe por completo. En el caso de la presa inactiva de Moa se puede asumir que no existe una clasificación granulométrica debido a los altos por ciento de sólidos acumulados.

Esto sugiere que, para un mismo material y granulometría, la variación de la relación sólido/agua puede tener profundos efectos en la distribución de permeabilidades y por lo tanto en la posición de la superficie freática.

Las colas producidas por el proceso HPAL históricamente ha tenido un alto por ciento de sólido en la cola, los registros acumulados muestran valores que oscilan entre 45 a 55 %.

Los residuos o colas contenidos dentro de la presa constituyen un elemento económico en riesgo, considerando la composición química y mineralógica de estos residuos que en futuros proyectos inversionistas pueden tener un alto interés industrial.

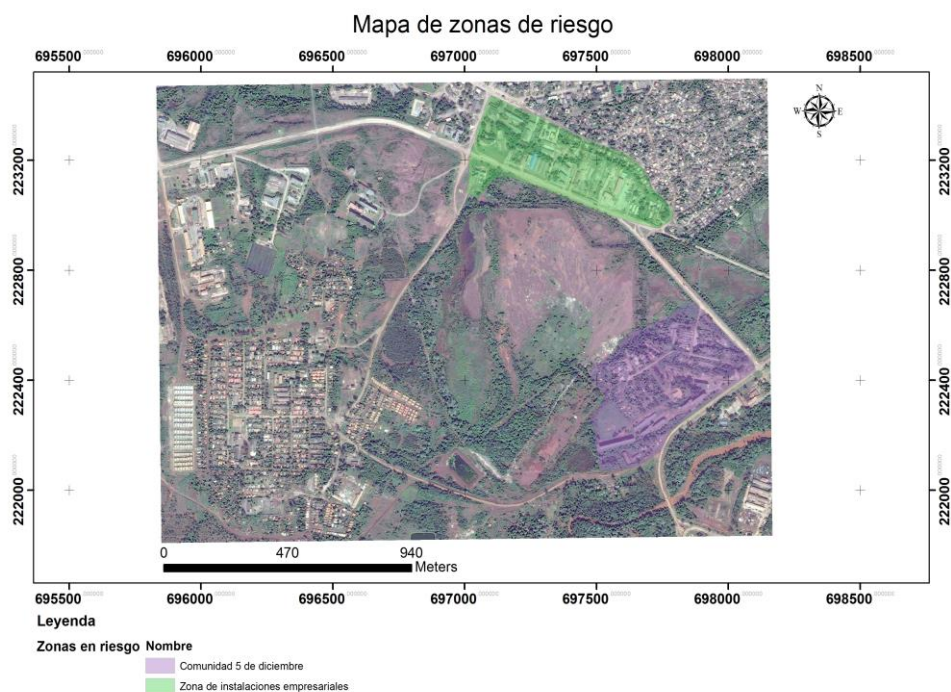


Figura 20. Mapa de ubicación de las instalaciones económicas en riesgo, por fallo de la presa.

Ambiental

Se analizó la susceptibilidad del medio ambiente ante la ocurrencia de fallos en la presa de colas, existiendo condiciones para la contaminación irreversible de las aguas y el suelo ante vertimientos de colas al medio, hoy la presa está convertida en un pasivo ambiental desde la década del setenta.

3.3. Análisis de los indicadores de riesgos por fallo según el trabajo de campo

Para la evaluación de las condiciones actuales de la obra se analizaron de forma general los siguientes indicadores de riesgos por fallos de la presa:

Hidrológicos

En los trabajos de campo se pudo identificar la ausencia de aliviaderos para el control de las aguas pluviales, lo que ha provocado procesos erosivos muy intensos, constituyendo peligros que amenazan la seguridad de la presa.

El manejo de las aguas dentro de la presa es de vital importancia en la estabilidad de la obra. Actualmente no se evidencia un manejo apropiado de las aguas en la presa, los sistemas de drenaje se encuentran obstruidos, provocando la infiltración de las aguas, e incidiendo en la estabilidad de la obra.

El escurrimiento de las aguas hacia la parte norte de la presa (Figura 21) ha provocado un incremento de la humedad del talud, generando deslizamientos. El arrastre de sedimentos ha incidido en el desplazamiento del espejo de agua hacia la parte norte del dique, creando la posibilidad de ocurrencia de sobrepaso por la disminución del borde libre; actualmente el área libre del dique hacia la parte norte alcanza aproximadamente 0,5 m. La acción del agua ha provocado un incremento de los niveles de humedad en toda la zona circundante y en algunos sectores el dique ha sido fracturado. La sobresaturación del dique y las cargas hídricas han incrementado la vulnerabilidad de este. Figura 22.



Figura 21. El escurrimiento de las aguas hacia el norte de la presa.



Figura 22. Presencia de agua en el pie del talud y erosión del talud.

Operaciones del drenaje

Las observaciones permitieron reconocer y examinar las obras para el drenaje de las aguas (Figura 23), en las inspecciones se evidencia la obstrucción de las redes de drenaje y además que al ocurrir períodos de lluvia el escurrimiento de las aguas se efectúa hacia las zonas del dique perimetral, y en mayor medida hacia la parte norte. Esta situación actual puede conllevar a la ocurrencia de sobrepaso o colapso del dique ante períodos prolongados o intensos de lluvias y por consiguiente la destrucción del dique perimetral.



Figura 23. Obstrucción de las redes de drenajes

Es bastante frecuente los fallos de estos conductos, lo que deriva en filtraciones de agua desde la tubería hacia las colas con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento, elevación del nivel freático; o bien la creación de una vía de escape para las colas de poca consistencia. Es práctica usual en la ingeniería de presas de embalse de materiales sueltos, el intentar evitar por todos los medios posibles la utilización de tuberías de descarga que atraviesen el relleno de cierre. Se sabe por experiencia, que las tuberías en si mismas y su contacto con los materiales de relleno son puntos débiles del cierre, en los que muy frecuentemente se originan procesos de tubificación. En el caso de las presas de colas, el problema no es tan agudo ya que la carga hidráulica se pierde en una longitud de flujo mayor, puesto que las mismas colas sirven como elemento de contención del agua. Es por ello que la práctica de instalar tuberías que atraviesen la presa sea más habitual que en presas de embalse. Sin embargo, esto no deja de ser peligroso, particularmente cuando no se cuidan los detalles de instalación.

Erosión y deslizamientos

El dique perimetral de la presa se encuentra afectado por los fenómenos de la erosión y deslizamientos. La presencia de cárcavas, surcos, grietas y el fenómeno de reptación evidencian la acción de los procesos erosivos. Además, se observa deslizamientos en la parte norte del dique. La intensidad de los procesos erosivos debilita la estabilidad de la presa e incrementan su vulnerabilidad.

La presencia de cárcavas (Figura 24) y de surcos evidencian la intensidad de los procesos a largo del dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa, generando un escenario de inseguridad bajo ante la acción de los diferentes peligros



Figura 24. Cárcava en el dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa.

Sismos

La infraestructura socioeconómica de la localidad de Moa en el pasado no contó con un archivo de almacenamiento de reportes históricos de la ocurrencia de fuertes terremotos.

Los registros más recientes tuvieron su epicentro al norte de La Española, los cuales fueron perceptibles en la ciudad de Moa. En el año 1944 se reportó un sismo con una intensidad máxima de 5.0 MSK en la ciudad de Sagua de Tánamo.

Los datos estadísticos de los sismos ocurridos en las zonas de monitoreo de la región oriental y en particular en Moa – Purial hasta el año 2014 reflejan que estas zonas han continuado activas.

