

# Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Geólogo

**Título: Propuesta de modelación de escenarios de  
seguridad para la presa de colas de la Empresa  
Comandante Pedro Sotto Alba.**

**Diplomante:**

Raquel Vinardell Peña

**Tutor (es):**

Dr. Rafael Guardado Lacaba

Dra. Tereza Hernández Columbié

Moa, 2016



## **Agradecimientos**

Gracias a la vida, a las energías del universo que permitieron que cada detalle se alineara para darme la oportunidad de existir y ser quien he podido ser.

A mis padres. Por ser las personas que más me quieren en esta vida, el amor más desinteresado viene de ellos y son ellos quienes más sanamente, con más orgullo y desde lo profundo de su alma disfrutan mis éxitos y me dan ánimos cuando las cosas no van del todo bien, porque saben que a ellos les debo la persona que soy todo lo buena que haya podido ser en estos 22 años de vida.

A mi papá, porque ha estado a mi lado siempre, por ser el mejor del mundo, por pasar juntos tantas cosas buenas y otras difíciles, por esforzarse en estar aún más presente cuando nos quedamos solos y yo era una niña, por todo lo que me ha enseñado, a disfrutar lo que hago, a esforzarme por ser buena en todos los aspectos, y preocuparme por aprender, que es lo más importante y lo que nadie te puede quitar, y esperar que todo lo demás venga solo.

A mi mamá porque las cosas no han sido fáciles para ella y entre todos los problemas siempre ha estado pensando en mí, siempre con una sonrisa, y aunque no hemos estado juntas todo el tiempo que quisiéramos es la mejor madre que hay y la mujer más fuerte que conozco, y no pido no quiero ni necesito otra.

A mis hermanos, William, Juan Carlos y Susy, porque son unos amores conmigo y sé que cada uno se preocupa por mí a su manera y me quieren también a su manera.

A todos los profesores que me dieron clases durante estos 5 años de carrera, porque de cada uno aprendí, y a todos los admiro, desde los más jóvenes hasta los de mayor experiencia, porque la vida te enseña que de todos se aprenden cosas buenas.

Al profesor Guardado por confiar en mí para el desarrollo de esta tesis, por darme el honor de ser mi tutor.

A Tereza, por encontrar siempre tiempo en su trabajo para atenderme entre otras tantas responsabilidades, por poner tanto empeño en la calidad de este trabajo, por permitirme aprender de ella.

Al profesor Urra por todo su apoyo.

A mis compañeros durante estos 5 años, y a los que por distintos motivos no llegaron hasta el final, pero igual los recuerdo, porque sé que nada sucede por casualidad y la vida nos hizo coincidir, tantas historias diferentes las de cada uno, pero siempre tendremos en común estos años.

A ellos, porque me enseñaron a amar lo diverso, a respetar los gustos individuales, a admirar lo bello en cada persona, a valorar todas las opiniones, y sobre todo a aceptar a las personas como son, aun cuando no las comprenda, porque eso sólo se aprende conviviendo durante tanto tiempo como lo hicimos nosotros, y creo que todos crecimos juntos, desde aquella vez que decidimos ver una película juntos para fomentar la unión y tardamos 10 minutos en ponernos de acuerdo hasta hoy. Gracias por los recuerdos que hemos construido juntos.

En especial a: Carlos René, mi novio, por toda la paciencia, el amor, por todo el apoyo, por decirme la verdad y no lo que yo quiero oír, por ser mi amigo.

A Daylen, porque desde primer año conectamos y leí que cuando una amistad dura 8 años ya es para toda la vida, y la nuestra no es perfecta, pero me parece que sí ha durado tanto es porque es buena, por todas las historias que tenemos, todos los sueños. A Daviso, por escucharme siempre, por tener siempre algo que decir cuando dudo de todo, te voy a extrañar para esos casos. Grini y Orlando.

A todos aquellos que aunque no eran de mi grupo forman parte de estos 5 años, de esos que incluso puede que solo sean caras conocidas, pero que inevitablemente cuando un día les vuelva a ver me evocaran estos años tan hermosos de universidad.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, en especial a mis padres.

A todos aquellos que me han apoyado y confiado en mí, y a los que dudaron de mi capacidad alguna vez también, porque de cierta manera me dieron ánimos para superarme cada día.

## **Pensamiento**

La frontera es tu imaginación... cuando sea espíritu seré espacio, y si veo que el infinito me agobia echaré un vistazo en uno de esos agujeros negros, que dicen que hasta la luz se tragan, mi ayer, mi verdad, mis principios vienen y van, y se van cada vez por más tiempo (...) y ya no tendré que apagarme en tu frontera y ya no podrán hacerme más daño.

Alejandro Sanz

Definirse es limitarse

Paulo Coelho

## Índice

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                                                                             | 1  |
| Estado del arte .....                                                                                                                                          | 3  |
| Reseña histórica .....                                                                                                                                         | 3  |
| 1) Estudios del impacto ambiental de las presas de colas .....                                                                                                 | 4  |
| 2) Comportamiento geotécnico .....                                                                                                                             | 5  |
| 3) Seguridad de las presas de colas .....                                                                                                                      | 6  |
| 4) Diseño, construcción, operación, cierre, post cierre y monitoreo .....                                                                                      | 6  |
| 5) Gestión de riesgos en la actividad minera .....                                                                                                             | 7  |
| 6) Legislación y normativas internacionales .....                                                                                                              | 7  |
| 7) Planes de emergencia .....                                                                                                                                  | 8  |
| Estado de la temática de la protección de las presas de colas en Cuba .....                                                                                    | 9  |
| Descripción de los mecanismos de fallo de presas de colas .....                                                                                                | 11 |
| Deslizamientos .....                                                                                                                                           | 13 |
| Sismicidad .....                                                                                                                                               | 14 |
| Licuefacción .....                                                                                                                                             | 15 |
| Problemas en la cimentación .....                                                                                                                              | 16 |
| Sobrepaso .....                                                                                                                                                | 18 |
| Tubificación .....                                                                                                                                             | 20 |
| Erosión .....                                                                                                                                                  | 20 |
| Fallo de estructuras auxiliares .....                                                                                                                          | 20 |
| Subsidencia .....                                                                                                                                              | 21 |
| Marco teórico conceptual .....                                                                                                                                 | 22 |
| CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS REGIONALES E INGENIERO-GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO DE LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTTO ALBA (ECPSA) ..... | 27 |
| 1.0 Introducción .....                                                                                                                                         | 27 |
| 1.1 Localización geográfica del área de estudio .....                                                                                                          | 28 |
| 1.2 Clima .....                                                                                                                                                | 29 |
| 1.3 Hidrografía del medio y su impacto antrópico .....                                                                                                         | 29 |
| 1.3.1 Régimen de las lluvias .....                                                                                                                             | 29 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.2 Esguerrimiento superficial .....                                                                          | 30 |
| 1.4 Geomorfología del territorio.....                                                                           | 31 |
| 1.5 Geología de la región .....                                                                                 | 32 |
| 1.5.1. Geología del área de estudio.....                                                                        | 36 |
| 1.6 Tectónica del área de estudio.....                                                                          | 38 |
| 1.7 Sismicidad del área de estudio.....                                                                         | 40 |
| 1.8 Riesgo sísmico .....                                                                                        | 42 |
| 1.8.1 Valores de peligro sísmico determinados para la región de estudio .....                                   | 43 |
| 1.9 Suelos.....                                                                                                 | 44 |
| 1.10 Recursos minerales.....                                                                                    | 44 |
| 1.11 Infraestructura económica.....                                                                             | 44 |
| Conclusiones parciales.....                                                                                     | 45 |
| CAPÍTULO II ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE SEGURIDAD .....                         | 46 |
| 2.0 Introducción .....                                                                                          | 46 |
| 2.1 Etapas de la investigación.....                                                                             | 46 |
| 2.1.1 Etapa preliminar.....                                                                                     | 47 |
| 2.1.2 Etapa de determinación de los indicadores de fallo.....                                                   | 49 |
| 2.1.3 Etapa de modelación de escenarios de seguridad o de riesgos.....                                          | 52 |
| Conclusiones parciales.....                                                                                     | 56 |
| CAPÍTULO III. ESCENARIOS DE SEGURIDAD PARA PRESAS DE COLAS, CASO DE ESTUDIO: PRESA DE COLAS DE LA ECPSA.....    | 57 |
| 3.0 Introducción .....                                                                                          | 57 |
| 3.1 Resultados de las etapas de trabajo.....                                                                    | 57 |
| 3.2 Elementos en riesgo ante fallos de la presa de colas.....                                                   | 58 |
| 3.3 Factores de inestabilidad en la presa de colas .....                                                        | 59 |
| 3.4 Propuesta de indicadores de seguridad para la presa de colas de la ECPSA .....                              | 60 |
| 3.6 Descripción del escenario actual de la presa de colas de la ECPSA, según los indicadores de seguridad ..... | 61 |
| 3.6.1 Indicadores hidrogeológicos .....                                                                         | 61 |
| 3.6.2 Indicadores de las normas de explotación .....                                                            | 62 |
| 3.6.3 Indicadores de operación de drenaje .....                                                                 | 66 |
| 3.6.4 Indicadores de detección de fenómenos estáticos y dinámicos .....                                         | 68 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 3.6.5 Indicadores de deslizamientos .....  | 68 |
| 3.6.7 Sismos.....                          | 70 |
| Escenario actual de la presa de colas..... | 70 |
| Comunicaciones .....                       | 74 |
| Conclusiones parciales.....                | 75 |
| CONCLUSIONES.....                          | 76 |
| RECOMENDACIONES.....                       | 77 |
| BIBLIOGRAFIA                               |    |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Tipos de presas de colas, según el método constructivo utilizado, según Zabala, F. et al., 2010.....                                         | 4  |
| Figura 2 Deslizamientos provocados por ascenso del nivel freático, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.....                                         | 13 |
| Figura 3 Modelo conceptual de una presa de residuos mineros con los factores que afectan su funcionamiento (Zandarín, M.T. 2009).....                  | 23 |
| Figura 4 Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga, según ICOLD, 1989.....                                           | 24 |
| Figura 5 Sección transversal del método constructivo empleado aguas arriba, Hernández, T. 2015 .....                                                   | 25 |
| Figura 6 Ubicación geográfica del área de estudio.....                                                                                                 | 28 |
| Figura 7 Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998) .....                                     | 31 |
| Figura 8 Mapa sombreado del relieve e hidrografía.....                                                                                                 | 32 |
| Figura 9 Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoa autóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996) ..... | 33 |
| Figura 10 Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baraco según Proenza, J. 1998. ....                                                      | 34 |
| Figura 11 Diagrama de Streckeisen, 1976.....                                                                                                           | 35 |
| Figura 12 Esquema geológico del área de estudio. Modificado de IGP, 2001 .....                                                                         | 36 |
| Figura 13 Columna estratigráfica del área de la presa de colas.....                                                                                    | 37 |
| Figura 14 Mapa de bloques morfotectónicos de la región de Moa (tomado de Rodríguez, A. 1998). .....                                                    | 39 |
| Figura 15 Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014.....                                        | 42 |
| Figura 16 Vulnerabilidad por deslizamientos de la provincia Holguín (Guardado, R. y otros 2012)                                                        | 42 |
| Figura 17 Organigrama de las etapas de trabajo.....                                                                                                    | 47 |
| Figura 18 Organigrama para la modelación de escenarios de seguridad.....                                                                               | 54 |
| Figura 19 Sistema de monitoreo de la presa de colas de la ECPSA. Tomado de Hernández, T. 2015.....                                                     | 56 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Foto 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. .... | 15 |
| Foto 2 Rotura de la Presa de Aznalcollar, 1998. (Foto tomada de Oldecop. L.).....                                                                                                                                                                                           | 17 |
| Foto 3 Foto satelital con la ubicación de las presas de colas existentes en el municipio de Moa ....                                                                                                                                                                        | 27 |
| Foto 4 Hidrografía del medio y el impacto antrópico, tomado de Hernández, T. 2015. ....                                                                                                                                                                                     | 30 |
| Foto 5 Grietas en muro de la presa inactiva de Moa, sismo de 1995 (Rodríguez, A. 1998).....                                                                                                                                                                                 | 41 |
| Foto 6 Perforaciones tipo SPT y CPT en la presa de colas .....                                                                                                                                                                                                              | 48 |
| Foto 7 Proceso de construcción de la presa de colas de la ECPSA.....                                                                                                                                                                                                        | 63 |
| Foto 8 Sellaje al talud utilizando protección química, tomado de Hernández T. 2015.....                                                                                                                                                                                     | 63 |
| Foto 9 Estructura que almacena el agua de la presa de colas piscina sur .....                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Foto 10 Fenómeno de sobrepaso por intensas lluvias en la presa de colas de la ECPSA.....                                                                                                                                                                                    | 65 |
| Foto 11 Aliviadero de emergencia de la presa de colas .....                                                                                                                                                                                                                 | 66 |
| Foto 12 Construcción de un dren en la presa de colas de la ECPSA.....                                                                                                                                                                                                       | 67 |
| Foto 13 Erosión en surcos en el sector oeste de la presa de colas, Hernández, T. 2014.....                                                                                                                                                                                  | 69 |
| Foto 14 Cárcava profunda en dique norte de la presa de colas, Hernández, T. 2014.....                                                                                                                                                                                       | 69 |
| <br>Gráfico 1 Incidentes de Presas de colas por mecanismos de fallos y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008. ....                                                                                                                     | 12 |
| <br><b>Tabla 1</b> Estado actual de la presa de colas de la ECPSA.....                                                                                                                                                                                                      | 71 |

## RESUMEN

La construcción de la presa de colas, perteneciente a la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, sobre los terrenos de la llanura aluvial de los ríos Moa, Cabañas y arroyo Los Lirios y próximo a la falla Moa, propicia un incremento de los riesgos de fallos, considerando el incremento de la actividad sísmica en el territorio.

Las presas de colas son obras complejas, que tienen como función el almacenamiento de los residuos sólidos del proceso minero metalúrgico. Los diseños se basan en la construcción de diques de contención perimetrales, los que se disponen de acuerdo al método constructivo utilizado.

La presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, construida por el método aguas arriba, no tiene modelado los posibles escenarios de seguridad ante la ocurrencia de diversos peligros de origen natural o antrópico. El incremento de los incidentes medioambientales de la presa ha sido más frecuente, en la medida que alcanza una mayor altura; lo que incrementa el riesgo al medio, la población y la infraestructura.

En esta investigación se determinan los indicadores de fallos y la modelación de los escenarios de seguridad para la presa de colas. La determinación de un sistema de indicadores de fallos permitió definir el comportamiento que poseen las presas de colas, a través de la modelación de escenarios de seguridad.

Los indicadores de fallos son analizados y evaluados a través de métodos cualitativos, en correspondencia con la modelación propuesta, permitió definir el plan de medidas de prevención y mitigación ante la ocurrencia de posibles riesgos.

**ABSTRACT**

The construction of the Tailings Pond, below to the Company Moa Nickel S.A., Pedro Sotto Alba, on the lands of the alluvial plain of the rivers Moa, Cabañas and Los Lirios stream, near to the Moa fails, favorable an increment of the risks of failure, considering the increment of the seismic activity in the territory.

The tailings are complex structures that have as function the storage of the solid residuals of the process mining metallurgist. The designs are based on the construction of dikes of contention, those that prepare according to the used constructive method.

The tailings pond built by the method water up, doesn't have modeling the possible scenarios of security before the occurrence of diverse dangers of natural origin or for the men. The increment of the environmental incidents of the tailings has been more frequent, in the measure that it increases the height; that increases the risk to the environmental, the people and the infrastructure.

In this investigation the indicators of failure and the model process of the scenarios of security are determined for the tailings pond. The determination of a system of indicators of failure allowed defines the behavior of the tailings, through the model of scenarios of security.

The indicators of failure are analyzed and evaluated through qualitative methods, in correspondence with the proposed in the model, it allowed to define the plan of measures of prevention and mitigation before the occurrence of possible risks.

## Introducción

Las presas de colas son obras complejas, que tienen como función el almacenamiento de los residuos sólidos del proceso minero metalúrgico. Los diseños se basan en la construcción de diques de contención perimetrales, los que se disponen de acuerdo al método constructivo utilizado.

La edificación se hace de forma progresiva, simultáneamente con las operaciones de deposición de las colas. El riesgo de fallo 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.

Los estudios de estabilidad de las presas de colas se adecuan al tipo de obra en particular, cada caso es un prototipo único e irrepetible. Los principales aspectos que se consideran son: la composición química de los residuos (determina el impacto o carga contaminante para el ambiente), el estado físico de los residuos (colas fluidas, colas secas, colas en pasta), el espacio disponible para la disposición de los residuos (en valle, en ladera, junto a un curso de agua), sus características físico mecánicas (densidad, peso específico, deformabilidad y resistencia).

Las presas de colas son obras que requieren un control sistemático para disminuir los fallos que en ella pueden ocurrir. Los principales mecanismos de fallos registrados están asociados con: el deslizamiento del talud, ocurrencia de terremotos, sobrepaso, problemas de fundación, tubificación, fallo por problemas en las estructuras auxiliares, erosión del dique y subsidencias o colapso del terreno.

La existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros 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 y contaminación del medio y en muchos casos pérdidas de vidas humanas.

El cambio en los regímenes de operación de la presa y ajustes o cambios en el proyecto, sin considerar todos los aspectos geotécnicos, pueden contribuir a la ocurrencia de futuros fallos y un incremento de la probabilidad de accidentes.

En la actualidad los problemas geotécnicos y ambientales que generan estas obras se han convertido en líneas de investigación de las Ciencias de la Tierra y el Ambiente. La avería ocurrida en la presa de colas de la ECPSA en enero del 2014, demostró la necesidad de un mejor monitoreo y manejo de los residuos.

La Ley # 81 de Medio Ambiente, emitida en el año 1997, no contempla a las presas de colas como uno de los focos de contaminación más agresivos al medio natural. Los fallos de las presas de colas son escenarios no modelados hasta la actualidad, lo que favorece a la no percepción de los riesgos que representan estas obras para el hombre, las propiedades y el ambiente. La seguridad de las presas de colas no debe centrarse exclusivamente sobre la estructura u obra de ingeniería con un enfoque determinista.