Los movimientos sísmicos intensos unidos a diferentes factores como el agua, bajo nivel de conservación de los diques de contención y la erosión pueden ser elementos que contribuyen a la ocurrencia de fallo de la presa. El estado actual de los elementos que presenta la obra se considera deplorable con un alto grado de susceptibilidad ante la ocurrencia de un sismo. Los registros históricos reportan el efecto en el dique de la presa inactiva de Moa del terremoto ocurrido el 28 de diciembre de 1998, con una magnitud de 5.5 en la escala de MSK.

Actividad antrópica

En la parte sur de la presa se localiza parte de la traza de la red hidráulica municipal, que por desperfectos se encuentra vertiendo agua constantemente por la conductora de agua que se escurren hacia el norte de la presa. Este hecho ha provocado la rotura del dique incrementando el nivel de vulnerabilidad del mismo. Las aguas que son vertidas en el punto de descarga ubicado al norte y oeste del dique se utilizan para bañar animales y para el cultivo (Figura 25).



Figura 25. Dique roto por vertido de agua.

En la parte superior de la presa, hacia el sector este, existen construcciones de viviendas encima de la presa (Figura 26), pequeñas parcelas dedicadas al pastoreo de animales (Figura 27). En la parte baja del este del dique se ubica una zona pantanosa que es utilizada para el cultivo de arroz por los pobladores de la zona.



Figura 26. Viviendas ubicadas encima de la presa de colas inactiva de Moa.



Figura 29. Proceso de reptación, zona del dique norte.

3.4 Análisis de la vulnerabilidad sísmica de la presa

Según la nueva propuesta de norma para construcciones de obras sismorresistentes, la presa se encuentra en la Zona 3 de riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños en las construcciones.

Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo (S_a) oscilan entre 0,40 – 0,50 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,15 – 0,20 g para periodos

largos (S1). Los cálculos de estabilidad se realizaron sobre la base de esta norma, demostrándose el alto nivel de vulnerabilidad de la presa ante peligro sísmico.

Según el FS calculado se demostró que la presa de colas no es segura, haciéndose necesario implementar medidas de protección de taludes para aumentar el nivel de seguridad del talud.

3.5 Análisis de la vulnerabilidad hídrica de la presa

La presa se encuentra sobre una red hídrica que constituye una zona de descarga (Figura 30) de los acuíferos superiores, presencia de manantiales y de zonas pantanosas, existiendo un alto nivel de saturación que unido a los depósitos del Cuaternario donde fue construida la parte norte de la presa existencia un valle aluvial donde concurren paleoríos. Estas condiciones incrementan el grado de vulnerabilidad hídrica de la presa.

La vulnerabilidad física de la presa está comprometida por ser un pasivo minero ambiental, cuyo fallo provocaría daños a redes de comunicación y eléctricas.

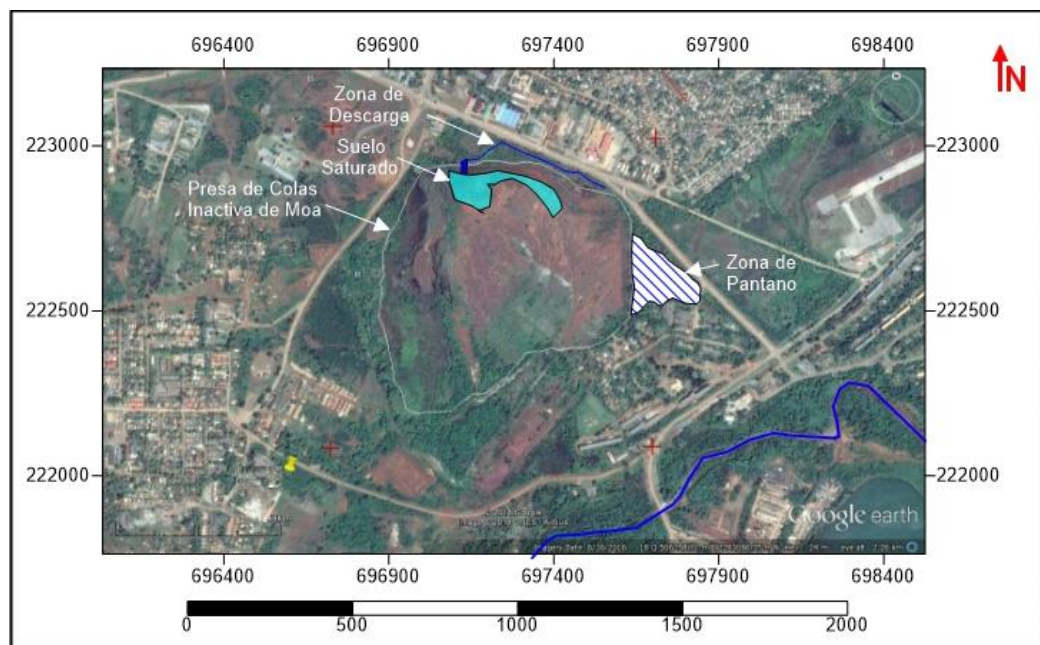


Figura 30. Mapa de ubicación de zonas de vulnerabilidad hídrica de la presa

Las temperaturas ambientales se comportan ligeramente superiores al promedio anual, a la coloración de las colas depositadas en la presa. Se clasifica con un nivel de vulnerabilidad media con un valor de 50%.

El aire y el agua tienen un nivel moderado de contaminación, ya que esta es una zona dónde el hombre ha trabajado, el aire se ve afectado por el arrastre de los polvos propios de los sedimentos de la presa, y en cuanto al agua, los informes de Hidroeconomía reflejan contaminación con sulfatos, por lo cual toma un valor de 50 % y un nivel de vulnerabilidad medio.

En cuanto a la deforestación se evalúa como medio, por lo tanto, a las condiciones ecológicas se le asignó un valor del 70 %.

Teniendo en cuenta el comportamiento de las variables características (Anexos 1 y 2) según el nivel de vulnerabilidad económica existente en la presa de colas, se define como:

El acceso que pueda tener el país a los activos económicos (tierra, infraestructuras, servicios, entre otros), que se reflejan en la capacidad para hacer frente a un desastre y está determinada, fundamentalmente, por el nivel de ingresos económicos 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.

3.6 Zonificación de la presa de colas inactiva de Moa para la evaluación de los riesgos ante el fallo generado por peligros naturales o antrópicos.

La presa tiene varios objetos de obra en todo su perímetro, por lo que es necesario definir una zonificación de los riesgos por fallos, la zonificación es el resultado del análisis de todos los factores que intervienen en el proceso de fallo de la presa de colas. Finalmente se realiza una zonación de la presa de colas, esto permite la evaluación de los riesgos en cada zona y definir los niveles de riesgos existentes. Las zonas se delimitan teniendo en cuenta los niveles de vulnerabilidad global de las mismas (Figura 31). Los peligros de origen natural son: erosión, deslizamientos y agrietamientos; el peligro antrópico analizado es el de fallo de las estructuras de obras de drenaje de la presa.

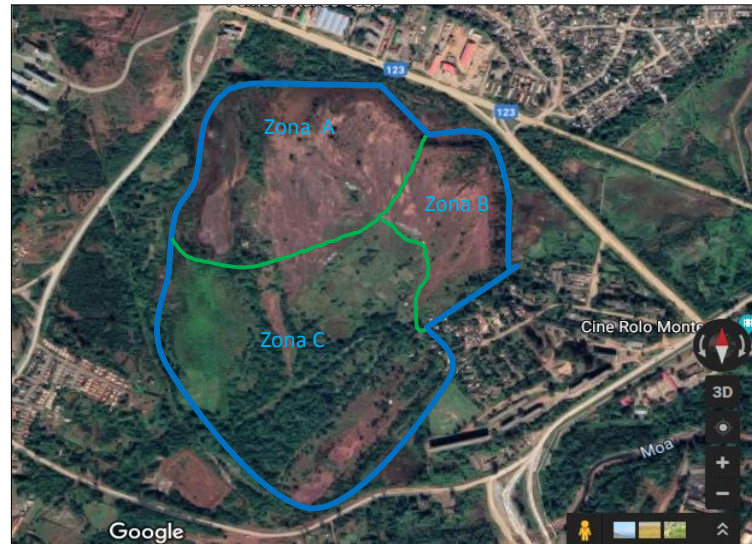


Figura 31. Mapa de la distribución del área de estudio por zonas.

3.7 Caracterización de los daños parciales

Zona A: los daños directos por peligros geotécnicos alcanzan valores significativos debido a los niveles constructivos a ser afectados ante las condiciones de inestabilidad que históricamente se han reportado. El drenaje natural superficial y subterráneo, unido a las intensas precipitaciones propician la erosión hídrica, laminar, en surcos y en cárcavas. La magnitud de la erosión de los taludes de la presa de colas es elevada, en forma de surcos y cárcavas de gran profundidad esta zona está altamente saturada además se evidencia el alto grado de erosión en cárcavas que cortan los estratos de la base de la presa de colas, en forma de erosión vertical que acelera el proceso de degradación del material que forman el talud. El arrastre de las aguas hacia el interior de la presa ha incrementado la vulnerabilidad, arriesgando la integridad física del dique de contención y la existencia de una amplia red de grietas de tracción que han generado la ocurrencia de varios deslizamientos, la erosión superficial y los agrietamientos son los peligros que mayores daños causan en la presa inactiva de colas, esta zona posee problemas con la estabilidad debido a la presencia de agua que se encuentra en el pie del talud sobre depósitos de colas poco consolidadas que conducen a grandes asentamientos, está altamente agrietados, además hay formación de cárcavas (Figuras 32, 33 y 34). Se distingue como de riesgo muy

alto por los peligros geotécnicos, con daños directos de los costos, los asentamientos, por la existencia de estratos muy inestables en la cimentación de la presa. La cercanía de este curso de agua ha socavado parte de la base del dique de esta zona, además de aportar humedad constante. Esta zona se califica como de riesgos muy altos.



Figura 32. Zona A altamente agrietada alrededor de toda esta área.



Figura 33. Diques de la zona A altamente agrietados.



Figura 34. Erosión en forma de cárcavas en el pie del talud en la zona A de la presa de colas inactiva de Moa.

Zona B: en esta parte de la presa se encuentra una zona pantanosa donde la vegetación es abundante, los estudios de estabilidad en esta zona son escasos producto a la existencia de tierras agrícolas en los límites pero existe la referencia de (Lezcano, 2018) donde demostró en el cálculo de la estabilidad que el talud (Zona B) es inestable, con un factor de seguridad de 0.84, las causas fundamentales que inducen a dicha inestabilidad se deben a: Alto nivel de saturación en la parte inferior, creándose una sobrecarga adicional sobre la base inferior del dique por la presencia de agua, existiendo evidencia de manantiales permanentes. Construcción de la presa sobre estratos débiles que se corresponden a depósitos del Cuaternario. Evidencias de procesos erosivos en el talud del dique (cárcavas, reptación y deslizamientos) hacia la parte noroeste.

Los taludes se encuentran expuestos a los agentes erosivos, por la falta de la aplicación de métodos para su protección. Este sector presenta problemas con el sistema de las operaciones de drenajes que están obstruidas, esto provoca altos niveles de humedad ante la rotura, unido la existencia de vulnerabilidades altas por la existencia de viviendas muy cercanas a distancia menores de 100 m, inducen a la toma de medidas de prevención y mitigación que logren disminuir los daños ante la posible ocurrencia de un desastre. Obstrucción de obras de drenaje que indujeron a la pérdida del borde libre de la zona B de la presa que pudiera provocar el sobrepaso.

Zona C: teniendo en cuenta las características del relieve del área perteneciente, a la comunidad 5 de Diciembre que limita con la zona C y la comunidad de Armando Mestre una

zona baja con la existencia de viviendas y tierras agrícolas , la probabilidad de ser afectada ante la ocurrencia de un fallo de los diques de la presa es alta, puesto que se encuentran en peligro una parte de la población de la Comunidad 5 Diciembre que se encuentra situada sobre un dique de la presa, ante esta situación se hacen cálculos aproximados de los desplazamientos de las colas ante el colapso de esta zona. Se debe prestar especial interés a la zona C donde la erosión superficial es evidente, los trabajos de protección de los taludes deben iniciarse por este sector como medida de prevención ante estos peligros.

3.8 Caracterización de los daños directos. Resultados de la evaluación o análisis cuantitativo de los riesgos por fallos.

Los análisis de las afectaciones se realizan sobre los daños máximos que pueden ocurrir en cada zona de la presa de colas, los cuales se describen a continuación:

ZONA A

En la zona A se hizo la evaluación cuantitativa de los daños directos que pueden ocurrir sobre las instalaciones y asentamientos poblacionales según los grupos de peligros que se identificaron en la presa de colas que representan valores significativos debido a los niveles de deterioro y condiciones físicas desfavorables de inestabilidad de la presa a ser afectados ante los peligros naturales o antrópicos. Ver Anexo 7.

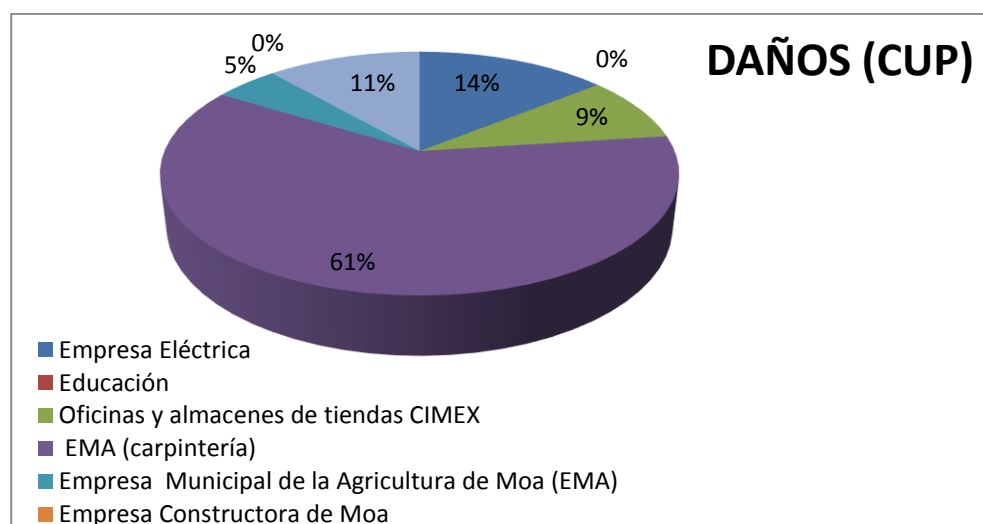


Figura 35. Daños económicos de las instalaciones que se encuentran alrededor de la presa colas inactiva de Moa ante su colapso.

Las instalaciones más afectadas son: la Carpintería de la EMA que alcanzan daños de un 61 % de los daños económicos ante el fallo de la presa y la Empresa eléctrica con un 14% de los daños económicos de la instalación. (Figura 35).

En la evaluación cuantitativa del porcentaje de los costos de las instalaciones que pueden ser afectadas según los daños que puede ocasionar el colapso de la presa inactiva de Moa se obtuvieron como resultado que la empresa eléctrica que se encuentra ubicada en la parte norte de la presa representa a una pérdida económica de 72582.208 CUP y la empresa Municipal de la Agricultura de Moa (EMA) dañificada económicamente en 24379.365 CUP.

Los daños por el grupo de peligro de cada instalación se demuestran en el Anexo 9.