Actualmente en la presa de colas de la ECPSA se trabaja en respuesta a los peligros que afectan a la presa de manera reactiva. La no existencia de un plan de emergencia para la presa, imposibilita realizar de manera fiable la identificación de las emergencias con el tiempo de antelación suficiente para actuar de manera proactiva.

Los riesgos no deben ser controlados solamente mediante reglas y procedimientos que en la práctica han demostrado una baja efectividad, ni con la verificación de coeficientes de seguridad que se aplican con una medida conservadora y prudente. La modelación de los escenarios de seguridad para la presa de colas constituye el primer paso para la confección de los planes de emergencia de estas obras.

**Problema científico:** inexistencia de modelaciones de escenarios de seguridad para la presa de colas de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba (ECPSA) que garanticen la estabilidad de la misma ante diversos riesgos.

**Objeto de estudio:** presa de colas de la ECPSA.

**Campo de acción:** modelación de escenarios de seguridad de la presa de colas de la ECPSA.

**Objetivo general:** Diseñar modelos de escenarios de seguridad para la presa de colas de la ECPSA a través de los indicadores de fallos.

**Objetivos específicos:**

- 1. Evaluación de las condiciones ingeniero geológicas del área de la presa de colas de la ECPSA**
- 2. Determinación de los indicadores de fallos**
- 3. Establecer los escenarios de seguridad para la presa de colas de la ECPSA.**

**Hipótesis:** si se diseñan los modelos de escenarios de seguridad de la presa de colas de la ECPSA, a través de indicadores de fallos, se garantiza la estabilidad de la misma ante diversos riesgos, disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de desastres que afecten a la población, la economía y el medio.

**Estado del arte****Reseña histórica**

La historia de la construcción de las presas se remonta hasta las primeras civilizaciones del Medio y del Lejano Oriente. La presa conocida más antigua, aproximadamente en 2600 AC, es la construida en Sadd-el-Kafara, Egipto. El diseño se basó en una zona central rellena con material suelto, rodeada por espaldones de roca y con parapetos protegidos por mampostería ordinaria; la altura total de Sadd-el-Kafara era de 14 m de altura.

Otras pequeñas presas con estructuras de rellenos simples, se construyeron para la irrigación en China, Japón, India y Sri Lanka; algunas de estas primeras presas existen todavía.

La construcción de presas de colas o residuos producidos por la industria minera es mucho más reciente, surgiendo como una necesidad a mediados del siglo XX. En los últimos 50 años con el desarrollo del movimiento de tierra, han avanzado rápidamente las técnicas de diseño y construcción de estas obras.

El almacenamiento de colas constituye una de las principales tareas de los procesos mineros metalúrgicos del siglo XX. En la mayoría de los casos los diques de colas se han convertido en parte esenciales de la actividad minera. Los diseños y construcción han evolucionado, desde una construcción rudimentaria a los actuales estándares de la

ingeniería, en la que se emplea la ingeniería geológica y campos asociados (Marklan, A. y Eurenus, J., 1976 y Quintana, H. 1998).

Los primeros métodos de construcción consistían en levantar un muro de contención con estériles más gruesos, a los que había que ir añadiendo materiales (recrecido) a medida que ascendía su nivel en el depósito. En la actualidad existen, de manera general, tres tipos de métodos de constructivos tal como se muestra en la Figura 1.

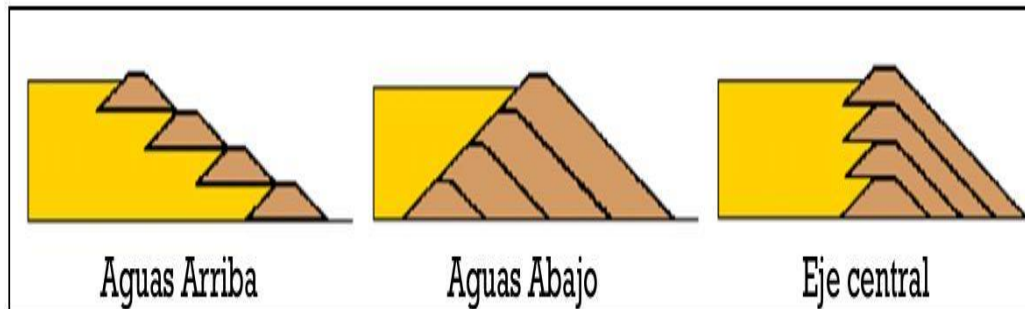


Figura 1. Tipos de presas de colas, según el método constructivo utilizado, según Zabala, F. et al., 2010

### **Principales líneas de investigación existentes sobre la temática de presas de colas**

La modelación de los escenarios de seguridad para presas de colas contribuye a la creación de los planes de emergencia de estas obras; además de facilitar la organización y planificación de los recursos necesarios para monitorear el comportamiento de los indicadores de fallos y aplicar las medidas correctivas necesarias.

En la literatura consultada se pueden distinguir las principales líneas de investigación que se han desarrollado acerca de las presas de colas.

#### **1) Estudios del impacto ambiental de las presas de colas**

La contaminación por desastres medioambientales producidos por el colapso total o parcial de presas de colas es analizada por los siguientes autores: Angeli, M.G., et. al., 1996; Rodríguez, R., 2002; Blight, G.E. y Fourie, A., 2003; Alonso E. y Gens A., 2006; Rodríguez, R. y García, A., 2006; Rodríguez, R., et. al., 2009; Oldecop, L., et. al., 2010; Hernández, T., y Ulloa, M., 2014.

Los autores citados hacen referencia a las afectaciones que provocan las presas ante un fallo de sus diques de contención, mostrando la necesidad de realizar estos estudios con mayor profundidad en las diferentes fases de la vida de las presas de colas, analizan de forma independiente los impactos a los diferentes componentes ambientales. Estos trabajos se enfocan generalmente hacia los daños que generan los derrames de los materiales almacenados sobre el medio ambiente y no sobre las causas que los generaron.

Caracterización de los residuos: Ponjuan, A. y Rodríguez, R., 1981; Ordoñez, A., 1984; Alonso, E., 2001; Venegas, F. C., 2008. Estas investigaciones abordan los altos contenidos de metales pesados que contienen los residuos y su caracterización se orienta hacia la búsqueda de metales preciosos para su futura explotación. La generación del drenaje ácido presenta especial importancia, dada la necesidad de evitar su vertimiento al medio, por lo se hace necesario la que la búsqueda con urgencia de métodos que garanticen el almacenaje seguro de los residuos en las presas de colas.

## **2) Comportamiento geotécnico**

Las propiedades físico, mecánicas y comportamiento ante sismos de las presas de colas es un tema estudiado ampliamente por varios investigadores: Guardado, R. y Riverón, A.B., 1997; Rodríguez, R., 2002; Fourie, A.B., et. al., 2003; Zandarín, M.T., et. al. 2008; Venegas, F. C., 2011. Estas investigaciones estudian el comportamiento geotécnico a partir del estudio de las propiedades físico-mecánicas de las colas, dique y suelos de cimentación, así como el comportamiento de las presas de colas ante la ocurrencia de sismos. Estos estudios presentan la necesidad de mantener el control sobre las propiedades de los materiales de construcción de las presas de colas, los suelos de cimentación y los materiales de los residuos almacenados, hasta el proceso de postcierre. Este control garantiza la seguridad de la obra durante su vida útil hasta su cierre definitivo. Además se muestran análisis estadísticos que demuestran que el desconocimiento de las propiedades de los materiales conduce a la destrucción total o parcial de la obra. El mayor número de fallos de las presas de colas está asociado con el método constructivo “aguas arriba”, existiendo la necesidad de profundizar las investigaciones en este campo.



### **3) Seguridad de las presas de colas**

La seguridad de las presas de colas ha sido abordada por autores tales como: Suárez, J., 1998; Olalla, C. y Cuellar, V., 2001; Rubín, M., 2003; Oldecop, L., 2004; Hernández, T. y Guardado, R., 2010, 2011, 2012, y 2014. Estos estudios de seguridad se basan en el análisis de los fallos de presas de colas relacionándolos con el método constructivo. En el caso del método aguas arriba, se define que los más frecuentes son la ocurrencia de deslizamientos de taludes y por acciones de los sismos. Estas investigaciones abordan la necesidad de un análisis más profundo de los factores que inciden en los fallos, al valorar la seguridad de las presas a través de la gestión de riesgos

### **4) 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 postcierre 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.

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.

## **5) Gestión de riesgos en la actividad minera**

Varios autores e instituciones han incursionado en la temática de los riesgos sobre el medio, la infraestructura y la población, tales como: Carrara, A., 1983; Guardado, R. y Carménate, J., 1996; Fell, R., 1997; Estado Mayor Nacional de Defensa Civil (EMNDC), 2005, 2010 y 2012. La información relacionada con los procedimientos o metodologías para establecer métodos de gestión de riesgos por deslizamientos de taludes es escasa. Los programas presentados se enfocan hacia las medidas de rehabilitación y reconstrucción, existiendo un déficit de conocimientos en la prevención y reducción de los riesgos de fallos de las presas de colas. Se refiere que estos no son considerados para la toma de decisiones, durante el ciclo de vida de los proyectos.

## **6) Legislación y normativas internacionales**

Los investigadores y organizaciones internacionales siguientes: ICOLD., 1989; UNDRO., 1979 y 1990; United 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.

## 7) Planes de emergencia

La metodología de confección de los planes de emergencia existe para presas y embalses de almacenamiento de agua. En el caso de las presas de colas no está documentada o no existe dicha metodología. La presa de colas de la ECPSA no tiene diseñado un Plan de emergencia.

Los planes de emergencia (PE) de presas consisten en el establecimiento de la organización y planificación de los recursos humanos y materiales necesarios, en situaciones de emergencia. Además de definir las actuaciones a llevar a cabo para la detección, seguimiento y control de los factores de riesgo que puedan comprometer la seguridad de la presa. Esto permite, para el caso de presas de colas, eliminar o reducir la probabilidad del vertido de la carga contaminante al medio, dentro de los PE se establecen los sistemas de información, alerta y avisos.

El objetivo fundamental de los PE es el de eliminar o reducir el riesgo de rotura de la presa, por lo que resulta esencial en cada caso identificar las situaciones y fenómenos que afectan la seguridad de la obra. La metodología para la confección de PE tiene especial relevancia el análisis de seguridad de la presa, unido a la organización de las medidas correctivas.

La formulación de los planes de emergencia debe tener como contenido mínimo los siguientes aspectos, (Piñero, J. M. 2001):

1. Análisis de seguridad de la presa
2. Zonificación territorial y análisis de los daños generados por la rotura
3. Normas de actuación
4. Organización
5. Medios y recursos

### **7.1) Escenarios de seguridad para presas de colas**

Según Hernández, T. 2015, en la investigación de su tesis doctoral, la aplicación del Sistema de Gestión de Riesgos por fallos al proyecto de la presa de colas de la ECPSA permitió demostrar que la no modelación de escenarios de fallos de la presa de colas produce mayor incertidumbre sobre la probabilidad de ocurrencia de desastres, se confirmó lo anterior con la ocurrencia de un gran deslizamiento en el año 2014, para reconstruir los daños se ha invertido más de un millón de dólares; la no percepción de los riesgos por la comunidad, autoridades y las instituciones produce una mayor vulnerabilidad.

Las bibliografías que abordan esta temática son escasas y las existentes: Piñero, J.M. 2001, Serrano, A. 2011, Morales, A.2012, abordan la modelación de los escenarios de seguridad para el caso de presas y embalses de agua.

#### **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 se establece 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 tres leyes, siete decretos leyes, trece 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 su 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- Ley No. 118/2014 de la Inversión Extranjera, establece en su disposición especial: “Las empresas mixtas, los inversionistas nacionales y extranjeros partes en contratos de asociación económica internacional, y las empresas de capital totalmente extranjero, están sujetas a las regulaciones que se establezcan en materia de protección contra catástrofes y desastres naturales”.

4- 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.

5- Directiva No. 1 del Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil (EMNDC) , 2010, aprueba lo siguiente: 1- La “Apreciación general de peligros de desastres en Cuba”, 2- Implementar las acciones para la prevención de desastres a todos los niveles, de los organismos y órganos estatales, entidades económicas e instituciones sociales, 3- Establecer durante la respuesta a las situaciones de desastres, las fases de Aviso, Informativa, Alerta y Alarma y los plazos, 4- 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.

6- 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.

### **Descripción de los mecanismos de fallo de presas de colas**

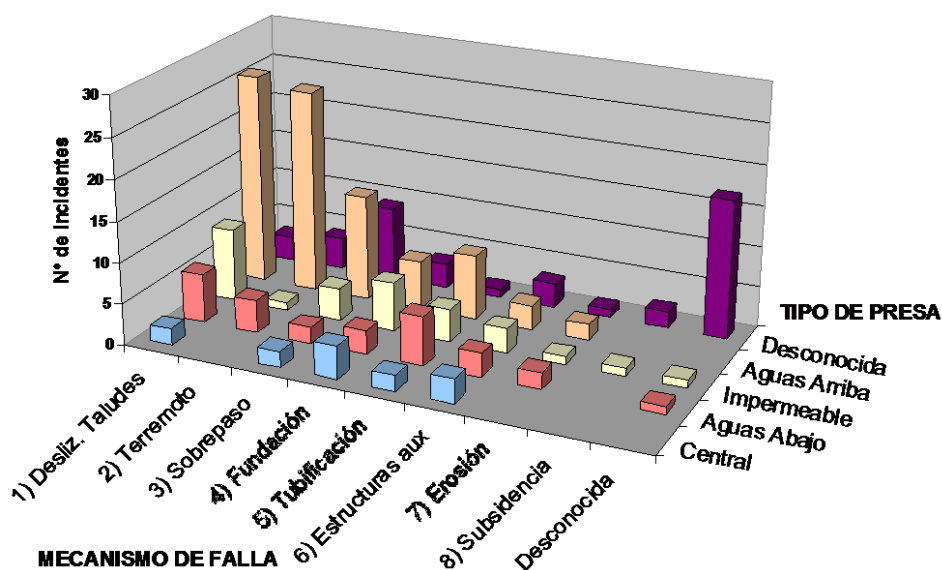
La rotura de una presa de colas, y el vertido de estas al medio, puede tener consecuencias ambientales catastróficas. De ahí la necesidad de conocer la forma en que se han producido históricamente. Esto constituye una referencia necesaria para aprovechar toda esta experiencia para la identificación y prevención de los riesgos en las presas de colas.

Los resultados obtenidos del análisis de 251 casos de fallos y accidentes en presas de residuos mineros, recopilados en el Boletín 121 del ICOLD, muestran que estas se

producen tanto en las presas que están en operación como en las inactivas o abandonadas, (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2007).

Las principales causas de fallo identificadas en estos estudios son las siguientes: deslizamiento del talud, terremoto, sobrepaso, problemas de fundación, tubificación, fallos por problemas en las estructuras auxiliares, erosión del dique, subsidencias o colapso del terreno.

Las presas con mayor ocurrencia de fallos son las que se construyen por el método de aguas arriba, como es el caso de la Presa de Colas de la EPCSA. En la Gráfico 1 se muestran Incidentes de Presas de colas por mecanismos de fallas y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.



**Gráfico 1** Incidentes de Presas de colas por mecanismos de fallos y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.

Las mayores causas de fallo de presas activas están relacionadas con los deslizamientos del talud, terremoto y sobrepaso. El principal problema que favorece el proceso de fallo es la existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros almacenados en las presas.

Las consecuencias de estos fallos se reflejan en grandes pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio ambiente y en muchos casos pérdidas de vidas humanas.

En el caso de las presas inactivas la mayor incidencia está el sobrepaso, terremoto y deslizamiento.

## Deslizamientos

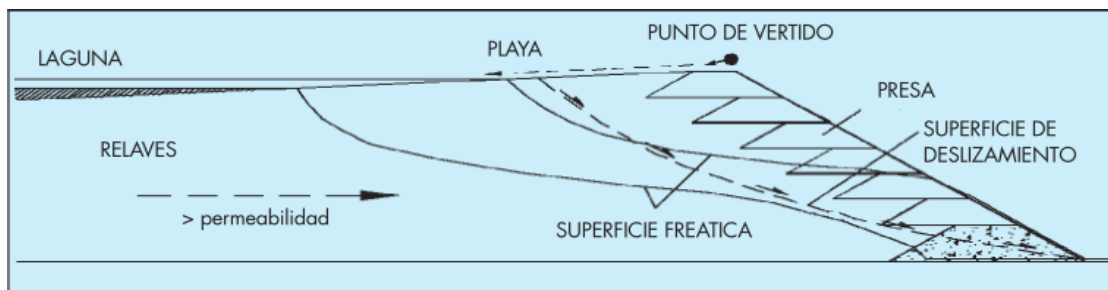
El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza.

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 recrecimiento y la 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 recrecimiento 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 Gráfico 1).

En 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.



**Figura 2** Deslizamientos provocados por ascenso del nivel freático, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.



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

En la presa El Cobre con altura de 35 m, ubicada en Chile, se encontraba inactiva por periodo de dos años en 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, aun cuando el clima de la región se mantenía relativamente seco. El método constructivo empleado fue el de aguas arriba, acorde al caso de estudio de la presente investigación.

El terremoto de La Ligua ocurrido el (28/03/1965), de magnitud de 7.5 grados en la escala de Richter, con un 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 metros cúbicos de lodo, provocó la destrucción de un asentamiento poblacional ubicado aguas abajo de la presa y 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.

La presa de Tapo Canyon (Foto 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, colapso durante la ocurrencia del terremoto de Northridge California, 1994.



**Foto 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).

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.

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 camiones mezcladores de hormigón, hacia la mitad oeste del depósito se localizaba una laguna en contacto directo con la presa.

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.

### **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.

El fenómeno de licuación de materiales granulares (no plásticos) se explica por la tendencia de estos a reducir su volumen de poros cuando se los somete a deformaciones de corte cíclicas. En un material saturado estos cambios de volumen ocurren a expensas de expulsar agua en los poros dependiendo de la permeabilidad. El incremento de la presión del agua puede estar asociado con la baja permeabilidad donde la distancia a las fronteras de drenaje es grande, o con la rapidez de ocurrencia de las cargas y deformaciones.

Este aumento de la presión del agua intersticial tiene como efecto de disminuir la resistencia al deslizamiento entre partículas, hasta el punto de hacer que el material fluya como un líquido viscoso, de alta densidad (Oldecop, L., et. al. 2008).