ZONA B

Esta zona comprende la comunidad 5 de diciembre donde hay construcciones de viviendas encima de los diques de la presa por lo que los daños fueron evaluados por los grupos de peligros que se encuentran presente en la presa, y se demostró que la erosión superficial es uno de los peligros que más afecta esta zona teniendo el nivel más alto de los peligros representado por 39% de ellos, esta zona presenta un nivel de riesgo medio lo que es equivalente al 40% de riesgo, y ante el fallo de la presa puede ser dañadas las viviendas que trae como consecuencias pérdidas económicas. Ver Figura 36 y Anexo 7.

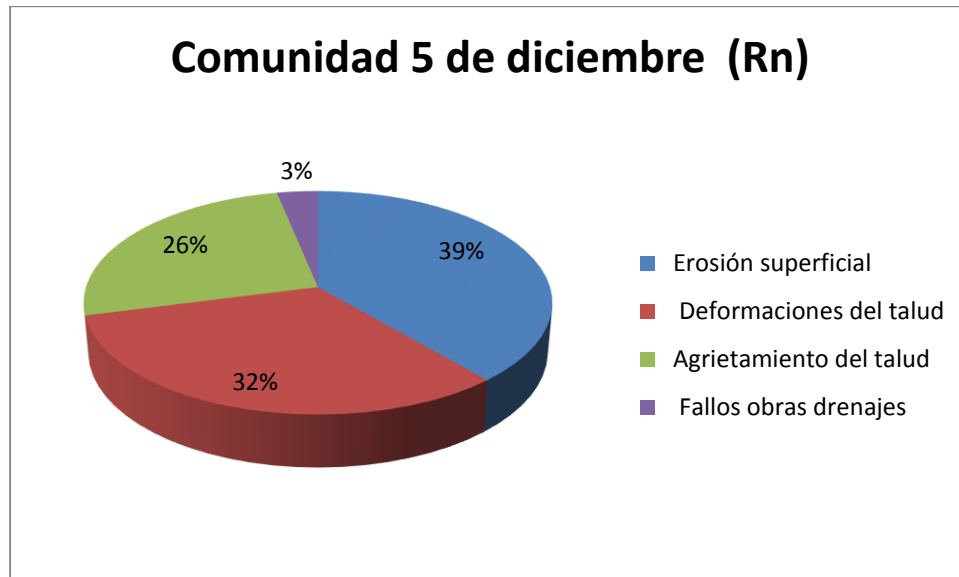


Figura 36. Por ciento de los daños por grupos de peligros.

ZONA C

Esta zona limita con la comunidad 5 de diciembre, la comunidad de Armando Mestre una tierras agrícolas, la probabilidad de ser afectada ante la ocurrencia de un fallo de los diques de la presa es alta, puesto que se encuentran en peligro una parte de la población de la Comunidad 5 Diciembre que se encuentra situada sobre un dique de la presa, con la evaluación de los riesgos por los grupos de peligros se demostró que la erosión superficial es el peligro que más afecta esta zona con un 37% daños, el nivel de riesgo de esta zona es medio.

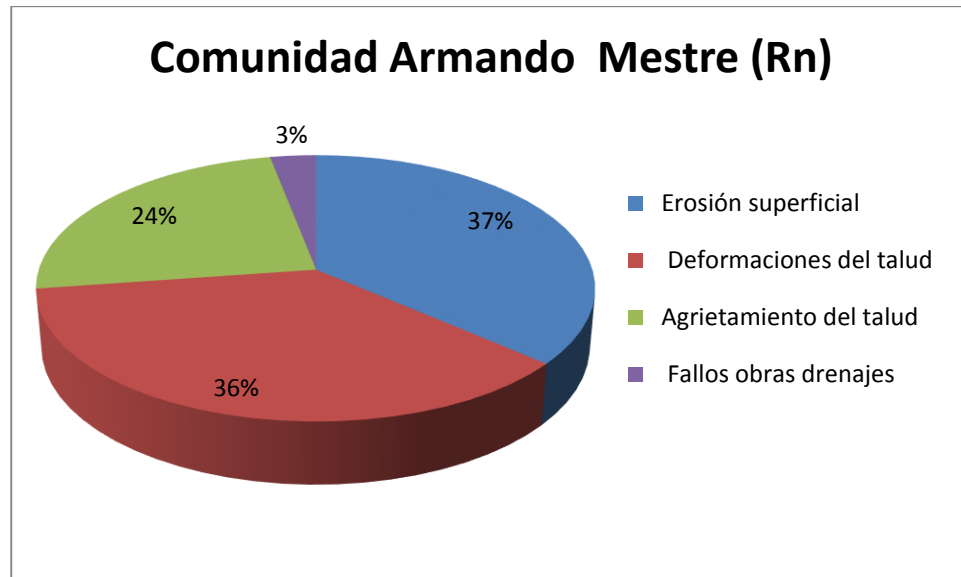


Figura 37. Por ciento de los daños por los grupos de peligros.

3.8.1 Cálculo de los riesgos totales por grupo de peligros

Los riesgos se calculan teniendo en cuenta el análisis de los peligros, el índice de riesgos, la probabilidad de ocurrencia de los peligros, los costos de los elementos en riesgo y la distancia peligrosa a que se encuentran los diferentes elementos. Los resultados finales muestran en la Figura 38.

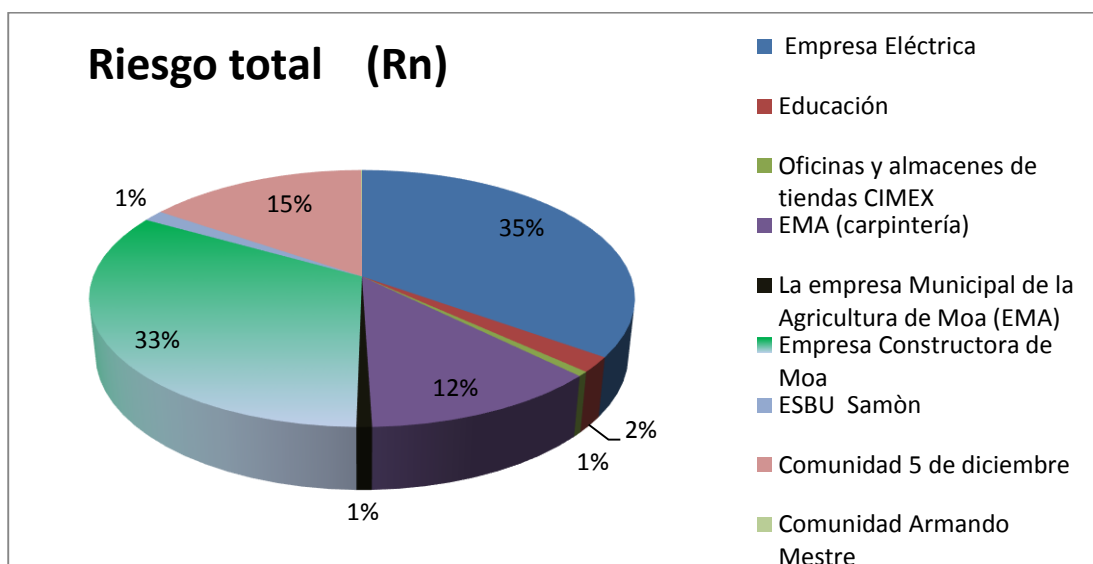


Figura 38

La empresa eléctrica municipal se encuentra a escasa distancia de la presa de colas, además de existir una rotura del dique en esta misma zona, siendo esta instalación la más vulnerable ante el fallo de la presa, alcanzando la probabilidad de un 33 % de daños económicos, la empresa de la construcción tiene el 33 % del costo de su entidad en riesgo, así como el resto de las instalaciones.

3.8.2 Medidas de prevención, mitigación o corrección de impactos

La evaluación de los daños directos en la presa de colas demuestra la necesidad de implementar un plan de medidas de prevención y mitigación de riesgos, los peligros geotécnicos y operacionales deben ser enfrentados con soluciones inmediatas. Las prácticas de incrementar las capacidades de almacenaje de la presa de colas como estrategia fundamental, acelera los procesos que conducen a una mayor vulnerabilidad de la obra ante la acción de los diferentes peligros. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Medidas para la reducción, mitigación o corrección de impactos ante la ocurrencia de fallos.

No.	Medidas de prevención, mitigación o corrección de impactos
1	Definir el cierre y post cierre de la presa de colas como un proyecto.
2	Mantener la inspección visual y el monitoreo instrumental.
3	Construir un muro perimetral al pie de la presa como barrera para desviar las colas liberadas hacia el sector este de la presa.
4	Construir un cercado perimetral en la presa de colas.
5	Recuperar las tuberías de drenaje que están obstruidas por los sedimentos

6	La Dirección de Planificación Física de Moa debe gestionar la retirada de las viviendas construidas dentro del vaso de la presa
7	Realizar un proceso de capacitación de los ciudadanos de las comunidades cercanas y los trabajadores del sector empresarial que se encuentran en riesgo de existir una liberación de las colas
8	Diseñar un Plan de Gestión de Riesgos detallado que sea controlado y supervisado por el Centro de Gestión de Riesgos Municipal
9	Realizar un sistema de difusión periódico que actúe sobre la disminución de la vulnerabilidad de las comunidades y el sector empresarial.
10	Establecer sistemas de monitoreo de las pequeñas grietas que se produzcan
11	Realizar reparaciones de taludes agrietados o con deslizamientos
12	Reconstruir los sectores colapsados de la presa de colas
13	Gestionar la reparación de la avería de la tubería del acueducto que daña la estructura del dique
14	Cambiar el área de descarga de las colas hacia otro sector
15	Realizar canalizaciones interiores para encauzar las aguas del escurrimiento.
16	Aplicación de métodos de protección vegetal, mecánico, químico y mixto.

17	Realizar perforaciones para realizar estudios geotécnicos
18	Construir muros de contención para desviar las colas hacia zonas menos vulnerables
19	Situar señales de aviso e informativas de los peligros existentes
20	Realizar simulacros de averías
21	Realizar ajustes al diseño del proyecto

Conclusiones parciales

1. La zonificación de los riesgos en la presa permitió evaluar lo siguiente:
 - La zona A posee un nivel muy alto de riesgos, producto al agrietamiento, erosión y destrucción parcial del dique.
 - La zona B califica con muy alto nivel de riesgo producto a la presencia de sectores muy inestables en el dique y por la obstrucción de las obras de drenaje.
 - Zona C su riesgo es medio debido a bajos niveles de erosión.
2. Los mayores daños económicos se centran en las zonas A y B por la existencia de varias empresas estatales y asentamientos poblacionales.
3. Se realiza la propuesta de medidas de reducción, mitigación o corrección de impactos ante la posible ocurrencia de fallos de la presa de colas.

CONCLUSIONES

1. La caracterización de las condiciones geológicas del área de estudio de la presa de colas inactiva de Moa demostró que la obra posee una alta vulnerabilidad física, debido a: los suelos de cimentación de la presa están constituidos por estratos inestables, areno arcillosos de humedad y plasticidad de media a alta y pertenecientes a los depósitos del Cuaternario, existencia de un alto nivel de agrietamientos, deslizamientos, erosión y destrucción parcial del dique perimetral.
2. La determinación de los indicadores de fallos en las presas de colas son: sobrepaso, deslizamientos y erosión; y los elementos que se encuentran en riesgo, como las instalaciones económicas la población, el medio ambiente y los residuos almacenados en la presa.
3. La zonificación de la presa de colas inactiva de Moa de los riesgos ante fallos por naturales o antrópicos demostró que: las zonas A y B de la presa presentan un riesgo muy alto, asociados con los altos niveles de inestabilidad existentes y los daños a instalaciones como a las Empresas Eléctrica y de la Construcción que alcanzan el 35 y 33 % respectivamente, el resto de las entidades son impactadas en menor grado debido a ser menos vulnerables. Se proponen medidas que garantizan la prevención, mitigación o corrección de impactos generados ante fallos de la presa de colas .

RECOMENDACIONES

1. Actualizar al Centro de Gestión y Reducción de Riesgos sobre el alto riesgo de la presa de colas inactiva de Moa para la economía, las comunidades cercanas y el medio ambiente.
2. Informar los resultados de esta investigación a la dirección de Cubaníquel, la Oficina Nacional de Recursos Minerales, el CITMA y la Oficina de Planificación Física.
3. Integrar los resultados de la investigación en el proyecto de la Tarea Vida.

BIBLIOGRAFÍA

- ALARCÓN, J., y BARRERA, S.(2003). "Dams of great height, a challenge". *Symposium of Tailings, ICOLD*. Montreal.
- ALONSO, E. (2001). "Caracterización de los efluentes de las empresas niquelíferas cubanas". *Congreso Cubano de Geología y Minería*. La Habana, Libro de resúmenes, Memorias I, 10-11.
- ALONSO, E.E. y GENS, A. (2006). Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. *Géotechnique* 56(3):185–201.
- ANGELI M.G., et. al. (1996). "Long-term monitoring and remedial measures in a coastal landslide (Central Italy)". *Proceedings of the seventh International Symposium on landslides. Trondheim*, 1497-1502.
- ARANGO, E. et. al. (2009). "Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo oriental de Cuba. *Acta GGM Debrecina*. Vol 4, p. 43-52.
- ARIOZA, J.D. (2002). Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-CO en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. *Revista de Minería y Geología*. Nos.1-2.
- ASOCIACIÓN DE MINERÍA DE CANADÁ (2000). *Elaboración de un manual de operación, mantenimiento y vigilancia para las instalaciones de gestión de relaves y recursos hídricos*.

- BARRERA S. y LARA J. (1998). Geotechnical Characterization of Cycloned Sands for the Seismic Design of Tailings Deposits. *3rd International Congress on Environmental Geotechnics*. Lisboa.
- BLIGHT, G. (1987). "Erosion of the slopes of gold tailings dams". *Geotechnical practice for waste disposal '87*, R. Woods (ed.), Geotech. Spec. Pub. No. 13, ASCE.
- BLIGHT, G.E. y FOURIE, A.B. (2003). A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. Int. *Workshop On Occurrence And Mechanisms Of Flow In Natural Slopes And Earthfills*, Sorrento, Italia.
- BLIGHT, G. E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailing beaches. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 107, 27-40.
- BRENNAN, B. y GUTIERREZ, V. (2011). *Guía para elaborar la estrategia de la comunicación de riesgos*. OPS/OMS. Washington, DC, EEUU.
- CARMÉNATE, J.A. y RIVERÓN, A.B. (1999). "Zonificación de los fenómenos geológicos que generan peligros y riesgos en la ciudad de Moa". *Minería y Geología*, 24 (2): 21-31.
- CARRARA, A. (1983). "Multivariate models for landslide hazard evaluation". *Mathematical Geology*, 15(3): 403-427.
- CARRARA, A. (1983). "Multivariate models for landslide hazard evaluation". *Mathematical Geology*. Vol. 15 (3): 403-427.
- CHANDLER, R. J. y TOSATTI, G. (1995). The Stava dams failure, Italy, July, 1985. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 113: 67-79

- CHUY, T., 1999. *“Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación Sísmica”*. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y CENAI. 150 p.
- CUBA. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE CUBA. *Decreto Ley No. 170. “Del Sistema de medidas de defensa civil”*. La Habana, 19 de Mayo, 1997. Año XCV. Número 16.
- CUBA. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE CUBA. *Decreto Ley No.262 “Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa”*. La Habana, 14-05-1999.
- DACY, D.C., and KUNREUTHER, H. (1969). *“The Economics of Natural Disasters: Implications for Federal Policy”*. New York: The Free Press.
- EMDCN. (2010). *“Directiva No. 1 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional, para la Planificación, Organización y Preparación del País para las Situaciones de Desastres”*. Consejo de Defensa Nacional, Ciudad de la Habana, Cuba.
- EMDCN. (2012). *“Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres”*, Cuba.
- EMDCN.(2010). *“Directiva No. 1 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional, para la Planificación, Organización y Preparación del País para las Situaciones de Desastres”*. Consejo de Defensa Nacional, Ciudad de la Habana, Cuba.