### **Licuación estática**

La licuación estática es una situación de inestabilidad no muy diferente de la licuación producida por un movimiento sísmico, la diferencia radica en el mecanismo por el cual se llega a la inestabilidad.

En el caso del terremoto, es el aumento de la presión de poros y la consiguiente acumulación de deformación de corte lo que determina que el material alcance la rama descendente de su relación resistencia de formación y se produzca así el disparo de la licuación.

Ahora bien, cualquier otro proceso que produzca el aumento de las tensiones hasta que el pico de resistencia del material sea superado, entonces una situación de inestabilidad análoga se alcanza por incremento de carga “estática”, de ahí el nombre de licuación “estática”. (Oldecop, L., et. al. 2008).

### **Problemas en la cimentación**

El análisis de las fallos por problemas en la cimentación se ejemplifica mediante el estudio del caso del fallo de la presa de Aznalcollar (1998) (Foto 2).



**Foto 2** 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 metros 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 ( $2^\circ$ ) 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 supera 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).

### **Sobrepaso**

El fallo por sobrepaso está asociado con una operación inadecuada en el vertido de las colas y la obstrucción de tuberías de desagüe, lo que conlleva a la disminución de la altura del borde libre a niveles peligrosos.

El hecho de que, por razones de protección ambiental, el agua almacenada y las aguas pluviales que ingresan a la presa no se puedan verter al medio, condiciona fuertemente el diseño y la operación.

En el caso de presas de tipo anular, el mayor aporte de agua que puede recibir es proveniente de las precipitaciones, que caen en el área que ocupa su planta.

Las presas ubicadas en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, deberán tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que

puede generarse por las precipitaciones. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008).

El análisis de los fallos por problemas de sobrepaso se ejemplifica mediante el estudio del caso del fallo de la presa de Merriespruit (Sudáfrica), ocurrida en 1994 (Fourie, A.B., et al, 2001). La presa era de tipo anular con planta rectangular y tenía al momento de su rotura 31 m de altura.

El recrecimiento se hacía hacia aguas arriba, utilizando los mismos residuos mineros como material de construcción y permitiendo su secado para favorecer su consolidación por acción de las fuerzas capilares. El llenado del depósito fue suspendido por haber presentado problemas de estabilidad, de forma esporádica ocurrieron escapes de residuos mineros y agua, desde un depósito vecino que continuaba en operación; un año antes de ocurrir el fallo.

La altura del borde libre al momento del fallo era desconocida, pero se estima que era escasa. El fallo se inició luego de una tormenta de lluvia de 50 litros/m<sup>2</sup>, se supone que por sobrepaso del coronamiento (Fourie, A.B., et. al, 2001).

La brecha dejó escapar 600000 m<sup>3</sup> de residuos mineros que fluyeron a lo largo de 3 Km, provocando 17 muertos (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008).

El agua vertiendo por el coronamiento erosionó la cara exterior del talud iniciando una brecha de erosión regresiva. Es posible que pequeños deslizamientos locales aceleraran el proceso de erosión (Blight, G. E. 1994). El vertido continuado de agua erosionó también el material de estos deslizamientos acumulado al pie del talud.

La ausencia de la estructura de soporte exterior permitió que los residuos mineros más finos y con elevado contenido de agua comenzaran a ser sometidos a tensiones de corte crecientes, (Fourie, A.B., et. al, 2001).

Los ensayos realizados no drenados de los residuos mineros almacenados en la Presa de Merriespruit, revelaron 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.

La inestabilidad iniciada en una porción limitada de material, se extendió a una gran masa que fluyó a través de la brecha en forma de líquido viscoso.

### **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.

### **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.

## **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).

En cambio, el caso de la presa de Iwiny (Polonia), construida a través de un valle, parece ser una auténtico fallo por subsidencia de la cimentación (ICOLD, 2001). El fallo ocurrió en el año 1967 y la información publicada al respecto es escasa.

La construcción de una galería subterránea, por debajo de la posición del depósito de colas desde aguas arriba, provocó una inestabilidad en la cimentación de la presa. En el momento de ocurrencia del fallo el extremo de la galería se encontraba a 200 metros del eje de la presa, próximo a una zona de fallo de unos 20 m de espesor.

La combinación de las actividades de excavación subterránea y las filtraciones desde la superficie hacia la galería, incrementadas por el bombeo de agua para mantenerla en seco, provocaron que el cimiento de la presa fuera arrastrado hacia la zona de fallo.

Esto provocó la subsidencia de la fundación de la presa y la aparición de una brecha en la misma, que provocó el vertido de 4,6 millones de metros cúbicos de colas y la muerte de 18 personas.



## **Marco teórico conceptual**

### **Las colas**

Estos 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).

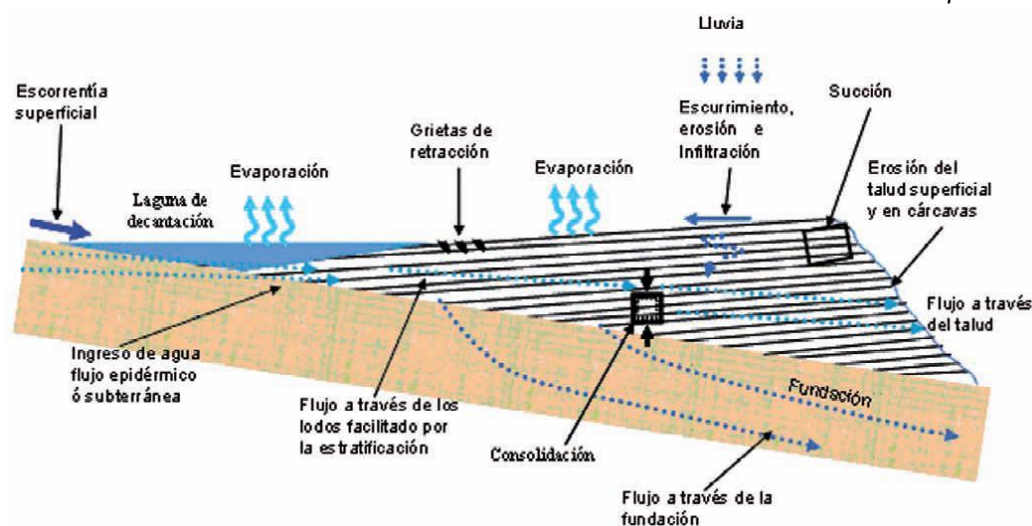
### **Pasivo ambiental minero**

Minas, plantas y residuos mineros abandonados que ocasionan impactos ambientales sobre los ecosistemas o que significan riesgo permanente potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

### **Funcionamiento hidráulico de la presa de colas**

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 3).



**Figura 3** Modelo conceptual de una presa de residuos mineros con los factores que afectan su funcionamiento (Zandarín, M.T. 2009)

### Proceso minero metalúrgico de la ECPA

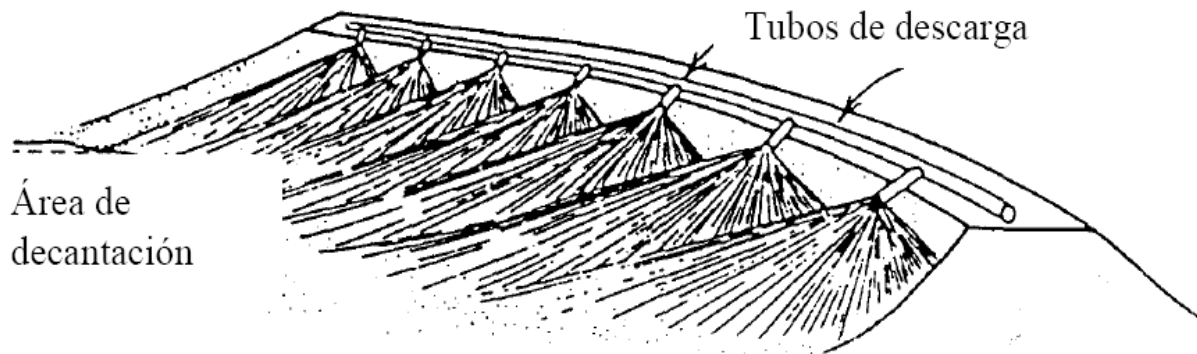
El proceso de extracción de níquel y cobalto en la ECPA, se realiza a través del proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL, por sus siglas en inglés). Las menas explotadas provienen de las zonas limonítica y de transición, dado que solamente se explotan las capas de mayor grado de oxidación, dejando en el yacimiento la parte de la zona saprolítica.

Los residuos sólidos denominados colas 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 4), en todo el perímetro de la presa de colas; garantizando un mejor aprovechamiento de la capacidad de la presa.

La composición media de la pulpa que se vierte en presa contiene de 30-40 % de material sólido y un 60-70 % de líquido. El pH de la pulpa HPAL es ácido, con valores entre 4 - 4.5; las características de las colas son arenoso arcillosa, con predominio de los limos. Los residuos están compuestos mayoritariamente por óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mg.

El promedio de la densidad seca in situ de los residuos, se estima en 16 kN/m<sup>3</sup>, basado en registros históricos. La tasa de producción de residuos es de 10 320 t secas/día, por 134 t

de concentrado de níquel + cobalto diarias. Las operaciones dentro de la presa de colas están estimadas hasta el año 2017.



**Figura 4** Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga, según ICOLD, 1989

### **Construcción y operación de la presa de colas**

Dentro de los tres tipos de métodos de construcción de presas de colas más conocidos, el que se utiliza en la presa es el de “aguas arriba”, (Figura 5). La presa es edificada 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 oscila 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 5** Sección transversal del método constructivo empleado aguas arriba, Hernández, T. 2015

### **El diseño de las operaciones de la presa de colas de la ECPSA se basa en:**

- 1- La deposición de las colas se realiza, una vez concluida la construcción de los diques.
- 2- La construcción de los diques cumplirá con los factores de seguridad estática y pseudoestática (sísmica), requeridos para la estabilidad.
- 3- Los aliviaderos garantizan el paso del flujo de agua para eventos extremos, tormentas de probabilidad de 1 en 1 000 años, intensas lluvias, etc. El agua es reciclada y enviada a la planta para su aprovechamiento en el proceso de lavado a contracorriente. El agua residual del proceso sale al exterior durante eventos de lluvias intensas, roturas de las bombas o del fallo de la corriente eléctrica; para lo cual se deben tomar todas las medidas pertinentes. En estos casos el agua residual se drena hacia un aliviadero de emergencia que vierte al arroyo Los Lirios.
- 4- La tasa de producción de residuos máxima es de 10 300 t secas/día, lo cual es propio para valores de hasta 49 000 t de concentrado de níquel + cobalto para un año
- 5- Las operaciones dentro de la presa de colas están estimadas hasta el año 2017, con una altura de 44 m
- 6- Los residuos serán depositados por tubos de descarga (spigots) desde la cresta del terraplén principal
- 7- La estructura de decantación localizada en la piscina sur, permitirá suministrar el agua proveniente de las lluvias, el escurrimiento y las que se recuperan de los residuos hacia a la planta de lavaderos.

## La ingeniería de presas de residuos o colas

Las presas de colas se construyen progresivamente a lo largo de todo el periodo de explotación minera. Los cambios más importantes en el régimen de operación de la presa están relacionados por aumento de la carga hidráulica y de las tensiones en la presa de sedimentación.

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 mina 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.

Amenaza o peligro: definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

Vulnerabilidad: 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.

El riesgo se estima como la magnitud esperada de un daño, que presenta un elemento o sistema, en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado. Se evalúa en términos de pérdidas y daños físicos, económicos, sociales y ambientales que podrían presentarse si ocurre el evento amenazante (Millán, 2005).

## CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS REGIONALES E INGENIERO-GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO DE LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTTO ALBA (ECPSA)

### 1.0 Introducción

El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 km<sup>2</sup>. Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba Oriental. El límite hacia el Este es con el municipio Baracoa, separados por los ríos Jiguaní y Jaguaní; por el Sur limita con el municipio Guantnamero de Yateras; por el Oeste con los municipios de Frank País y Sagua de Tánamo y por el Norte con el estrecho de Bahamas en el Océano Atlántico. Próximos a sus costas se encuentran los cayos Moa Chico y Moa Grande situados frente a la Ciudad de Moa y Cayo del Medio en la Bahía de Yamanigüey.

En el territorio existen tres presas de colas, dos en operaciones una correspondiente a la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECECG) otra a la empresa Comandante Pedro Sotto Alba (ECPSA) y una inactiva transformada en pasivo ambiental desde 1970 (Foto 3).

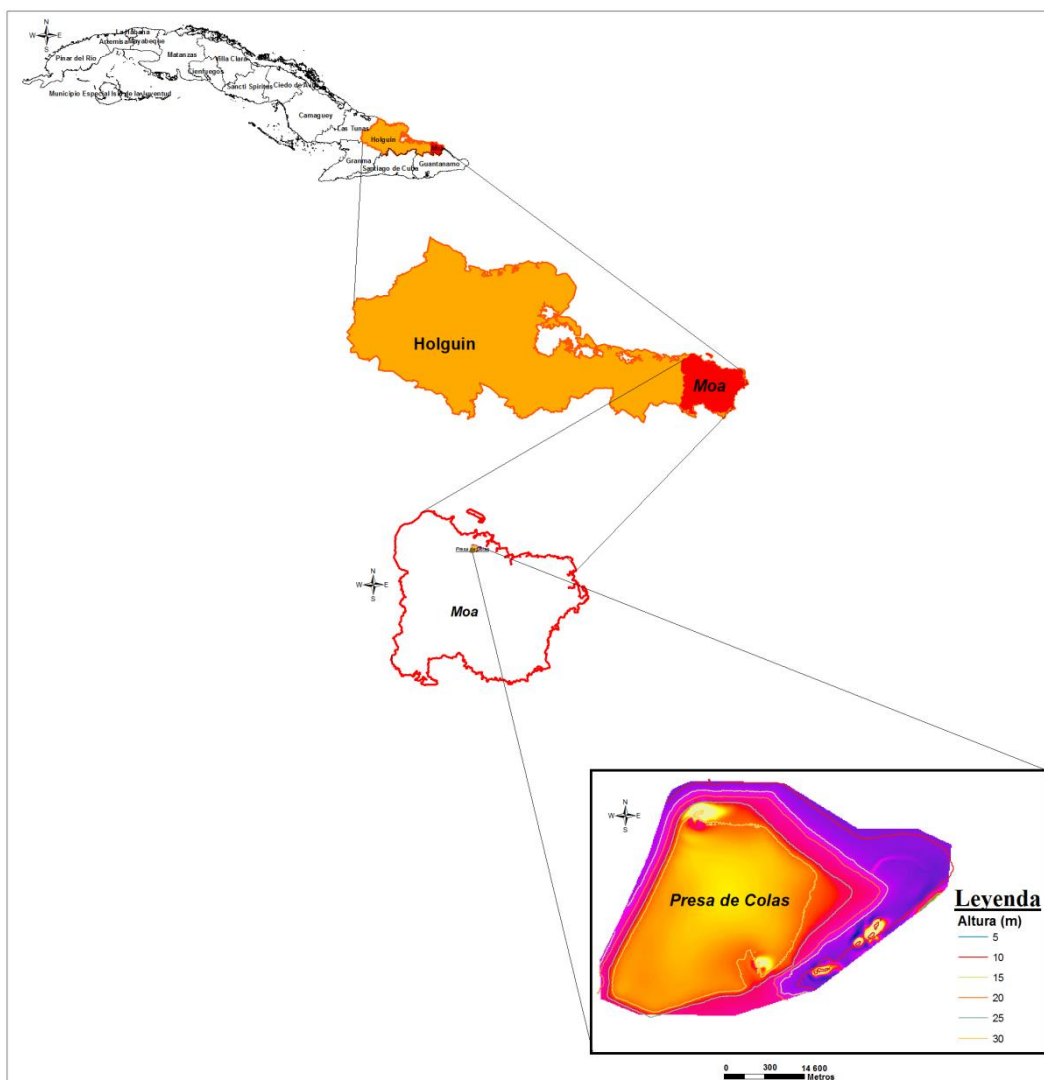


**Foto 3** Foto satelital con la ubicación de las presas de colas existentes en el municipio de Moa



## 1.1 Localización geográfica del área de estudio

La presa de colas se ubica en la provincia Holguín, municipio Moa, al sureste de la ciudad de Moa, al suroeste de la dársena del puerto (a unos 1840 m aproximadamente), al este de las instalaciones industriales de la ECPSA y al noroeste del poblado La Veguita, entre la confluencia del río Moa y el arroyo Los Lirios (Figura 6).



**Figura 6** Ubicación geográfica del área de estudio

## 1.2 Clima

El clima es tropical con abundantes precipitaciones, estrechamente relacionadas con el relieve montañoso que se desarrolla en la región y la dirección de los vientos alisios cargado de humedad, provenientes del océano Atlántico. En el período de 1916-1963, la temperatura media anual oscilaba entre 20 °C y 25 °C, el promedio de precipitaciones anuales entre 1200-1400 mm y la evaporación media anual entre 1400-1750 mm y hasta 1985 la temperatura media anual se reportó entre 22 °C y 33 °C, el promedio de precipitaciones entre 1600-2200 mm y la evaporación media anual entre 2200-2400 mm. En el periodo de 1985 al 1995, según la estación hidrometeorológica El Sitio y datos pluviométricos de la estación Vista Alegre, la temperatura media anual osciló entre 22,6 o – 30,5 °C. Los meses más calurosos comprenden al periodo de julio, agosto y septiembre y los más fríos enero y febrero; el promedio de precipitaciones anuales entre 1231-5212 mm. Los meses más lluviosos, noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto; la evaporación media anual oscila entre 1880-7134 mm.

## 1.3 Hidrografía del medio y su impacto antrópico

### 1.3.1 Régimen de las lluvias

El análisis de las lluvias donde se emplaza la presa de colas fue llevado a cabo sobre los registros diarios de la estación El Sitio en 24 horas (Cesigma, 2000). Para la determinación de los valores de diseño se tomaron en cuenta los eventos extremos ocurridos en el territorio de Moa, tales como:

- En noviembre 1996 ocurren precipitaciones de 722 mm en un período de 48 horas y 140 mm que caen durante unos 90 minutos.
- En enero de 1998 una tormenta causó 690 mm de lluvia durante un período de 12 horas.