- EMDCN.(2012). "*Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres*", Cuba.
- EMNDC. (2005). "*Guía para la realización de estudios de riesgo para situaciones de desastres*", EMNDC, La Habana.
- EMNDC. (2010). "*Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres*".
- EMNDC.(2005). "*Guía para la realización de estudios de riesgo para situaciones de desastres*", EMNDC, La Habana.
- EMNDC.(2010). "*Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres*".
- ESPINACE, R. (2008). "Normativa y tecnologías innovadoras aplicadas a los depósitos de relaves. *Simposio Internacional Ciencia y Tecnología: Rol estratégico de la gestión tecnológica del cierre de faenas mineras para alcanzar una minería sustentable en la región de Atacama*". Universidad de Atacama.
- FELL, R. (1997). "Landslide risk management. Landslide risk assessment". *Cruden and Fell (eds)*. Balkema: Rotterdam, 51-109.
- FELL, R.(1997). "*Landslide risk management. Landslide risk assessment*". *Cruden and Fell (eds)*. Balkema: Rotterdam, 51-109.
- FONSECA, E.; ZELEPUGIN V.N. y HEREDIA M. (1985). Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19: 321-329.

- FONSECA, R., 2004. “Uso del Vetiver grass para la rehabilitación de sitios mineros en Chile: Resultados Preliminares”. (ed) Antonio Rabat Sur 6165. Santiago de Chile: Fundación Chile.
- FOURIE, A.B., BLIGHT, G.E. y PAPAGEORGIOU, G., 2001. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 707–719.
- FOURIE, A.B., et. al. (2003). “Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure”. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 707-719
- GRAY D.H. et. al. (1996). “*Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization .A practical guide for soil erosion control*”. John Wiley and Sons, 378 p.
- GREEN, D. (2001). “*Forestación de depósitos de relave abandonados presentación de caso: Depósito de relave ácido en alta montaña zona central de Chile*”. Santiago, Universidad de Chile. 156 p.
- GUARDADO, R. y CARMÉNATE, J. (1996). “Evaluación ingeniero geológica de las áreas con peligros y riesgos geoambientales de la ciudad de Moa. *Minería y Geología* 12(2):45-55.
- GUARDADO, R. y CARMÉNATE, J. (1996). “Evaluación ingeniero geológica de las áreas con peligros y riesgos geoambientales de la ciudad de Moa. *Minería y Geología* 12(2): 45-55.
- GUARDADO, R. y RIVERÓN, A.B. (1997). “Evaluación ingeniero geológica del territorio de Moa con fines de microzonación sísmica”. *Minería y Geología*, 41(2): 48.

- *Guide to the Management of Tailings Facilities* (MAC 1998). Canada, 1998.
- HARDER, L.F. y STEWART, J.P. (1996). Failure of Tapo Canyon Tailings Dam. *J. of Performance of Constructed Facilities*. ASCE, 10(3): 109-114.
- HERNÁNDEZ, T. (2015). " *Sistema de gestión de riesgos por fallos en la presa de colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba*".
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2010) " *Funcionamiento y mecanismos de rotura en la presa de colas de la empresa Cdte. Pedro Sotto Alba*, Reporte Técnico, Moa, Cuba.
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2010). "Rehabilitación de las presas de colas de la mina Moa Nickel SA, como medio de estabilización de taludes y de cierres de minas". *Memorias del III Simposio Internacional Restauración Ecológica*. Santa Clara, Cuba. Septiembre 13-19, ISBN 978-959-250-600-8.
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2011). " *Aplicación de la Bioingeniería al cierre de la presa de colas de la ECPSA*", Proyecto de cierre, Moa, Cuba.
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2012). " *Empleo de la Vetiveria Zizanoides para el control de la erosión en la presa de colas de la ECPSA*", Proyecto de cierre.
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2014). "Gestión de Riesgos por Deslizamientos en la presa de colas de la ECPSA. *I Simposio de Minería y Medio Ambiente*, Moa, Cuba.
- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2014). "Gestión de riesgos por deslizamientos en presas de colas". *IV Congreso de desastres*, Habana, Cuba.

- HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. 2014. “La bioingeniería en la estabilización de presas de colas de la industria minero metalúrgica en Cuba”. *Revista Minería y Geología*, 30(4).
- HERNÁNDEZ, T. y ULLOA, M. (2014). “Impacto ambiental de la ampliación de una presa de colas de la industria cubana del níquel”. *Revista Minería y Geología*, 30 (3).
- HERNÁNDEZ, T., y GUARDADO, R. (2010) “Aplicación de la Bioingeniería al Control de la Erosión y la Sedimentación”. *Memorias del III Simposio Internacional Restauración Ecológica*. Santa Clara, Cuba. Septiembre 13-19, ISBN 978- 959-250-600-8.
- HORTELANO, A. y CASAS, A. (2003). “*Presas y patrimonio. Situación legal y práctica*”, (ed) Barcett y Olloth, España, 23-36.

ANEXOS

Anexo1. Resumen de la clasificación cualitativa de los peligros agrupados por zonas

Grupo de eventos	A	B	C
Naturales			
Erosión superficial	Alto	Medio	Medio
Deslizamientos	Alto	Medio	Medio
Agrietamientos	Muy Alto	Alto	Alto
Fallos por sismos	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Tecnológicos			
Fallos de las obras de drenajes	Muy Alto	Alto	Alto

Anexo 2. Matriz de eventos generadores de fallos en la presa de colas.

Eventos primarios		Eventos secundarios		Factores	Eventos terciarios	
Tipo	Nombre	Tipo	Nombre		Tipo	Nombre
Meteorológico	Huracanes, frentes fríos	Meteorológico	Lluvias intensas	Uso de los suelos Litología Altura NF Relieve Zona crítica Drenaje	Hidrológico Ingeniero geológico	Inundaciones, erosión hídrica, deslizamientos y flujos de colas
		Hidrológico	Inundaciones	Uso de los suelos Litología Relieve Morfometría Estructura	Ingeniero geológico	erosión hídrica y reptación
				Red eléctrica Vía de comunicaciones	Operacional	Interrupción bombeo lodos y agua acida recuperada

	Tormentas locales severas	Meteorológico	Intensas Lluvias y vientos	Uso de los suelos Litología Relieve Morfometria	Ingeniero geológico	erosión hídrica, flujos de colas y deslizamientos
				Red eléctrica	Operacional	Interrupción del bombeo de las colas y agua acida recuperada
Operacional planta	Desbordes del embalse de las colas o el aliviadero	Operación	Derrames	Litología Morfometria Estructura	Ingeniero geológico	Erosión, flujos locales y deslizamientos y fallos de diques.
	Obstrucción de tuberías de colas	Operación		Litología Morfometria Estructura	Ingeniero geológico	Erosión , flujos locales ,deslizamientos y fallos de diques
				Litología Morfometria Estructura	Ingeniero geológico	erosión hídrica, flujos locales de agua ácida recuperada
Operacional extremos	Rotura del dique	Operación	Avalanchas de aguas	Litología Morfometria Estructura	Ingeniero geológico	erosión hídrica, flujos de suelos
	Accidentes terrestres		Roturas de diques			flujos locales de colas y suelos
	Accidentes aéreos					Flujos masivos de colas y suelos

Anexo 3. Matriz de peligro y vulnerabilidad para determinar el Índice de Riesgo (IR)

Niveles de peligro y vulnerabilidad.	Vulnerabilidad baja o muy baja.	Vulnerabilidad media.	Vulnerabilidad alta.	Vulnerabilidad muy alta.
Peligro muy alto.	Riesgo alto.	Riesgo alto.	Riesgo muy alto.	Riesgo muy alto.
Peligro alto.	Riesgo medio.	Riesgo medio.	Riesgo alto.	Riesgo muy alto.
Peligro medio.	Riesgo bajo.	Riesgo medio.	Riesgo medio.	Riesgo alto.
Peligro bajo o muy bajo.	Riesgo bajo.	Riesgo bajo.	Riesgo medio.	Riesgo alto.