El río Moa, a lo largo de su recorrido, presenta un cauce bien definido y en los periodos de intensas lluvias se producen inundaciones, con un aporte considerable de sedimentos. El incremento de la humedad incide en la disminución de la resistencia al cortante de los suelos de cimentación de la presa y potencia la licuación del medio en caso de sismos de gran intensidad.



Las actividades antrópicas en el valle del río, la construcción de la presa de colas de la ECPSA, la carretera del puerto hacia Baracoa, la presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECECG) estrangulan el flujo del río Moa y el Cabañas (Foto 4), haciéndolos retroceder lo que potencia el efecto erosivo sobre los taludes de la presa de colas de la ECPSA (Hernández, T. 2015).



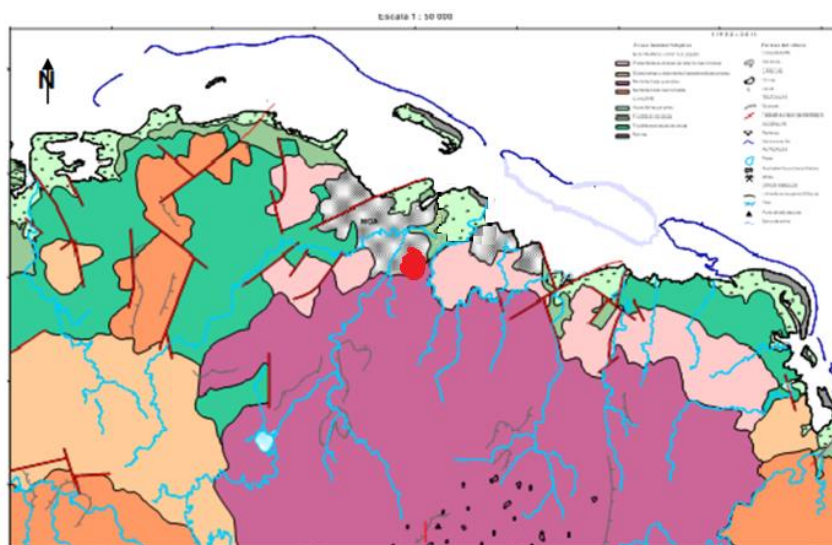
**Foto 4** Hidrografía del medio y el impacto antrópico, tomado de Hernández, T. 2015.

### 1.3.2 Escurrimiento superficial

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, que cortan los estratos de aluviales de la base de la presa de colas, y una erosión vertical y horizontal que acelera el proceso de degradación del material que forma el talud, arriesgándose la integridad física del dique de contención, lo que provoca un peligro potencial de deslizamiento por la degradación del material ante la acción del agua.

## 1.4 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 7).



**Figura 7** Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998)

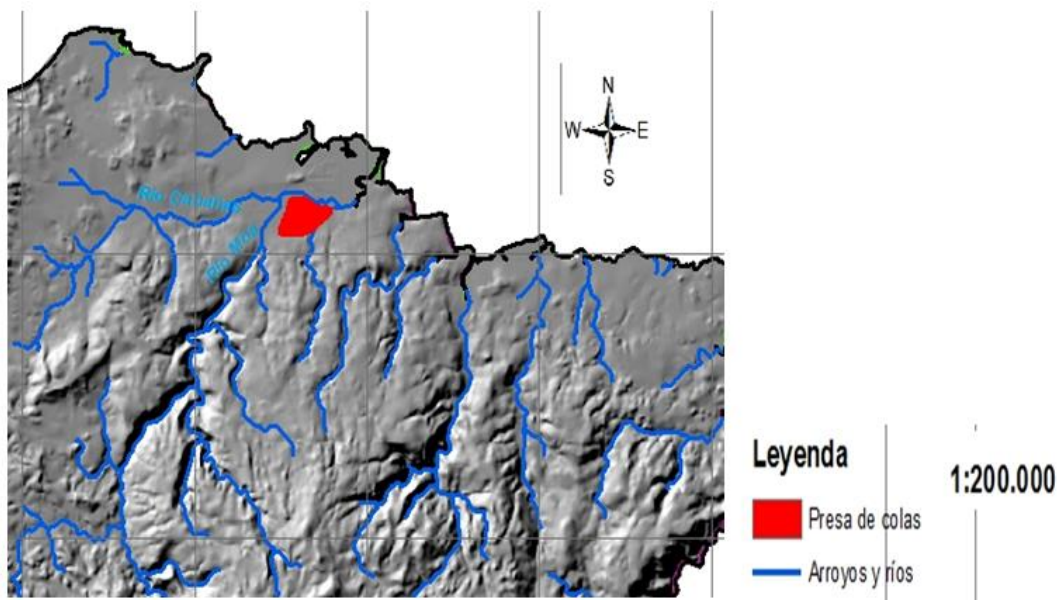
El relieve de Moa y sus áreas adyacentes está clasificado dentro del tipo de Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados (Oliva, G. 1989).

A partir del mapa geomorfológico del Nuevo Atlas Nacional de Cuba se clasificó el territorio en dos zonas geomorfológicas fundamentales: la zona de relieve de llanura y la zona de relieve de montañas, con subtipos específicos que se mencionan a continuación.

- 1) Zona de llanuras,
- 2) Zona de montañas,
- 3) Zona de premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas,
- 4) Zona de submontañas y premontañas ligeramente

diseccionadas, 5) Zona de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas, 6) Zona de montañas bajas diseccionadas (Rodríguez, A. 1998).

La presa de colas se construye sobre el valle aluvial del río Moa, al sur se desarrolla un relieve montañoso con macizos intemperizados y erosionados que están diseccionados por los cauces de los ríos Moa, Cabañas y el arroyo Los Lirios, conformando la red de drenaje principal que tributa hacia la zona de estudio (Figura 8). La presa se edifica sobre la llanura fluvial de los ríos Cabañas, Moa y arroyo Los Lirios. En esta zona ocurre la transición gradual de la llanura aluvial acumulativa y erosivo-acumulativa a las montañas bajas, como ocurre en la parte nordeste del área de la mina Moa, se caracteriza por presentar elevaciones de poca altura y aplanadas por los propios procesos denudativos, dentro de los cuales predomina la erosión por arrastre de las aguas superficiales y subterráneas. Para esta zona las pendientes alcanzan hasta el 12°.



**Figura 8** Mapa sombreado del relieve e hidrografía

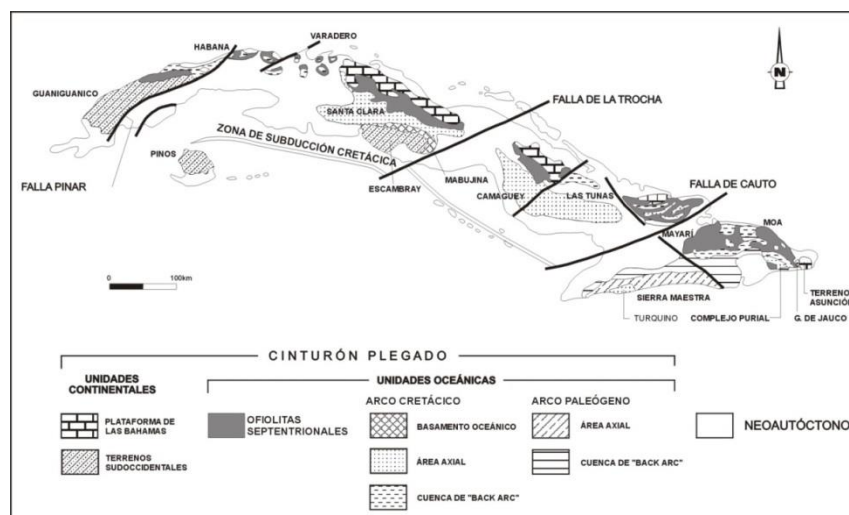
## 1.5 Geología de la región

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 paleogeográficas 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).

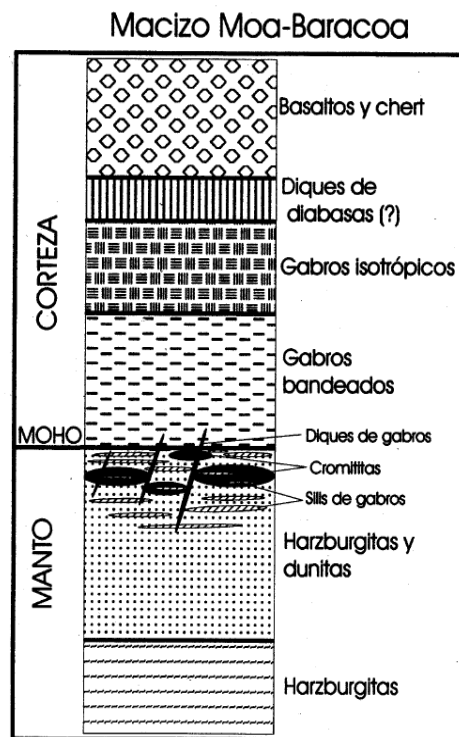


**Figura 9** Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996)

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 paleogeográficamente entre el margen Cretácico de la plataforma de Bahamas y el arco volcánico de las antillas, los afloramientos están separados en tres complejos: Mayari Cristal, Moa Baracoa, Sierra del Convento (Iturralde-Vinent, M.A. 1996).

El complejo ofiolítico Moa Baracoa ocupa un área de 1500 km<sup>2</sup>, 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).

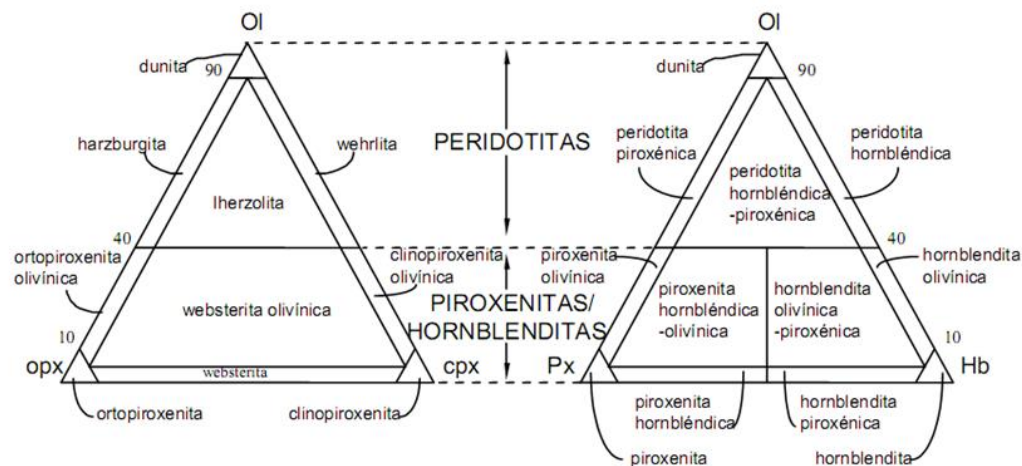


**Figura 10** Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baraco según Proenza, J. 1998.

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, (Figura 11). El complejo ultramáfico se ha datado con una edad de Jurásico-Cretácico Temprano (Iturralde-Vinent, M.A. 1996). Se considera que las rocas ultramáficas serpentinizadas presentan



un espesor superior a los 1000 m, en forma de escamas tectónicas muy fracturadas (Fonseca et al., 1985).



**Figura 11** Diagrama de Streckeisen, 1976

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:

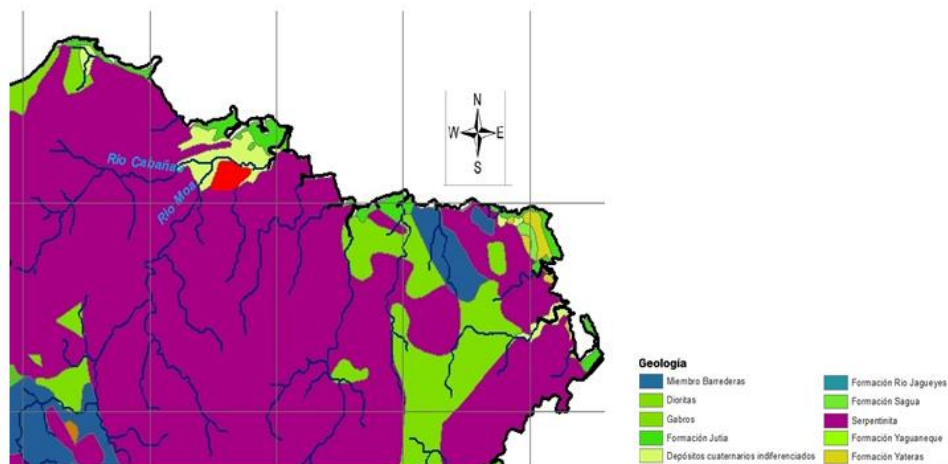
- OICP: Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (Ferricrete and limonitic overburden)
- Ol: Zona de ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas (laterite rouge, limonite)
- OEF: Zona de ocres estructurales finales (ferruginous saprolite, saprolite fine, laterite jaune)
- OEI: 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)

### 1.5.1. 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 12) 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 parálicas y en las desembocaduras y cauces de los ríos sobre llanuras irregulares.

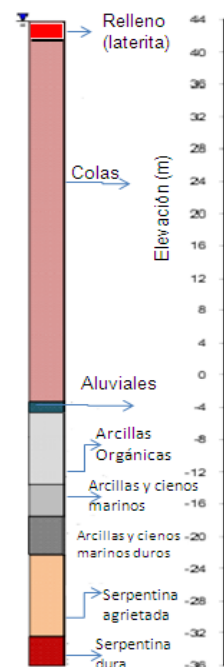


**Figura 12** Esquema geológico del área de estudio. Modificado de IGP, 2001

La realización de investigaciones geotécnicas en los años 1996 hasta 2011 ha permitido caracterizar los materiales que conforman la cimentación, los cuales se corresponden con los sedimentos del valle aluvial del río Moa y arroyo Los Lirios y los sedimentos del cuaternario (Figura 13).

En la columna estratigráfica de la presa de colas, se puede observar la presencia de lateritas y colas como parte del perfil producto de la actividad antrópica. Las lateritas se caracterizan por ocres inestructurales con perdigones, arcilloso – limoso - arenoso color rojizo a marrón, de plasticidad de media a alta, alcanza altos niveles de compactación.

Las colas o residuos del proceso minero metalúrgico alcanzan un espesor mayor de 30 metros de granulometría fina, limo arcilloso, color rojizo, saturado, de baja plasticidad e inorgánico.



**Figura 13** Columna estratigráfica del área de la presa de colas.

Sedimentos aluviales: varía de 1 a 10 metros de espesor. Granulometría de fina a mediana, suelos arenosos arcillosos. El color varía desde rojizo marrón a gris verdoso, humedad media alta, plasticidad de media a alta. Material proveniente de la redeposición del río Moa y Cabañas y demás ríos y arroyos.



Arcillas orgánicas: Este estrato posee un espesor de 1 a 12 metros, suelo arcilloso con material orgánico muy plástico de alta humedad, se concentra fundamentalmente hacia la parte noroeste de la presa de colas, el color varía de gris oscuro a verde, posee una alta plasticidad.

Arcillas y cienos marinos: Depósitos producto de las redeposiciones de sedimentos del río Moa. Suelo arcilloso con alto contenido de material orgánico, muy húmedo, plástico. Poseen un espesor de 1 a 20 metros, contienen materia orgánica, el color varía de rojizo a marrón, la plasticidad es de media a alta.

Serpentina agrietada: Roca de color azul verdoso y tonos blancos intensamente meteorizada con fuerte agrietamiento caóticamente distribuido, las grietas generalmente rellenas de MgO, de baja resistencia, y alto grado de humedad.

Serpentina dura: Roca serpentínica de color azul verdoso, poco meteorizada, con escaso agrietamiento, de resistencia media, las grietas de 1mm de espesor rellenas de MgO.

Las labores de explotación minera hacia el sur de la presa en el yacimiento Moa Oriental, han permitido corroborar una composición del basamento eminentemente harzburgítica.

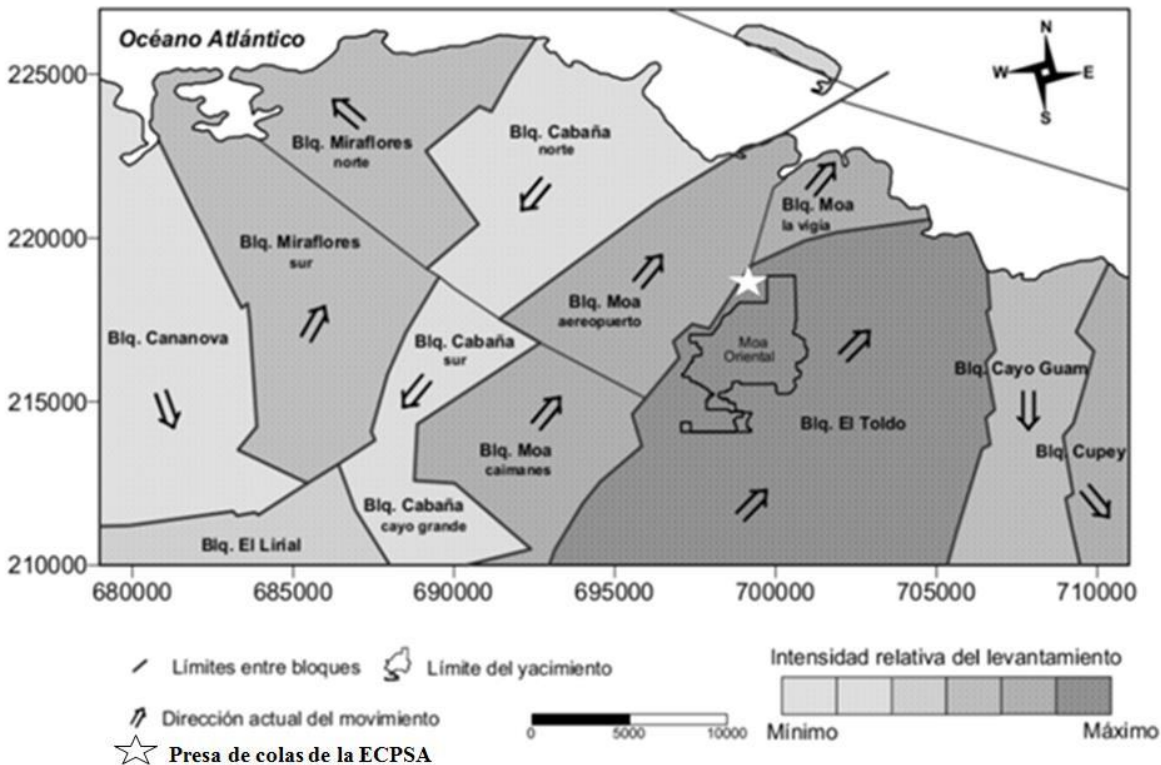
## **1.6 Tectónica del área de estudio**

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.

La presa de colas se encuentra ubicada dentro del bloque morfotectónico El Toldo (Rodríguez, A. 1998). Este bloque es uno de los más extensos de la región, posee valores máximos de ascenso relativo (Figura 14) y está formado por rocas ultramáficas y máficas

de la secuencia ofiolítica. El relieve que la circunda es de montañas bajas con cimas aplanadas, ligeramente diseccionadas.



**Figura 14** Mapa de bloques morfotectónicos de la región de Moa (tomado de Rodríguez, A. 1998).

La presa de colas se encuentra afectada por la falla Moa, es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, haciéndose más recta hacia el norte con una dirección de N48°E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N25°W.

En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N35°E denominado La Vigía y el otro de rumbo N74°E nombrado La Veguita, que atraviesa la zona marina perilitoral, hasta cortar la barrera arrecifal a la cual limita y afecta, pues en el bloque oriental de la falla la barrera como tal desaparece, quedando reflejada sólo como un banco de arenas, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos (Rodríguez, A. 1998).

## 1.7 Sismicidad del área de estudio

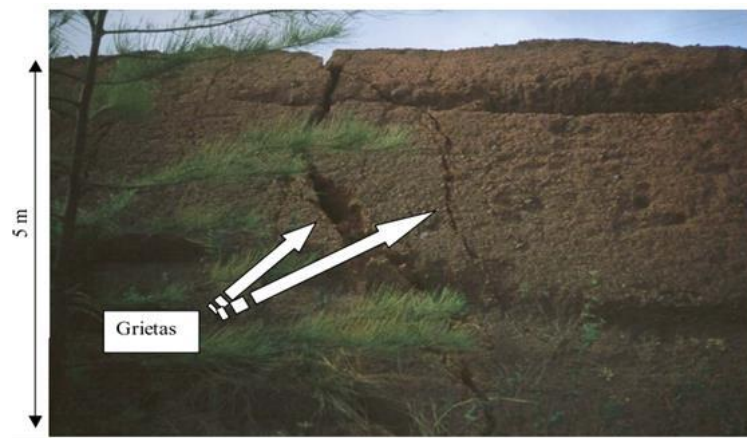
Aunque no se tienen reportes históricos de la ocurrencia de un terremoto fuerte con epicentro en la localidad de Moa, no se niega la posibilidad de su ocurrencia en épocas anteriores, ya que esto puede deberse a la no existencia de una infraestructura socioeconómica y cultural que permitiera el archivo 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 considerarse 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 noreste 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. En la ECPSA provocó afectaciones en el comedor, consistentes en grietas pasantes de paredes, caídas de repellos y

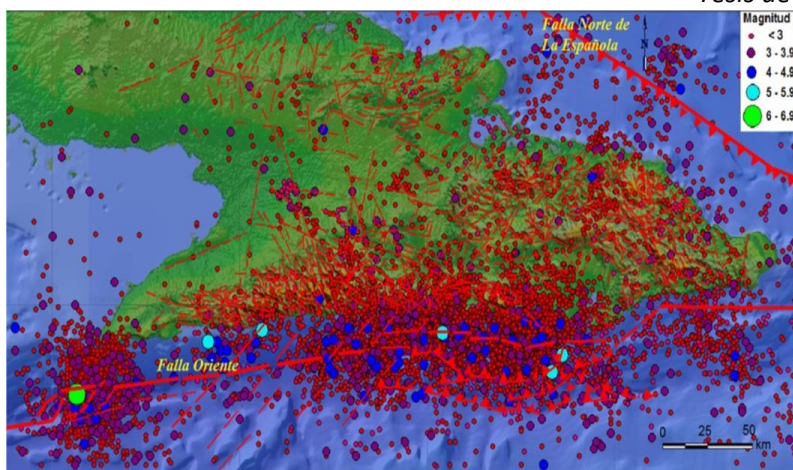
desprendimientos de lámparas. En la parte industrial de la fábrica, no provocó ningún tipo de afectaciones, excepto en la presa de colas inactiva (Foto 5) donde provocó la aparición de grietas en los diques (Guardado y Riverón, 1997, Carménate y Riverón, 1999).



**Foto 5** Grietas en muro de la presa inactiva de Moa, sismo de 1995 (Rodríguez, A. 1998)

En el periodo 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).

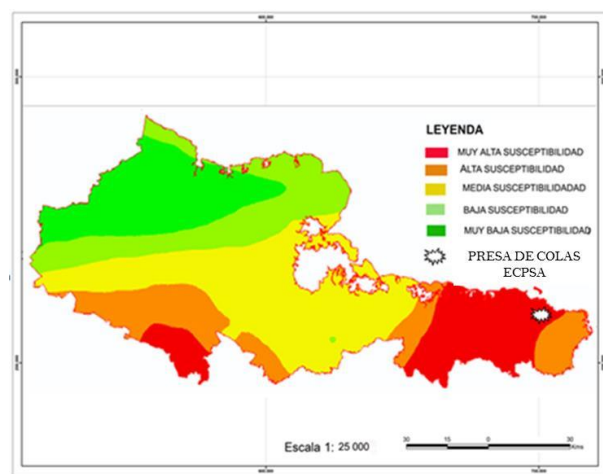
La actividad sísmica después de las series de terremotos de los años 1998-1999 ha continuado de manera significativa en la región del nordeste holguinero, una de las zonas sísmicas del territorio nacional más activas del país, prueba de esto es que durante el año 2005 se registraron un total de 101 sismos, 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 monitoreos de la región oriental y en particular en Moa – Purial hasta el año 2014 reflejan que estas zonas han continuado activas (Figura 15).



**Figura 15** Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014

## 1.8 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 16).



**Figura 16** Vulnerabilidad por deslizamientos de la provincia Holguín (Guardado, R.. y otros 2012)

### **1.8.1 Valores de peligro sísmico determinados para la región de estudio**

Los estudios más recientes sobre el peligro sísmico se corresponden al proyecto Valoración de la amenaza sísmica en la región minera del noreste de Holguín realizado por el CENAIIS, IGP y Geocuba, 2008-2009. En esta investigación se plantea que la estimación del peligro sísmico se basa en el conocimiento de dónde y con qué magnitud y frecuencia ocurren los eventos sísmicos en una región o área determinada, así como se atenúan los efectos de los terremotos desde el foco o hipocentro hasta el sitio en cuestión.

En los estudios realizados por el IGP, CENAIIS y GEOCUBA, 2008-2009, en la región del noreste de Holguín, se pudo corroborar que la zona de mayor actividad sísmica y geodinámica en general se encuentra al Oeste de Moa, donde, tanto los valores de las mediciones de GPS por sus siglas en inglés (global positioning station) como los registros de sismos son más intensos.

Al este de Moa se ponen de manifiesto efectos de distensión, con valores positivos de desplazamiento entre los puntos del polígono. Se verificó de igual manera que en toda el área de Moa donde se encuentran las industrias del níquel existen fallas activas de diferente jerarquía, que aunque no son sismogeneradoras, si pueden causar asentamientos y deformaciones significativas a objetos de obras de estas instalaciones.

Los estimados de peligro sísmico regionales deben tomarse como criterio para los estudios de vulnerabilidad sísmica de cada una de las instalaciones del níquel y la elaboración de los planes de reducción de desastres, así como servir de punto de partida de los estudios para acometer nuevas inversiones en esta región.

La presa de colas posee una red de puntos de control geodésico para el registro de los desplazamientos horizontales o verticales que ocurran, hasta la fecha se ha comprobado que existen asentamientos hacia el noreste en rangos de 0,25 m hasta 0,75 m. El predominio de redes de grietas se desarrolla paralelamente al cauce del arroyo Los Lirios y río Moa, con desplazamientos en la horizontal entre 10 mm hasta 20 mm.

Los desplazamientos horizontales están asociados con la ampliación y construcción de diques sobre el antiguo cauce del arroyo Los Lirios, y el valle aluvial del río Moa. Esta constituye un riesgo para la estabilidad de la presa de colas, lo que ha sido considerado



para el abandono de grandes extensiones de terrenos en esas áreas evadiendo un posible fallo de los diques de contención.

## **1.9 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 físicas – mecánicas y las intensas precipitaciones que ocurren en la zona provoca una fuerte erosión hídrica, laminar y en cárcavas.

## **1.10 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 (Orozco y Rizo, 1998).

## **1.11 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 Sotelo 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.

Existen otras instalaciones de apoyo a la metalurgia y la minería, tales como la Empresa Mecánica del Níquel, Centro de proyectos del Níquel, la Empresa constructora y reparadora del níquel. También existen otros organismos de los cuales depende la economía de la región tales como el establecimiento de la Empresa Geólogo Minera Oriente, la presa Nuevo Mundo, el Tejar de Centeno, el Combinado Lácteo, entre otros. La agricultura se encuentra poco desarrollada aunque se hacen esfuerzos para seguir fomentándola.

### **Conclusiones parciales**

Los estudios de la sismicidad de la provincia de Holguín indican que la presa de colas de la ECPSA se localiza en una zona activa de alta vulnerabilidad para el surgimiento de grandes deslizamientos, clasificada como de muy alta susceptibilidad.

Los suelos de cimentación están constituidos por estratos inestables, areno arcillosos de humedad y plasticidad de media a alta.

En la presa existen asentamientos hacia el noreste en rangos de 0,25 m hasta 0,75 m los que pueden estar asociados con la actividad sísmica reportada en el área.



## **CAPÍTULO II ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE SEGURIDAD**

### **2.0 Introducción**

La modelación de los escenarios de seguridad permite evaluar el nivel de cumplimiento de los parámetros de diseño de la presa. El nivel de riesgo se puede determinar por el comportamiento de los indicadores de fallo.

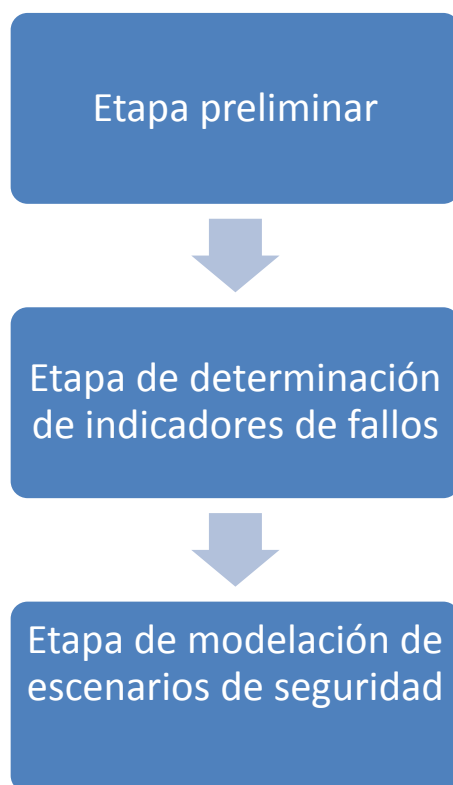
Los indicadores cuantitativos y cualitativos que señalan el nivel de alguna característica de un sistema, permiten evaluar la seguridad en un momento determinado y su progreso en el tiempo; tanto en elementos diferenciados, como en el conjunto de la obra.

El estudio de los principales mecanismos de fallos para presas de colas y el análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros, permiten comprender las situaciones y fenómenos que afectan las condiciones de seguridad de estas obras. A través de dicho análisis se establecen los principales indicadores de fallos, los cuales manifiestan la aparición de dichos fenómenos y permiten evaluar su intensidad.

La modelación se realiza evaluando el comportamiento de estos indicadores a través del sistema de monitoreo existente en la presa de colas.

### **2.1 Etapas de la investigación**

La presente investigación, para la modelación de escenarios de seguridad, se dividió en tres etapas principales (Figura 17)



**Figura 17** Organigrama de las etapas de trabajo.

### 2.1.1 Etapa preliminar.

#### Consulta documental

La información sobre esta temática es escasa y muy fraccionada, en esta etapa se revisó la información disponible: informes proyectos y técnicos, reportes de averías, guías técnicas, tesis doctorales, regulaciones ambientales y de seguridad, entre otros artículos relacionados con la temática de presas de colas.

#### Inspección de campo

La inspección de campo favorece la determinación del estado actualizado de la presa de colas, a través del control visual de la obra. Proporciona una caracterización, al menos cualitativa, de la desviación de los parámetros de control con respecto a los de diseño de la instalación. La evaluación cuantitativa de estos parámetros se realiza a través de la medición y control de instrumentos que evalúan más allá del límite de la inspección visual.

En esta etapa de la investigación se realizó un diagnóstico de las condiciones geotécnicas, ambientales, geológicas, contexto de la construcción, operación de mantenimiento y futuro cierre de la obra.

### **Análisis de laboratorio**

Los trabajos de control de calidad durante la construcción, operación y cierre de la presa de colas se realiza a través de un sistema de muestreo de los materiales de construcción para su procesamiento en laboratorio, así como un monitoreo in situ a través del empleo de densímetros electrónicos. Los resultados de las propiedades físico-mecánicas de los materiales y colas evaluadas fueron recopilados de los trabajos ejecutados durante la investigación de la presa.

Las propiedades físico-mecánicas de los suelos y colas evaluadas se determinaron a través de métodos in situ, Cone Penetration Test (CPT) y Standard Penetration Test (SPT), (Foto 6). Las pruebas de laboratorio se orientaron a la determinación de los siguientes parámetros: límites de plasticidad, distribución granulométrica, resistencia cortante, cohesión, ángulo de fricción interna, densidad, peso específico, compactación, permeabilidad, licuefacción, módulo de deformación y humedad; considerando los valores permisible en la construcción de los diques.



**Foto 6** Perforaciones tipo SPT y CPT en la presa de colas

## **Gabinete**

Se realiza el procesamiento de la información obtenida en las etapas anteriores, sobre los mecanismos de fallos lográndose un análisis del comportamiento de la presa, verificando el nivel de cumplimiento de los parámetros constructivos de los diferentes proyectos con respecto al comportamiento real de los mismos durante la construcción, operación y cierre.

La elaboración del mapa topográfico de la presa se realizó utilizando el software Surfer-12 y las modificaciones realizadas al mapa geológico y de relieve se realizaron utilizando el sistema de información geográfico ArcGis.

### **2.1.2 Etapa de determinación de los indicadores de fallo**

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.

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, empleando para el efecto un nivel de peligro

acorde con la normativa vigente, y evaluando en términos relativos el riesgo resultante con respecto a lo que se esperaría si cumpliera con las normas.

Los indicadores de fallos propuestos, de forma general, son:

1. Hidrogeológicos
2. Normas de explotación
3. Operaciones del drenaje
4. Detección de fenómenos estáticos y dinámicos
5. Erosión y deslizamientos
6. Sismos

La aplicación principal de un sistema de indicadores de fallos se orienta a reflejar o valorar aspectos de los peligros, la vulnerabilidad y el riesgo en un área geográfica, que puede ser un país, una región o una obra.

### **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 selección de los indicadores de fallo que definen el proceso de modelación a realizarse en una determinada región o estructura.

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). El proyecto considera la construcción con talud interior en la vertical y horizontal de V-1:H-1.5; y el talud exterior V-1:H-3). La influencia de la pendiente sobre el desarrollo de fallos, se determina

comparando el estado de los taludes cuando se incumple con lo establecido en los criterios del diseño constructivo.

Factor 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 geotécnico: Se corresponde con las propiedades geotécnicas de los suelos y colas. La información relacionada con estas propiedades se obtiene a través de los ensayos realizados en campañas de investigaciones de campo, in situ (SPT y CPT), y pruebas de laboratorio, con el objetivo de determinar las propiedades físico-mecánicas para los análisis de estabilidad y diseño de taludes. Los ensayos realizados fueron los siguientes: humedad, límites de plasticidad, peso específico, distribución granulométrica, compactación, permeabilidad, licuefacción, deformabilidad y resistencia al cortante.

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 según los siguientes indicadores: redes técnicas donde se tomará en consideración los tipos de conducción de las aguas y las colas.

La caracterización de los indicadores de fallos permite realizar una evaluación de los riesgos en dependencia del nivel de cumplimiento o no de los parámetros de diseño de los proyectos constructivos.

### **2.1.3 Etapa de modelación de escenarios de seguridad o de riesgos**

El modelo científico es un instrumento de trabajo que supone una aproximación intuitiva a la realidad y que tiene por función básica la de ayudar a comprender las teorías y las leyes. La aplicación del método de la modelación está íntimamente relacionada con la necesidad de encontrar un reflejo mediatizado de la realidad objetiva. De hecho el modelo constituye un eslabón intermedio entre el sujeto (investigador) y el objeto de investigación. La modelación es el método mediante el cual se pueden crear abstracciones con vistas a explicar la realidad (Pérez, G. 1996).

El proceso de modelación de decisiones y eventos inciertos brinda una visión de conjunto de la situación que el decisor enfrenta, y facilita la cuantificación probabilística de consecuencias; esto es de gran utilidad para la toma de decisiones.

Sin embargo, para que la modelación aporte el máximo valor para la organización, es necesario verificar que se está abordando el problema correcto, que se han identificado todos los objetivos clave y que se han generado alternativas creativas y valiosas para alcanzar dichos objetivos. Esto, junto con la identificación de los indicadores de fallos más relevantes, son tareas indispensables para potenciar el valor de la modelación.

El modelo que se emplea es el teórico, este permite representar las características y relaciones fundamentales de la presa de colas, proporcionar explicaciones y servir como guía para generar hipótesis teóricas.

Los escenarios de seguridad: son análisis de las dimensiones del riesgo, presentado en forma escrita, cartográfica o diagramada; utilizando técnicas cuantitativas y cualitativas, de la magnitud del riesgo que afecta a territorios y grupos sociales determinados. Significa una consideración pormenorizada de las peligros y vulnerabilidades y, como metodología, ofrece una base para la toma de decisiones sobre la intervención en reducción, revisión y control de riesgo (Lavell, A., y Cardona O., y Mansilla E., 2003).