Donde:

- Riesgo muy alto (IR-76% al 100%)
- Riesgo alto (IR- 51% al 75%)
- Riesgo medio (IR- 26% al 50%)
- Riesgo bajo (IR< 35%)

Anexo 4. Nivel cualitativo de los riesgos por zonas

Grupo de eventos	A	B	C
Naturales			
Erosión superficial	Alto	Medio	Medio
Deslizamientos	Alto	Medio	Medio
Agrietamientos	Muy Alto	Alto	Alto
Fallos por sismos	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Tecnológicos			
Fallos de las obras	Muy Alto	Alto	Alto

Anexo 5. Nivel cuantitativo de los riesgos (IR) por zonas

Grupo de eventos	A	B	C
Naturales			
Erosión superficial	75%	40%	30%
Deslizamientos	90%	40%	30%
Agrietamientos	95%	55%	51%
Fallos por sismos	85%	85%	76%
Tecnológicos			
Fallos por obras de	90%	75%	55%

Anexo 6. Valores de la probabilidad anual de ocurrencia (p) de los eventos peligrosos sobre la presa de colas.

Grupo de peligros	Probabilidad ocurrencia	Probabilidad anual
	T (años)	$p=1/T$
Erosión superficial	8	0.12
Deformaciones del talud	10	0.1
Agrietamiento del talud	12	0.08
Sismos	100	0.01
Fallos obras drenajes	85	0.01

Anexo 7. Porciento de los costos de las instalaciones pueden ser afectadas según los daños que puede ocasionar el colapso de la presa inactiva de Moa.

Instalaciones	Costos (CUP)	% de daños físicos	Daños ocasionados (CUP)
Empresa Eléctrica	181455.52	40%	72582.208
Educación	129750.00	80%	103.800
Oficinas y almacenes de tiendas CIMEX	63785.37	70%	44649.759
EMA (carpintería)	388989.32	80%	311191.456
La empresa Municipal de la Agricultura de Moa (EMA)	81264,55	30%	24379.365
Empresa Constructora de Moa	896741.40	50%	448370.7

ESBU Samòn	97675.82	60%	58605.492
Total			959882.78

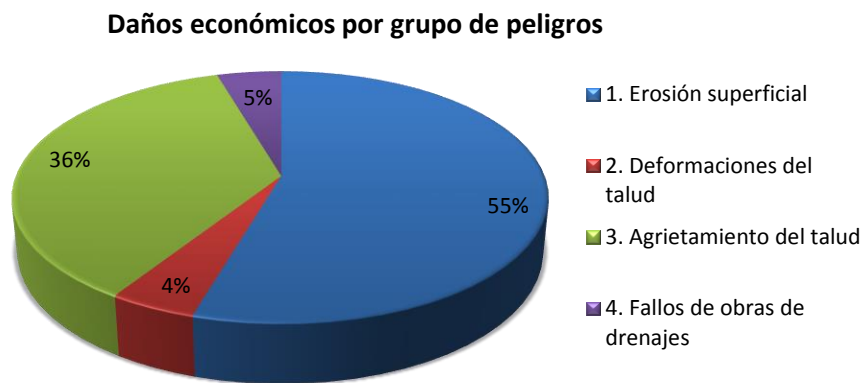
Anexo 8. Evaluación cuantitativa de los riesgos económicos anuales por cada zona de la presa inactiva de cola de Moa.

Zonas	Grupo de peligros	Instalaciones por zonas	Índice de riesgos (IR)	Probabilidad anual p=1/T	Costos de los elementos en riesgo, en USD (Ce / 100)	Rn (daños)
A	1. Erosión superficial	Empresa Eléctrica	10.00		181455.52	217746.624
						1814.5552
						1451.64416
						181.45552
	2. Deformaciones del talud	Educación	30.00		129750.00	4671
						3892.5
						3114
						389.25
	3. Agrietamiento del talud	Oficinas y almacenes de tiendas CIMEX	25.00		63785.37	1913.5611
						1594.63425
						1275.7074
						159.463425
	4. Fallos obras drenajes	EMA (carpintería)	75.00		388989.32	35009.037
						35009.0388
						3827.1222
						2917.4199
		La empresa Municipal de la Agricultura de Moa (EMA)	30.00		81264.55	292.4838
						2437.9365
						1950.3492
						243.79365
	Empresa Constructora de Moa	75.00	896741.40	80706.726		
				67255.605		
				53804.502		
				6725.5605		

		ESBU Samòn	30.00		97675.82	3516.32952
						2930.2746
						2344.21968
						293.02746
B		Comunidad 5 de	90.00		348000	37584
		diciembre				31320
						25056
						3132
C		Comunidad Armando	30.00		4176	150.336
		Mestre				150.336
						100.224
						12.528

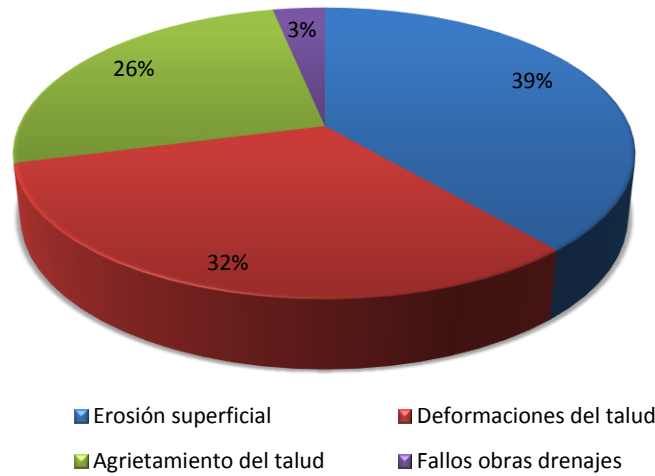
Anexo 9. Daños económicos por tipos de peligros en cada zona

ZONA A



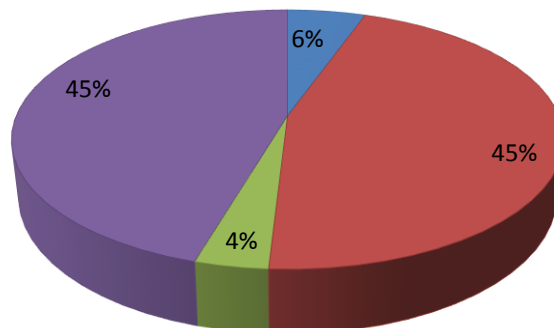
Instalación .Empresa eléctrica (Rn)