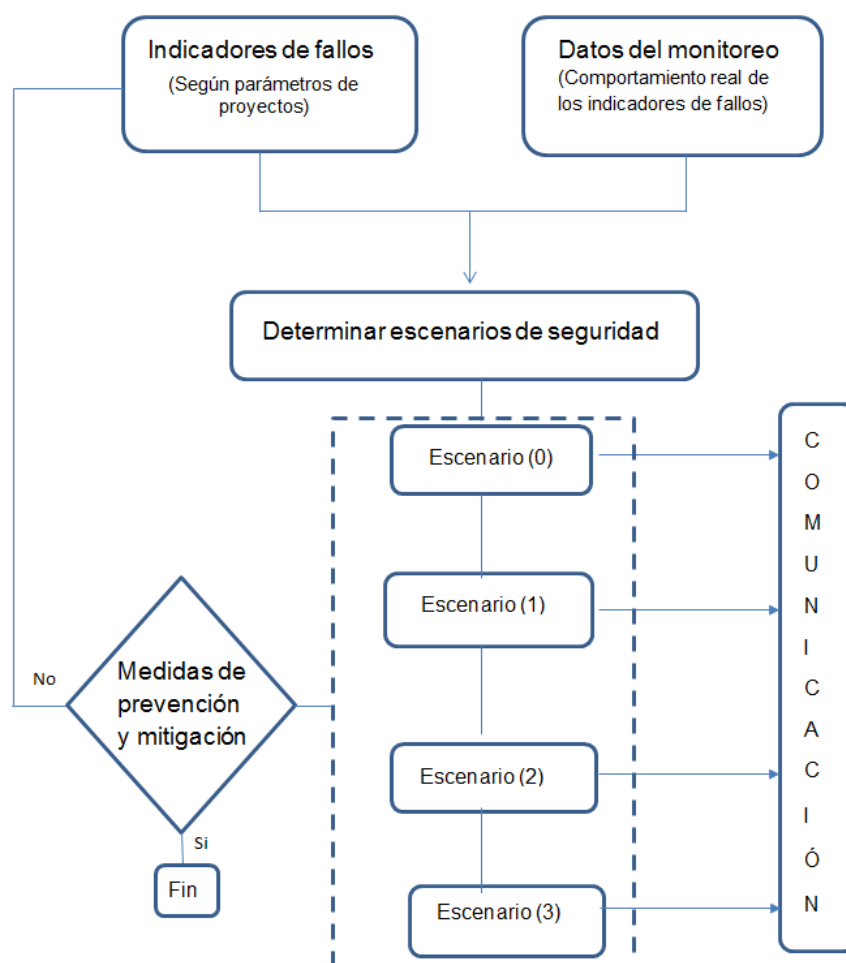
Escenarios de seguridad: es parte de un análisis de la seguridad, estableciendo en primer lugar las posibles causas desencadenantes de una eventual rotura o de un mal funcionamiento. Se establecen los posibles indicadores de la presentación o no de dichas causas y finalmente se determinan los diferentes escenarios en dependencia del comportamiento de cada indicador.

Para la modelación de escenarios de seguridad para presa de colas se proponen cuatro tipos de escenarios de seguridad, los cuales son:

1. Escenario de seguridad (0): las condiciones existentes y las previsiones indican una intensificación del monitoreo de la presa de colas, no requiriéndose la ejecución de medidas correctivas para eliminar riesgos.
2. Escenario de seguridad (1): se han producido acontecimientos que de no aplicarse medidas correctoras podrían ocasionar peligros de averías graves o rotura de la presa, existiendo los recursos para enfrentar los peligros que se presenten.
3. Escenario de seguridad (2): existe peligro de rotura o avería grave de la presa y no puede asegurarse con certeza que la situación pueda controlada, mediante los recursos existentes.
4. Escenario de seguridad (3): la probabilidad de rotura de la presa es elevada o ésta ya ha comenzado, resultando inevitable que se produzca el derrame de colas sobre el medio.

La decisión de declarar uno u otro tipo de escenario se realiza sobre la base de la evaluación de los indicadores de fallos de la presa de colas. El proceso de modelación se muestra en la Figura 18.





**Figura 18** Organigrama para la modelación de escenarios de seguridad.

El escenario de seguridad, describe y permite identificar el tipo de daño y pérdidas que pueden generarse en caso de presentarse un evento peligroso en unas condiciones dadas de vulnerabilidad.

## Comunicación

El fin de una estrategia de comunicación de riesgos es tomar acciones sobre las situaciones desencadenantes, en cualquiera de las etapas de una emergencia o desastre, para evitar o mitigar al máximo sus efectos negativos o su expansión.

La aplicación de la estrategia estará a cargo de un equipo capacitado para coordinar de manera permanente las actividades planificadas y su ejecución, (Brennan, B. 2011); evitando que se dupliquen los esfuerzos cada vez que ocurre algún evento.

## **Monitoreo**

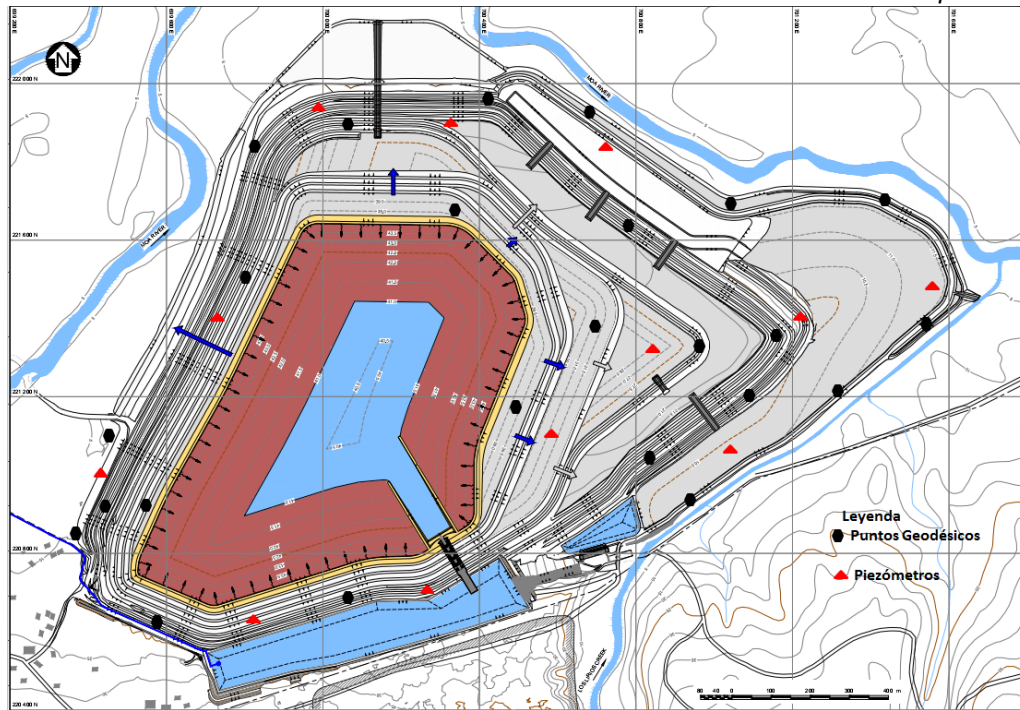
En esta etapa se realiza una sincronización entre los métodos de control de supervisión y los registros de los instrumentos u otros medios de monitoreo, tales como: piezómetros, pozos hidrológicos, puntos geodésicos, estaciones sismológicas.

Los resultados del sistema de monitoreo forman parte del Sistema de Alerta Temprana (SAT).

### **Sistema de monitoreo de la presa de colas de la ECPSA**

El sistema de monitoreo consiste en un sistema de instrumentos y de inspecciones (ver Figura 19), los cuales aseguran el funcionamiento adecuado del Sistema de Alerta Temprana de la empresa y el sistema de aviso para el territorio, el mismo consta de:

- Red de piezómetros
- Sistema de puntos de control geodésico
- Pozos hidrogeológicos para el control de la calidad del agua en los perímetros de la presa, con el objetivo de definir infiltraciones de agua ácida hacia el exterior
- Observaciones directas de personal especializado, con el objetivo de detectar posibles evidencias que puedan conllevar a la aparición de riesgos en la presa de colas
- Controles diarios del sistema de distribución de las colas
- Controles de las pérdidas de suelo por erosión a través de un sistema de levantamiento satelital
- Puntos de control del nivel de los ríos Moa y Cabañas.



**Figura 19** Sistema de monitoreo de la presa de colas de la ECPSA. Tomado de Hernández, T. 2015.

### Conclusiones parciales

1. Los principales modos de fallos históricos a nivel mundial en las presas de colas del tipo “aguas arriba” son: 1) deslizamiento del talud, 2) sismo, y 3) sobrepaso de agua, existe una similitud con los registros de las roturas ocurridas en la presa de colas de la ECPSA
2. La definición de un sistema de indicadores de fallos permite definir el nivel de seguridad que poseen las presas de colas, lo que permite tomar las medidas de prevención requeridas ante la los riesgos
3. La modelación de escenarios de seguridad para las presas de colas asegura el diseño de planes de emergencia concretos de carácter proactivo.

## **CAPÍTULO III. ESCENARIOS DE SEGURIDAD PARA PRESAS DE COLAS, CASO DE ESTUDIO: PRESA DE COLAS DE LA ECPSA**

### **3.0 Introducción**

El proceso de modelación de escenarios de seguridad se realiza tomando como referencia las etapas de trabajo establecidos en la investigación. La elaboración de un Plan de emergencia para la presa de colas de la ECPSA no ha sido posible, dada la ausencia de un sistema de modelación de escenarios de seguridad.

Este hecho, hace palpable que los niveles de incertidumbre ante la ocurrencia de posibles fallos sean elevados. El objetivo del presente capítulo es realizar la modelación de los diferentes escenarios de seguridad para la presa de colas.

### **3.1 Resultados de las etapas de trabajo**

La consulta bibliográfica permitió conocer las condiciones actuales de la presa con respecto a los parámetros de diseño de los proyectos de la obra, además de confirmar la no existencia de la modelación de escenarios de seguridad.

La seguridad de la obra ante la acción de los diferentes peligros presenta una mayor vulnerabilidad, considerando la situación actual de la presa con relación a su construcción, manejo hidrológico, operaciones y cierre. Esto hecho está argumentado en los diferentes reportes de averías, donde se refleja entre otros aspectos el manejo inadecuado de las aguas y las colas.

En el mapa topográfico se puede observar la complejidad de la obra, al alcanzar más de 40 m de altura; clasificando como una gran presa según los códigos internacionales, (ver anexo 2).

La inspección de campo permitió identificar la existencia en la presa de colas de un proceso erosivo intenso con la presencia de diversos surcos y cárcavas, debido a la no aplicación de una adecuada protección de los taludes. La ausencia de aliviaderos para el control de las aguas pluviales ha provocado procesos erosivos muy intensos, constituyendo peligros que amenazan la seguridad de la presa.

La distribución de las colas depositadas se realiza incumpliendo los requerimientos de diseño de los proyectos. La colocación de las colas de forma inadecuada impide que exista una distribución granulométrica acorde a los parámetros de diseño establecidos, lo que induce a inestabilidades en los diques contruidos sobre las colas. Adicionalmente esto provoca una disminución del borde libre de la presa de colas, incrementando la probabilidad de ocurrencia de sobrepasos e inseguridad de los diques ante la caída de intensas lluvias.

El manejo de las aguas dentro de la presa es de vital importancia en la estabilidad de la misma, actualmente existe un manejo inadecuado de las aguas dentro de la presa. El espejo de las aguas se ubica contra los diques perimetrales causando un sobrepeso por la humedad en los taludes de los diques, lo que acelera la ocurrencia de deslizamientos.

El análisis de los resultados de laboratorio demuestra que los valores de la cohesión y la resistencia son más bajos en los sectores norte y el este de la presa de colas. El manto freático se encuentra muy cerca de la superficie entre 0.5 m a 1.0 m.

Los análisis geotécnicos de plasticidad realizados indican que las colas estudiadas se clasifican como suelos combinados que poseen índices de plasticidad entre 4 y 7 (CL-ML), las muestras corresponden con limos arcillosos de baja plasticidad.

### **3.2 Elementos en riesgo ante fallos de la presa de colas**

La presa de colas se encuentra ubicada próxima a una zona habitada y a diferentes infraestructuras de importancia economía y medio ambiental. La importancia de eliminar los posibles daños que puede ocasionar su fallo sobre la población, las instalaciones y el medio ambiente son analizados mediante los elementos en riesgo siguientes:

Población: se analiza que la presa de colas limita hacia el suroeste con la comunidad La Veguita, este asentamiento posee un total de 214 viviendas, y existen seis de ellas están ubicadas a menos de 100 m del dique inicial de la presa de colas. El sector oeste de la presa limita con fincas destinadas al uso agrícola.

Instalaciones: se valoró la existencia de varias instalaciones como la tubería conductora de agua de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECECG), proveniente de la derivadora localizada próxima al río Moa.

La estación de bombeo de agua de recirculación de la presa hacia la planta de lavaderos, las redes eléctricas y de comunicaciones de la ECPSA. Otras instalaciones de vital importancia se relacionan con los pozos de abasto de agua a la población y los diferentes caminos mineros y de acceso al poblado La Veguita.

Medio ambiente: Se evaluó las probabilidades de los daños sobre los ríos Moa, Cabañas y el arroyo Los Lirios; además de la contaminación al suelo, las aguas subterráneas, la flora y fauna.

### **3.3 Factores de inestabilidad en la presa de colas**

La inestabilidad de los materiales de construcción de los diques que componen los cimientos y las colas que sirven de base a parte de los diques superiores, está condicionada al comportamiento de los factores condicionantes y disparadores de los peligros cuando actúan sobre los mismos.

Los factores condicionantes se relacionan con la tectónica, topografía, aguas subterráneas, alteración de los materiales o degradación mecánica.

Los factores detonantes en las presas de colas pueden ser eventos naturales: lluvias, sismos, erosión, deslizamientos, licuefacción; o artificiales como los cortes, rellenos, deforestación y operaciones durante la construcción.

En el análisis de todos estos factores se tiene en cuenta la influencia del cambio climático, intensidad de las lluvias, inundaciones y periodicidad de los eventos meteorológicos. La interrelación de estos factores naturales con la acción antrópica presente en el área de estudio, son importantes durante la evaluación de los posibles fallos.

Las propiedades físico mecánicas de la presa de colas dependen fundamentalmente de la forma de la deposición de las colas, éstas permiten comprender cómo responderá bajo la acción de una carga, la infiltración o de los movimientos sísmicos.

### **3.4 Propuesta de indicadores de fallos para la presa de colas de la ECPSA**

Los indicadores de fallos se seleccionaron en dependencia de las características propias de la presa de colas de la ECPSA y del comportamiento histórico de la seguridad, (ver anexo 1). Los indicadores determinados se muestran seguidamente:

#### **1. Indicadores hidrogeológicos**

- Lluvias intensas
- Altura de la columna de agua en los pozos hidrogeológicos
- Presión de poros

#### **2. Indicadores de las normas de explotación**

- Niveles de compactación en dique
- Filtraciones
- Altura del borde libre
- Ubicación del espejo de agua en el vaso

#### **3. Indicadores de operación de drenaje**

- Funcionamiento de drenajes
- Escurrimiento superficial
- Caudal del agua en los drenes

#### **4. Indicadores de detección de fenómenos dinámicos y estáticos**

- Desplazamientos verticales y horizontales (los movimientos se registrarán según el sistema de monitoreo establecido)
- Licuefacción
- Agrietamientos

#### **5. Indicadores de deslizamientos**

- Agrietamientos
- Erosión

#### **6. Sismos**

### **3.6 Descripción del escenario de seguridad actual de la presa de colas de la ECPSA, según los indicadores de fallos**

La modelación de la presa de colas se realizó partiendo del escenario actual de cada indicador, los cuales se detallan a continuación:

#### **3.6.1 Indicadores hidrogeológicos**

##### ***Lluvias intensas***

El indicador lluvias intensas se considera como un evento disparador, evaluado a través de los niveles de agua en la playa, medidos por los pluviómetros instalados en la presa. Las mediciones muestran valores de 969 mm/24h. Atendiendo a este indicador la presa se ubica en el escenario de seguridad (0), por lo que se recomienda mantener la inspección visual y el monitoreo de los instrumentos.

##### ***Altura de la columna de agua en los pozos hidrogeológicos***

La altura de la columna de agua en los pozos hidrológicos y piezómetros se encuentra por debajo de la altura promedio histórica, ubicándose en el escenario de seguridad (0). El monitoreo de este indicador debe incrementarse durante la ocurrencia de intensas lluvias o el incremento del volumen de agua dentro de la presa.

##### ***Presión de poros***

La presión de poros es monitoreada a través de los piezómetros, actualmente no se puede establecer el escenario de seguridad en que se encuentra la presa de acuerdo a este indicador. Esto se debe a las acciones vandálicas que provocaron la desactivación de la red de piezómetros, no existiendo una data histórica que permita evaluar el indicador. La instalación reciente de una red de piezómetros compuesta por 33 instrumentos, permitirán obtener datos para futuros análisis.



### 3.6.2 Indicadores de las normas de explotación

#### ***Niveles de compactación en los diques***

El indicador niveles de compactación en los diques se controla mediante métodos in situ y de muestreo. Actualmente se encuentra en un escenario de seguridad (0), con un valor mayor del 98 %, se recomienda mantener la inspección visual y el monitoreo.

#### ***Filtraciones***

El indicador filtraciones está asociado a la existencia de salidas de agua en los taludes de los diques perimetrales. El avance de los niveles de humedad se monitorea mediante las inspecciones visuales. Atendiendo a este indicador la presa se ubica en un escenario de seguridad (1), debido a que durante la inspección de campo se identificó que la presencia de humedad ocupa alrededor del 25 % del talud del dique. Esto sugiere un incremento del monitoreo de los instrumentos activando el Sistema de Alerta temprana de la ECPSA.

Las filtraciones están asociadas a una compactación inadecuada de los diques con existencia de fisuras o averías en los sistemas de drenaje. En un escenario de seguridad (0), si existe un acercamiento del nivel freático al talud de la presa, las aguas serán encausadas a través del sistema de drenaje; es decir una correcta compactación del dique impide que las aguas sean filtradas a través él.

Al encontrarse la presa en un escenario de seguridad (1) de acuerdo a este indicador, es necesario que las actividades de recrecimiento, (ver Foto 7) de los diques se detengan para el sector donde se reportan las filtraciones y cambiar el área de descargas de las colas hacia otro sector menos vulnerable.



**Foto 7** Proceso de construcción de la presa de colas de la ECPSA

La construcción de canalizaciones interiores es indispensable en los sectores afectados, para encauzar las aguas del escurrimiento hacia otras zonas más secas de la presa y alejarlas de las filtraciones. En los sectores que disminuyan los niveles de humedad se debe comenzar la aplicación de técnicas de sellaje al talud, (ver Foto 8) y comenzar las reparaciones necesarias a los sistemas de drenaje.



**Foto 8** Sellaje al talud utilizando protección química, tomado de Hernández T. 2015

### ***Altura del borde libre***

El indicador altura del borde libre representa la separación que debe existir entre las colas y el borde de los diques. El incumplimiento de los límites permisibles incrementa la

probabilidad de sobrepaso (Foto 10), en caso de aumento del volumen de agua en la presa o desplazamientos del espejo de agua hacia los diques.

La presa, según este indicador, se encuentra en el escenario de seguridad (2), con un valor menor de 30-20 cm de separación entre las colas y la altura del dique. Esta situación se debe principalmente a que la presa se encuentra cercana al límite de capacidad de recepción de colas, con una altura máxima de 44 m sobre el nivel medio del mar; por el momento no se cuenta con la construcción de otra presa o ampliación de la existente.

Este hecho, indica la necesidad de un incremento de la inspección visual y el monitoreo de los instrumentos de medición; se debe activar el Sistema de Alerta Temprana de la ECPSA y el municipio. En este caso, es preciso el aumento del volumen del drenaje de la playa hacia la piscina sur (Foto 9), para disminuir el volumen de embalse del agua dentro de la presa. Además se debe cambiar el área de descarga de las colas hacia otro sector donde la altura del borde libre sea superior.



**Foto 9** Estructura que almacena el agua de la presa de colas piscina sur

La realización de ajustes al diseño del proyecto de la presa debe dar respuesta a esta situación. La posibilidad de la ampliación de la presa pudiera contribuir con el proceso de descarga de colas dentro de los parámetros del escenario de seguridad (0).



**Foto 10** Fenómeno de sobrepaso por intensas lluvias en la presa de colas de la ECPSA.

### ***Ubicación del espejo de agua en el vaso de la presa***

El espejo de agua debe estar ubicado hacia la parte central del vaso de la presa, su desplazamiento hacia el perímetro de la presa provoca una sobrecarga sobre el talud, por el exceso de la humedad. El incremento de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos puede estar presente si existe una combinación de la sobrecarga con factores disparadores, como por ejemplo la ocurrencia de intensas lluvias o un sismo.

Atendiendo a este indicador actualmente la presa se encuentra en un escenario de seguridad (2), existiendo un contacto parcial del espejo de agua con el dique perimetral. Esta situación está provocada dado que la descarga de las colas no se está realizando por el perímetro de la presa según el diseño.

La descarga de las colas por spigots, ubicados en el perímetro de la presa, permite que se realice de manera natural una clasificación granulométrica, ubicándose los depósitos más gruesos en el perímetro y los más finos hacia la parte central, facilitando el control de la permeabilidad dentro de la presa.

La permeabilidad debe ir aumentando de adentro hacia afuera, para facilitar la ubicación del espejo del agua hacia el centro de la presa. El estado actual de la presa no cumple estas especificaciones porque el vertido se está realizando por punta, es decir, las colas se están vertiendo por punta, impidiendo la clasificación granulométrica.

### 3.6.3 Indicadores de operación de drenaje

#### ***Funcionamiento de drenajes***

El indicador se evalúa a través del comportamiento del sistema de drenaje constituido por: drenes (Foto 12), canales, tuberías de decantación y aliviaderos. La presa, según este indicador se encuentra en el escenario de seguridad (1). Actualmente existe un mal funcionamiento del drenaje de las aguas pluviales, producto a la no construcción de varios aliviaderos diseñados para estos fines. La presa cuenta con un aliviadero principal de emergencia (Foto 11) y dos para control de las aguas pluviales.



**Foto 11** Aliviadero de emergencia de la presa de colas





**Foto 12** Construcción de un dren en la presa de colas de la ECPSA

### ***Escurrimiento superficial***

El indicador está asociado a la existencia de estructuras de control del escurrimiento superficial. La presa se encuentra en un escenario de seguridad (2) con un control del 39% del escurrimiento, hasta el momento no se han aplicado métodos de control del escurrimiento de las aguas.

### ***Caudal del agua en los drenes***

El indicador se evalúa a través del incremento o la depresión del caudal del agua en los drenes de la base de la presa de colas. El comportamiento se monitorea a través de mediciones del caudal, que son comparadas con su comportamiento histórico. Atendiendo a este indicador la presa se ubica en el escenario de seguridad (0), con un valor menor al promedio según diseño.

### **3.6.4 Indicadores de detección de fenómenos estáticos y dinámicos**

#### ***Desplazamientos verticales y horizontales***

Los desplazamientos verticales se analizan como los cambios en las elevaciones aguas arriba y aguas debajo de los diques. El comportamiento actual oscila entre los 10-20 mm. Los desplazamientos horizontales aguas arriba y aguas abajo asociados a cambios en la elevación de los diques, se encuentran en valores menores de los 30 mm. La presa, según este indicador se encuentra en el escenario de seguridad (0).

Los agrietamientos que existen están concentrados hacia el sector noreste debido a la presencia de la falla Moa, requiriéndose tomar medidas que garanticen la estabilidad de la presa. En las condiciones actuales se han construido grandes contrafuertes.

#### ***Licuefacción***

El indicador licuefacción se describe como la presencia de conos de arena y fluencia de material, así como el hundimiento de estructuras. La presa se encuentra, según este indicador, en el escenario de seguridad (0).

### **3.6.5 Indicadores de deslizamientos**

#### ***Agrietamientos***

El indicador se valora por la existencia de grietas en las diferentes estructuras de la presa. Atendiendo a este indicador la presa se encuentra en el escenario de seguridad (1), con presencia de grietas en los diques inferiores, producto al proceso de reasentamiento de los diques que fueron construidos sobre estratos débiles de sedimentos aluviales.

#### ***Erosión***

El indicador se evalúa en correspondencia con la presencia de los diferentes tipos de erosión hídrica. La presa, de acuerdo con este indicador, se encuentra en el escenario de seguridad (2) con la existencia de surcos profundos y formación de grandes cárcavas, (ver Foto 13 y Foto 14).



**Foto 13** Erosión en surcos en el sector oeste de la presa de colas, Hernández, T. 2014



**Foto 14** Cárcava profunda en dique norte de la presa de colas, Hernández, T. 2014



### 3.6.7 Sismos

El indicador referencia a la ocurrencia de eventos sísmicos y los daños que puede ocasionar a la presa de colas como un evento disparador de otros mecanismos de fallos.

#### **Escenario de seguridad actual de la presa de colas**

Evaluando el comportamiento real de los diferentes indicadores de fallos, se determinó que la presa de colas se ubica de manera general en el escenario de seguridad (2), dado que existe peligro de rotura o avería grave por encontrarse en el límite de capacidad de recepción de colas y el vertimiento de estas no se han detenido.

Las operaciones de la presa se realizan con la altura del borde libre fuera de los parámetros de diseño. El espejo de agua se encuentra en contacto parcial con los diques perimetrales, provocando un incremento de la carga hidrostática sobre estos.

La existencia de un fallo como consecuencia de eventos disparadores, como las intensas lluvias y los sismos, constituye uno de los peligros mayores para la seguridad de la obra, y de ocurrir en el estado actual las probabilidades de fallo de la presa son elevadas.

Los sistemas de aliviaderos no responden a las necesidades reales del escurrimiento superficial, esto provoca un alto grado de erosión, atentando contra la estabilidad de los taludes.

La condición de seguridad de la presa según los indicadores de filtraciones, funcionamiento de drenajes y agrietamientos, son los de mayor incidencia dentro del escenario de seguridad (1).

El resumen de los indicadores de fallos, escenarios, magnitud y medida de prevención se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** Estado actual de la presa de colas de la ECPSA

| Indicador                                |                                         | Escenario | Magnitud                                                          | Medida de prevención                      |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Indicadores hidrogeológicos              | Lluvias intensas                        | 0         | <969 mm/24h                                                       | 1                                         |
|                                          | Altura de la columna de agua            | 0         | < Altura promedio histórica                                       | 1                                         |
|                                          | Presión de poros                        | 0         | < Valor promedio histórico máximo de lluvias                      | 1                                         |
| Indicadores de las normas de explotación | Niveles de compactación en los diques   | 0         | >98%                                                              | 1                                         |
|                                          | Filtraciones                            | 1         | Presencia humedad ocupa 25 % talud dique                          | 2, 3, 13, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 24 y 25 |
|                                          | Altura del borde libre                  | 2         | <30 - 20                                                          | 2, 3, 5, 14 y 26                          |
|                                          | Ubicación del espejo de agua en el vaso | 2         | Contacto parcial con dique perimetral                             | 2, 5, 13 y 14                             |
| Indicadores de operación de drenaje      | Funcionamiento de drenajes              | 1         | Construcción incompleta de obras o presencia de averías parciales | 2, 3, 6, 12, 14, 18 y 22                  |
|                                          | Escorrentamiento superficial            | 2         | Control del 39 – 0 % del escurrimiento                            | 1, 2, 17, 19, 20, 22, 24 y 26             |
|                                          | Caudal del agua en los drenes           | 0         | < valor promedio (según proyecto)                                 | 1                                         |

**Tabla 1** Estado actual de la presa de colas de la ECPSA (continuación)

| Indicador                                                   |                              | Escenario | Magnitud                                                                        | Medida de prevención                        |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Indicadores de detección de fenómenos dinámicos y estáticos | Desplazamientos verticales   | 0         | 10-20 mm                                                                        | 2,10 y 24                                   |
|                                                             | Desplazamientos horizontales | 0         | <30 mm                                                                          | 2, 10,11,13,14,17,18,23 y 25                |
|                                                             | Licuefacción                 | 1         | Presencia de conos de arena en zona de construcción, hundimiento de estructuras | 2, 3, 4, 12, 13, 24, 26 y 27                |
| Indicadores de erosión y deslizamientos                     | Agrietamientos               | 1         | Presencia de grietas de tracción en los diques inferiores                       | 2, 3, 10, 12, 13, 14 y 24                   |
|                                                             | Erosión hídrica              | 2         | Presencia de surcos profundos y formación de grandes cárcavas                   | 2, 3, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24 y 26       |
| Sismos                                                      |                              | 0         | Sismo < según diseño.                                                           | 2                                           |
| Deslizamientos                                              |                              | 2         | Ocurrencia de deslizamientos en zonas activas                                   | 2, 3, 4, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 24, 26 y 27 |

### Medidas de prevención y mitigación de riesgos

En la Tabla 2 se muestran las medidas de prevención y mitigación que deben aplicarse en cada escenario de seguridad, en correspondencia con el comportamiento de los indicadores.

Tabla 2 Medidas de prevención y mitigación de riesgos

| No. | Medidas de prevención                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Mantener la inspección visual y el monitoreo de los instrumentos              |
| 2   | Incremento de la inspección visual y el monitoreo de los instrumentos         |
| 3   | Activar sistema de SAT de la empresa                                          |
| 4   | Activar sistema de SAT de la empresa y el municipio                           |
| 5   | Incrementar volumen del drenaje de la playa hacia la piscina sur              |
| 6   | Incrementar los volúmenes de bombeo de agua hacia la planta.                  |
| 7   | Iniciar drenaje por aliviadero de emergencia hacia el medio                   |
| 8   | Activar el plan emergencias                                                   |
| 9   | Paralizar las operaciones de la presa de colas                                |
| 10  | Establecer sistemas de monitoreo de las pequeñas grietas que se produzcan     |
| 11  | Realizar reparaciones de taludes agrietados o con deslizamientos              |
| 12  | Bajar capacidad de recepción de colas e iniciar reparación de averías         |
| 13  | Detener las actividades de recrecimiento de los diques                        |
| 14  | Cambiar el área de descarga de las colas hacia otro sector                    |
| 15  | Realizar ruteado de las capas para su secado y conformar nuevamente las capas |
| 16  | Extraer el material fuera de especificación y reconformar las capas del dique |
| 17  | Aplicar técnicas de sellaje                                                   |
| 18  | Reparación inmediata de las averías de los sistemas de drenaje                |

|    |                                                                                    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|
| 19 | Realizar canalizaciones interiores para encauzar las aguas del escurrimiento.      |
| 20 | Aplicación de métodos de protección vegetal, mecánico, químico y mixto.            |
| 21 | Realizar perforaciones para realizar estudios geotécnicos                          |
| 22 | Construir muros de contención para desviar las colas hacia zonas menos vulnerables |
| 23 | Realizar acciones de capacitación a los trabajadores y la comunidad                |
| 24 | Situar señales de aviso e informativas de los peligros existentes                  |
| 25 | Realizar simulacros de averías                                                     |
| 26 | Realizar ajustes al diseño del proyecto                                            |
| 27 | Evacuación del personal y la población y resguardo de los equipos y medios         |

## Comunicaciones

Ante cada situación generada en los escenarios de seguridad existe un procedimiento institucional y de la Defensa Civil, donde se regulan los diferentes tipos de comunicaciones que deben efectuarse. La comunicación será interna, en los casos que los posibles daños a producirse sean bajos y no implican riesgos a la población, el medio ambiente o la economía. En el caso contrario, se realizaran comunicaciones a la Defensa Civil, al Consejo de Defensa Municipal, al Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Hidrología y otras que correspondan.

Toda la información aportada por el sistema de monitoreo mantendrá una retroalimentación constante de los reportes de seguridad de la presa de colas con el Sistema de Alerta Temprana de la empresa y el territorio, este sistema garantiza la protección de la población, la economía y el medio ambiente.

## Conclusiones parciales

1. Se determinaron los indicadores de fallos de la presa de colas y se pudo definir el comportamiento en tiempo real de la seguridad de la presa.
2. La modelación de escenarios de seguridad permitió el diseño e implementación de planes de emergencia objetivos, reconociendo el desarrollo de actitudes proactivas en la protección de la población, el medio ambiente y la economía.
3. La definición y modelación de escenarios de seguridad constituye un resultado significativo en la protección de las comunidades, y revela el estado de los indicadores de seguridad.
4. El establecimiento de los diferentes escenarios permiten orientar de forma efectiva las acciones correctoras e informar a los diferentes niveles de dirección, para evitar pérdidas millonarias al país y daños irreversibles al medio y la población.

## CONCLUSIONES

1. Los estudios de la sismicidad indican que la presa de colas de la ECPSA se localiza en una zona activa de alta vulnerabilidad para el surgimiento de grandes deslizamientos, clasificada como de muy alta susceptibilidad.
2. Los suelos de cimentación están constituidos por estratos inestables de humedad y plasticidad de media a alta; que combinados con la actividad sísmica y los asentamientos incrementan los riesgos de fallos.
3. Los principales indicadores de fallo determinados fueron: hidrológicos, de normas de explotación, de operaciones del drenaje, de detección de fenómenos estáticos y dinámicos, de deslizamientos y sismos.
4. Evaluando el comportamiento real de los diferentes indicadores de fallos, se determinó que la presa de colas se ubica en el escenario de seguridad (2), considerando que existe peligro de rotura o avería grave por encontrarse en el límite de capacidad de recepción de colas y el vertimiento de estas no se han detenido.
5. La condición de seguridad de la presa según los indicadores de filtraciones, funcionamiento de drenajes y agrietamientos, son los de mayor incidencia dentro del escenario de seguridad (1).
6. La modelación de escenarios de seguridad para la presa de colas permite definir el de medidas de prevención y mitigación ante la ocurrencia de posibles riesgos, permitiendo el desarrollo de actitudes proactivas en la protección de la población, el medio ambiente y la economía.
7. Los registros de las roturas ocurridas en la presa de colas de la ECPSA por deslizamiento del talud, sismo, sobrepaso de agua, presenta correspondencia con los fallos históricos de presas a nivel mundial, para el tipo de construcción aguas arriba.

**RECOMENDACIONES**

1. Generalizar la propuesta de modelación de escenarios de seguridad para presa de colas a presas de residuales de otro tipo.
2. Diseñar planes de emergencia para presas de colas, tomando como base la modelación de escenarios de seguridad propuesta en esta investigación.
3. Emplear software profesionales que representen la modelación de los escenarios propuestos.



## BIBLIOGRAFÍA.

1. 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.
2. Arango, E. et al., 2009. "Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo oriental de Cuba. Acta GGM Debrecina. Vol 4, pp 43-52.
3. Alarcón, J., y Barrera, S., 2003. "Dams of great height, a challenge". Symposium of Tailings, ICOLD, Montreal.
4. Alonso, E.E. y Gens, A. 2006. Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. Géotechnique 56, No. 3, 185–201
5. Alonso, E., 2001. "Caracterización de los efluentes de las empresas níquelíferas cubanas". Congreso Cubano de Geología y Minería. La Habana, Libro de resúmenes, Memorias I, 10-11.
6. 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.
7. Arioza, J.D. 2002. Modelo geológico descriptivo para los yacimiento lateríticos de Fe-Ni-CO en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. Revista de Minería y Geología. Nos.1-2.
8. Barrera S; Lara J. 1998. Geotechnical Characterization of Cycloned Sands for the Seismic Design of Tailings Deposits. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics. Lisboa
9. 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.
10. Bligh, G. E. 1994. The master profile for hydraulic fill tailing beaches. Proc. Instn. Civ. Engng, 107, 27-40
11. Bligh, 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
12. Brennan, B. y Gutierrez, V. 2011. Guía para elaborar la estrategia de la comunicación de riesgos. OPS/OMS. Washington, DC, EEUU.