Sectorial de Educación

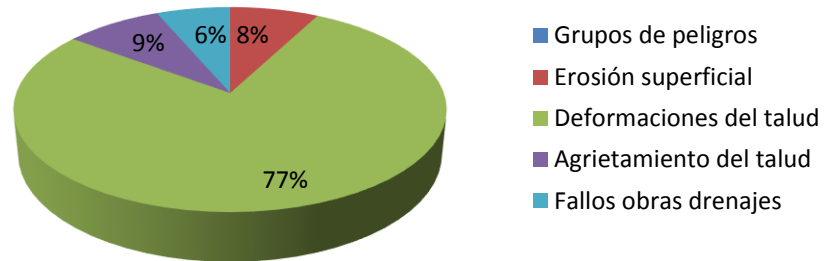


CIMEX

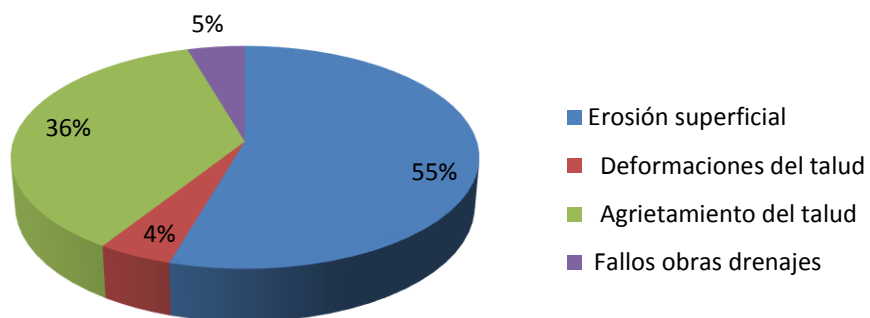
- Grupos de peligros
- Erosión superficial
- Deformaciones del talud
- Agrietamiento del talud
- Fallos obras drenajes

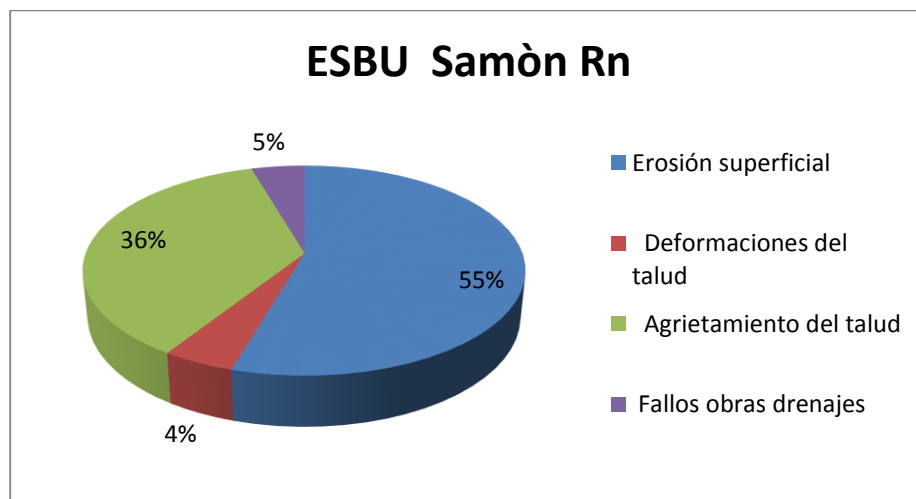
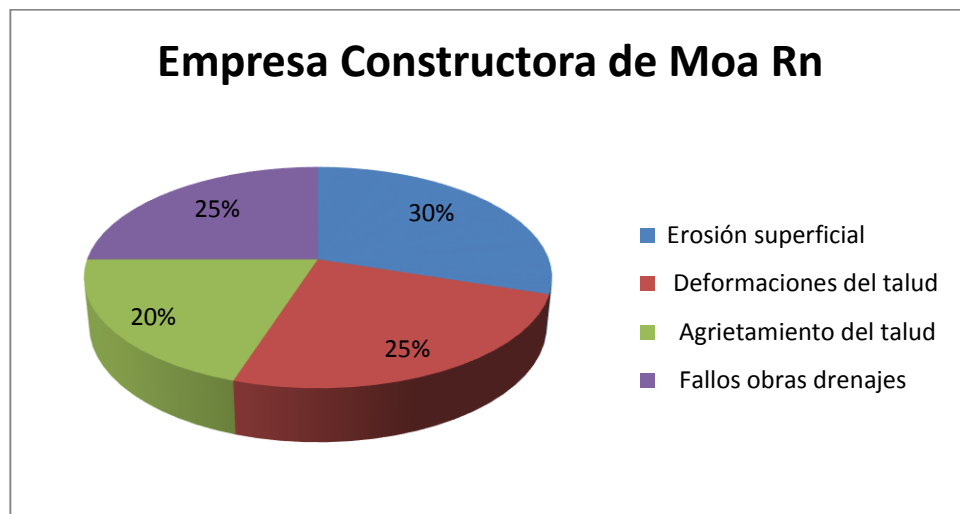
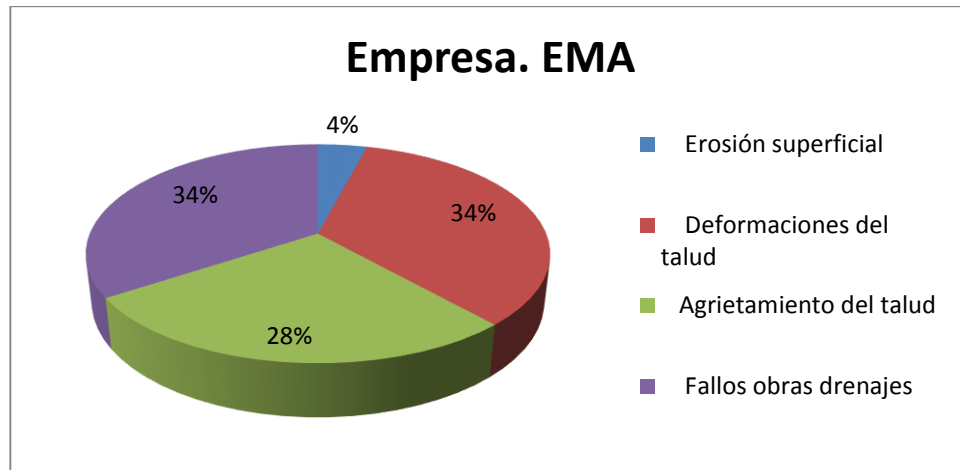


Instalación EMA (carpintería) Rn

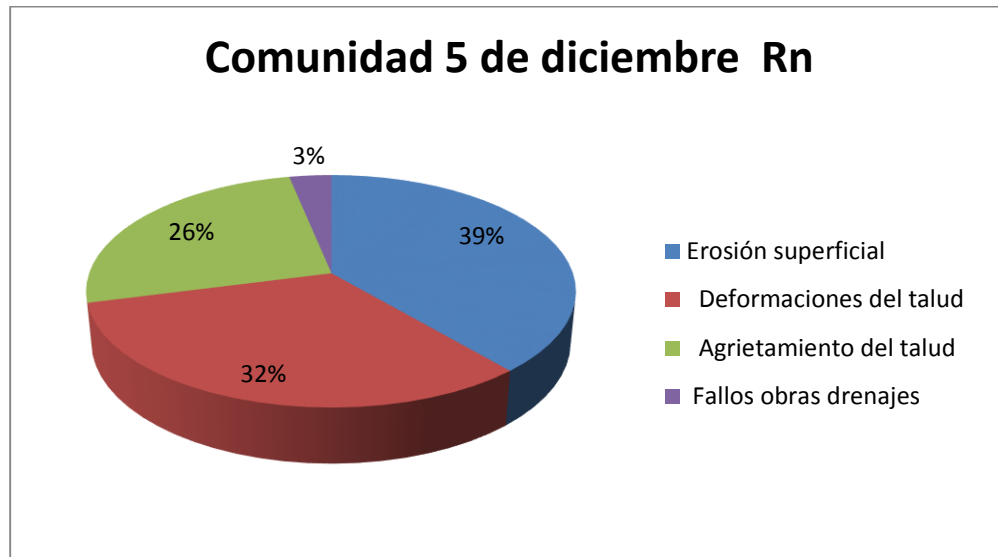


ESBU Samòn Rn





ZONA B



ZONA C