13. 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.
14. Carrara, A., 1983; "Multivariate models for landslide hazard evaluation". Mathematical Geology, Vol. 15, No. 3, 403-427.
15. Chandler, R. J. y Tosatti, G. (1995). The Stava dams failure, Italy, July, 1985. Proc. Instn. Civ. Engng, 113, 67-79
16. Cesigma, 2000. Estudio De Impacto Ambiental Yacimiento Moa Oriental, Moa Nickel S. A., Tomo I.
17. 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.
18. Decreto Ley No. 170. "Del Sistema de medidas de defensa civil". Gaceta oficial de la República de Cuba, La Habana, 19 de Mayo de 1997, Año XCV. Número 16.
19. Decreto Ley No.262 del 14-05-1999. 1999. "Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa". Gaceta Oficial, Cuba.
20. EMNDC., "Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres". 2010.
21. EMNDC., 2005. "Guía para la realización de estudios de riesgo para situaciones de desastres", EMNDC, La Habana.
22. EMNDC., 2010. "Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres"..
23. 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.
24. EMDCN., 2012. "Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres", Cuba.
25. 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.
26. Fell, R., 1997. "Landslide risk management. Landslide risk assessment". Cruden and Fell (eds). Balkema, Rotterdam, 51-109.
27. Fonseca, E.; Zelepugin V.N.; Heredia M. 1985: Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19: 321-329.
28. Fonseca, R., 2004. "Uso del Vetiver grass para la rehabilitación de sitios mineros en Chile: Resultados Preliminares". Fundación Chile, (ed) Antonio Rabat Sur 6165, Santiago, Chile.
29. Fourie, A.B., Blight, G.E. y Papageorgiou, G., 2001. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Can. Geotech. J.*, 38, 707–719
30. Fourie, A.B., et. al., 2003. "Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure". *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 707-719
31. 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.
32. 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.
33. Gray D.H. et. al., 1996. "Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization .A practical guide for soil erosion control". John Wiley and Sons, 378.
34. 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.
35. Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC 1998). Canada, 1998.
36. 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.
37. Hernández, T. 2015." Sistema de gestión de riesgos por fallos en la presa de colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba".

38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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 No.4 (oct-dic) del volumen 30.
44. 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.
45. Hernández, T. y Guardado, R. 2014. "Gestión de riesgos por deslizamientos en presas de colas". IV Congreso de desastres, Habana, Cuba.
46. 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 No. 3 (jun- sept) del volumen 30.
47. Hortelano, A. y Casas, A., 2003. "Presas y patrimonio. Situación legal y práctica", (ed)Barcett y Olloth, España, 23-36.

48. ICOLD., 1989. "Tailings Dam Safety Guidelines", Bulletin 74, Committee on Mine and Industrial Tailings Dams, Int. Commission on Large Dams, Paris.
49. ICOLD., 1995. "Tailings Dam y Seismicity - Review y Recommendations".
50. ICOLD., 1996. "A Guide to Tailings Dams and Impoundments – Design, construction, use and rehabilitation". Bulletin 106. Joint publication by International Commission on Large Dams and the United Nations Environmental Programme, Paris. 239.
51. ICOLD., 1999. "Guidelines (CDA 1999)". International Commission on Large Dams.
52. ICOLD., 2000. "World Information Service on Energy, Uranium Project, Cronología de las fallas más importantes en presas de relaves (desde 1960)".
53. ICOLD., 2001. Bulletin 121: Tailing dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Paris
54. ICOLD., 2003. "Bulletin on Risk Assessment in Dam Safety Management", International Commission on Large Dams.
55. ICOLD., "Tailings dams risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences". Bulletin 121
56. Iturralde-Vinent, M.A. 1996. Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP Project 364. Special contribution n.1, p. 83-120.
- 57.** Lavell, A., Cardona, O. y Mansilla, E. 2003. La gestión local del riesgo: nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica. Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), PNUD
58. López, A., 1996. "Las Presas Españolas en Arco de los Siglos XVI y XVII. Una innovación revolucionaria". Universidad Autónoma de Madrid.
59. Ley No. 75/1994 "Ley de la Defensa Nacional", de 21 de diciembre. Prieto Valdés Marta; Pérez Hernández, Lissette. 2005. Selección Legislativa de Derecho Constitucional Cubano. Editorial Félix Varela. La Habana. Cuba.

60. Ley No. 118/2014. "Ley de Inversión Extranjera", de 14 de abril. Gaceta Oficial de la República de Cuba, Edición Extraordinaria. La Habana, año 2014, número 20.
61. Marklan, A. y Eurenus, J., 1976. "Stability investigations of an existing tailing dam. 12th international congress on large dams". Commission Internationale de Grandes Barrages, Mexico, 407-417.
62. Morales, A. 2012. "Herramienta de gestión continua de actuaciones en seguridad de presas con indicadores de riesgo". Universidad Politécnica de Valencia.
63. Millán, J. 2005, "Lineamientos metodológicos para la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa". Tesis Magister. Universidad Nacional. Bogota.
64. Oliva, G., 1989. "Nuevo Atlas Nacional de Cuba". Instituto de Geografía, ACC.
65. Olalla, C. y Cuellar, V. 2001. Failure mechanism of the Aznalcollar Dam, Seville, Spain. *Geotechnique*, 51, 5, 399-406
66. Oldecop, L. et al., 2008. "Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros". Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
67. Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2007. "Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros".
68. Oldecop, L. et. al., 2010. "Comportamiento de colas mineras en climas áridos". Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina, 1-8.
- Orozco, G. y Rizo, R. 1998. Depósitos de zeolitas naturales de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33 (1-4), 335-349.
69. Oldecop, L., 2004. "Influencia de factores climáticos en la estabilidad de las presas de colas". Jornada "Geotecnia e Ingeniería Sísmica aplicadas a la Minería". Instituto de Investigaciones Antisísmicas de Argentina.
70. Ordoñez, A., 1984. "Canchas de relaves de concentradoras mineras. Informe Final". Voll, Lima, Perú.
71. Pérez, G. 1996. Metodología de la investigación educacional. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

72. Piñero, J.M. 2001. "Guía técnica para la elaboración de los planes de emergencia para presas", Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y calidad de las Aguas. Subdirección General de Gestión del Dominio Público Hidráulico. Madrid.
73. Ponjuan, A. y Rodríguez, R. 1981. "Los procesos metalúrgicos utilizados en la industria del níquel en Cuba. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 27.
74. Quintana, H., 1998. "Diques de estériles". Industria y Minería, 33, 52-56.
75. Rogge, J.R., 1992. "Una agenda de investigación para el manejo de desastres y emergencias, PNUD-UNDRO, Universidad de Minitoba.
76. Rodríguez, A. 1998 b. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Revista Minería Y Geología, v.12, n.3, 2005. ISMMM
77. Rodríguez, R., 2011b. "Transformaciones de pasivos ambientales mineros (PAM) en activos mineros, ambientales o sociales (AMAS)". IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. GEOCIENCIAS 2011, 4 al 8 de Abril, La Habana, Cuba.
78. Rodríguez, R., 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba)", (ed) Gestión residuos industriales.
79. Rodríguez, R. y García, A., 2006. "Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente". Editorial: Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1-744.
80. Rodríguez, R. et. al. 2009, "Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales". Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 12, N. ° 24, 7-25 (2009) UNMSM.
81. Rubín, M., 2003; Rubín, M., "Seguridad de presas. Pasado, presente y futuro". (ed) Zeltounim. Madrid, España.
82. Serrano, A. 2011. "Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas". Universidad Politécnica de Valencia.

83. Suárez, J., 1998. "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales". Universidad Industrial de Santander. (ed) Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga. Colombia.
84. Suárez, J., 2002. "La Bioingeniería en el control de erosión en ambientes tropicales". Especificaciones para la construcción de obras de bioingeniería". Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, Bucaramanga, (ed) Ingeniería de Suelos Ltda. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
85. USCOLD., 1989. "McCoy Mine Tailings Dam", USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
86. USCOLD., 1989. "Newmont's No. 4 Mill Tailings Dam", USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
87. USCOLD., 1992. "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Committee on Earthquakes, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
88. USCOLD., 1994. "Tailings Dam Incidents", Committee on Tailings Dams, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
89. UNDRO., 1979. "Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva.
90. UNDRO., 1990 "Preliminary Study on the Identification of Disaster-Prone Countries Based on Economic Impact. New York/Geneva: United Nations Disaster Relief Organization.
91. Vallejo, N 1997: Diseño de un sistema de transporte para el yacimiento Camarioca Sur. Trabajo de diploma. ISMM
92. Venegas, F. C., 2008. "Análisis de desarrollo tecnológico en disposición de residuos mineros provenientes de procesos extractivos de cobre". Tesis Maestría. Universidad de Serena, Chile.
93. Venegas, F. C., 2011. "Respuesta sísmica recientes en balsas de relaves chilenas y presas de materiales sueltos". Tesis de Maestría, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
94. World Information Service on Energy, Uranium Project, 2000. Cronología de las fallas más importantes en presas de relaves (desde 1960).



95. Zabala, F. et al., 2010. "Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros". Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
96. Zandarín, M.T., Oldecop. L. A. Rodríguez, R. and Zabala, F., 2009. "The role of capillary water in the stability of tailings dams". Engineering Geology, 105, 108–118 Seed, H.
97. Zandarín, M.T., et. al. 2008. "Stability of a Tailing Dam Considering the Hydro-mechanical Behaviour of Tailings and Climate Factors". Unsaturated Soils. Advances in Geoengineering. D.G. Toll, C.E. Augarde, D. Gallipoli y S.J. Wheeler (eds). Taylor & Francis, London,

## **ANEXOS**

**Anexo 1. Indicadores de fallos.**

| Indicador                   |                              | Escenario | Magnitud                                       | Medida de prevención        |
|-----------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------------------------|-----------------------------|
| Indicadores hidrogeológicos | Lluvias intensas             | 0         | < 969 mm/24h                                   | 1                           |
|                             |                              | 1         | = 969 mm/24h                                   | 2                           |
|                             |                              | 2         | > 5-20 % del Valor diseño                      | 3,4, 5, 6 23, 25 y 26       |
|                             |                              | 3         | > 21 % del Valor diseño                        | 3,4, 5, 6, 7, 8, 24 y 27    |
|                             | Altura de la columna de agua | 0         | < Altura promedio histórica                    | 1                           |
|                             |                              | 1         | = Altura promedio histórica                    | 2                           |
|                             |                              | 2         | > Entre 5-20 % Altura promedio histórica       | 3, 5, 6, 7, 11 y 12         |
|                             |                              | 3         | > 21 % Altura promedio histórica               | 4, 5 , 6, 7, 8, 11, 12 y 26 |
|                             | Presión de poros             | 0         | < Valor promedio histórico máximo              | 1                           |
|                             |                              | 1         | = Valor promedio histórico máximo              | 2                           |
|                             |                              | 2         | > 5 – 20 % del valor promedio histórico máximo | 4, 5, 6                     |
|                             |                              | 3         | > 21 % valor promedio histórico máximo         | 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 26       |

| Indicador                                |                                         | Escenario | Magnitud                                                                    | Medida de prevención                           |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Indicadores de las normas de explotación | Niveles de compactación en los diques   | 0         | >98%                                                                        | 1                                              |
|                                          |                                         | 1         | = 98%                                                                       | 2                                              |
|                                          |                                         | 2         | < 97-60 %                                                                   | 2,13,14,15,16 y 17                             |
|                                          |                                         | 3         | < 61%                                                                       | 2,13,14,15,16, 17 y 26                         |
|                                          | Filtraciones                            | 0         | Presencia de humedad en pie del talud                                       | 2, 13, 14, 17, 18, 19 y 24                     |
|                                          |                                         | 1         | Presencia humedad ocupa 25 % talud dique                                    | 2, 3,13, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 24 y 25       |
|                                          |                                         | 2         | Presencia flujos de agua entre capas y la humedad ocupa el 70 % talud dique | 2, 3, 4, 8,13, 14, 17, 18, 19, 22 y 24         |
|                                          |                                         | 3         | > Presencia de flujos de agua y humedad ocupa el 70 % talud dique           | 2, 3, 4, 8,13, 14, 17, 18, 19, 22, 24, 26 y 27 |
|                                          | Altura del borde libre                  | 0         | >30 cm                                                                      | 1                                              |
|                                          |                                         | 1         | =30 cm                                                                      | 2, 5,12 y 14                                   |
|                                          |                                         | 2         | <30 - 20                                                                    | 2, 3, 5,12, 14 y 26                            |
|                                          |                                         | 3         | <19                                                                         | 2, 3, 5,12, 14, 26 y 27                        |
|                                          | Ubicación del espejo de agua en el vaso | 0         | Parte central                                                               | 1                                              |
|                                          |                                         | 1         | Desplazamiento ligero                                                       | 2                                              |
|                                          |                                         | 2         | Contacto parcial con dique perimetral                                       | 2, 5, 13 y 14                                  |
|                                          |                                         | 3         | Contacto total con dique perimetral                                         | 2, 3, 4, 5, 13, 14 y 26                        |

| Indicador                           |                               | Escenario | Magnitud                                                          | Medida de prevención             |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Indicadores de operación de drenaje | Funcionamiento de drenajes    | 0         | Según diseño                                                      | 1                                |
|                                     |                               | 1         | Construcción incompleta de obras o presencia de averías parciales | 2, 3, 6, 12, 14, 18 y 22         |
|                                     |                               | 2         | Rotura de tubería decantación                                     | 2, 3, 4, 12, 18, 19, 22, 24 y 26 |
|                                     |                               | 3         | Rotura de aliviadero principal                                    | 2, 3, 4, 12, 18, 19, 22, 24 y 26 |
|                                     | Escurrimiento superficial     | 0         | Control del 90 % del escurrimiento                                | 1, 17 y 20                       |
|                                     |                               | 1         | Control del 89 – 40 % del escurrimiento                           | 1, 2,17, 19, 20, 22 y 24         |
|                                     |                               | 2         | Control del 39 – 0 % del escurrimiento                            | 1, 2,17, 19, 20, 22, 24 y 26     |
|                                     |                               | 3         | No control del escurrimiento                                      | 1, 2,17, 19, 20, 22, 24 y 26     |
|                                     | Caudal del agua en los drenes | 0         | < valor promedio (según proyecto)                                 | 1                                |
|                                     |                               | 1         | = valor promedio (según proyecto)                                 | 2                                |
|                                     |                               | 2         | > 5-25% valor promedio (según proyecto)                           | 2, 4, 17, 18 y 19                |
|                                     |                               | 3         | > 26 % valor promedio (según proyecto)                            | 2, 4, 17, 18 y 19                |

| Indicador                                                   |                              | Escenario | Magnitud                                                                                             | Medida de prevención                |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Indicadores de detección de fenómenos dinámicos y estáticos | Desplazamientos verticales   | 0         | 10-20 mm                                                                                             | 2, 10 y 24                          |
|                                                             |                              | 1         | 21-30 mm                                                                                             | 2, 3, 10, 11, 23, 24 y 25           |
|                                                             |                              | 2         | 31-49 mm                                                                                             | 2, 3, 8,10, 11 y 24                 |
|                                                             |                              | 3         | > 50 mm                                                                                              | 2, 4, 5,6,8,9, 11, 12, 13, 24 y 26  |
|                                                             | Desplazamientos horizontales | 0         | < 30 mm                                                                                              | 2, 10, 11,13, 14, 17, 18, 23 y 25   |
|                                                             |                              | 1         | = 30 mm                                                                                              | 2, 10, 11,13, 14, 17, 18 y 24       |
|                                                             |                              | 2         | > 30 – 49 mm                                                                                         | 2, 8,10, 11,13, 14, 17, 18, 24 y 26 |
|                                                             |                              | 3         | >50 mm                                                                                               | 2, 8,10, 11,13, 14, 17, 18, 24 y 26 |
|                                                             | Licuefacción                 | 0         | Presencia de conos de arena en zonas abandonadas                                                     | 2, 3                                |
|                                                             |                              | 1         | Presencia de conos de arena en zonas activas                                                         | 2, 3, 4, 12, 13, 24 y 26            |
|                                                             |                              | 2         | Presencia de conos de arena en zona de construcción, hundimiento de estructuras                      | 2, 3, 4, 12, 13, 24, 26 y 27        |
|                                                             |                              | 3         | Presencia de conos de arena en zonas de construcción, hundimiento de estructuras y fluencia de colas | 2, 3, 4, 9, 12, 13, 24, 26 y 27     |

| Indicador                               |                 | Escenario | Magnitud                                                                         | Medida de prevención                           |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Indicadores de erosión y deslizamientos | Agrietamientos  | 0         | Presencia de pequeñas grietas en plataformas                                     | 2, 3, 10, 13, 14 y 24                          |
|                                         |                 | 1         | Presencia de grietas de tracción en los diques inferiores                        | 2, 3, 10, 12, 13, 14 y 24                      |
|                                         |                 | 2         | Presencia de grietas de tracción en taludes perimetrales                         | 2, 3, 4,8, 10,12, 13, 14, 16, y 24             |
|                                         |                 | 3         | Presencia de brechas                                                             | 2, 3, 4, 8, 9, 24 y 27                         |
|                                         | Erosión hídrica | 0         | Erosión laminar ligera y presencia de pequeños surcos                            | 1                                              |
|                                         |                 | 1         | Presencia de surcos y formación de pequeñas cárcavas                             | 2, 3, 16, 17, 19, 20, 22, y 24                 |
|                                         |                 | 2         | Presencia de surcos profundos y formación de grandes cárcavas                    | 2, 3, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24 y 26          |
|                                         |                 | 3         | Formación de grandes cárcavas, con salida de agua y colas al exterior            | 2, 3, 8, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24 y 26       |
| Sismos                                  |                 | 0         | Sismo > Según diseño                                                             | 2                                              |
|                                         |                 | 1         | Sismo = Según diseño                                                             | 3, 4,10, 11,12, 13 y 24                        |
|                                         |                 | 2         | Sismo > Según diseño                                                             | 4, 8, 9 11, 12, 24, 26 y 27                    |
|                                         |                 | 3         | Sismo > Según diseño                                                             | 4, 8, 9, 11 y 12, 24, 26 y 27                  |
| Deslizamientos                          |                 | 0         | No existencia de deslizamientos                                                  | 1                                              |
|                                         |                 | 1         | Presencia de pequeños deslizamientos en áreas inactivas                          | 2, 3, 10, 11, 14, 16, 17, 19, 20, 22 y 24      |
|                                         |                 | 2         | Ocurriencia de deslizamientos en zonas activas                                   | 2, 3, 4, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 24, 26 y 27    |
|                                         |                 | 3         | Desarrollo de deslizamientos en zonas de gran magnitud con desarrollo de brechas | 2, 3, 4, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 22, 24, 26 y 27 |

Anexo 2. Mapa topográfico de la Presa de Colas de la ECPSA.

