

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **EN OPCIONAL AL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO**

**EVALUACIÓN DE LAS BUENAS PRÁCTICAS IMPLEMENTADAS EN  
LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA MOA NICKEL S.A.**

**Autor: Yailan Cantilo Frómata**

**Tutor: Dra. Teresa Hernández Columbié**

**Ing. Barbara Yanela Leyva Estrada**

**Msc. Jorge Luis Urra Abraira**

**Moa, 2022**

## DECLARACIÓN DE AUTOR

Yo: Yailan Cantillo Frómeta

Autora de este trabajo de diploma certifico su propiedad a favor de la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", la cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Autor: Yailan Cantillo Frómeta

Tutora: Dra. C. Teresa Hernández Columbié

Firma: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

## PENSAMIENTO



''El corazón del entendido adquiere sabiduría; y el oído de los sabios busca la ciencia''.

Proverbios 18:15.



''Dicen que una persona necesita solo tres cosas para ser verdaderamente feliz en este mundo: alguien a quien amar, algo que hacer y algo por lo que tener esperanza''.

Tom Bedett.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a:

- ❖ A Dios por darme la sabiduría y el entendimiento.
- ❖ A mi familia y amigos por todo su apoyo.
- ❖ A mis tutores por el tiempo invertido en mí.
- ❖ A todos mis profesores por sus enseñanzas.
- ❖ A cada una de las personas que me han apoyado de una manera u otra y que han estado a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS**

- ❖ A Dios para que reciba toda la gloria y el honor y el agradecimiento por su respaldo, amor, misericordia y fidelidad.
- ❖ A toda mi familia en general por todo su apoyo, amor y comprensión; en especial a mi papá Roel Cantillo Frómeta por su apoyo, regaños y amor incondicional, a mi mamá Marbelis Frómeta Ortiz le agradezco todo su sacrificio, apoyo incondicional, y dedicación. A todos mis hermanos en especial a Yander Frómeta Ortiz y Aliosky Frómeta por su consejos, dedicación y sacrificio.
- ❖ A Teresa Hernández Columbié por su esfuerzo, dedicación, regaños, por hacer posible la realización de esta tesis y por todo su tiempo dedicado
- ❖ A Jorge Luis Urra Abraira por su paciencia, dedicación, enseñanzas, por sus regaños y todos sus consejos.
- ❖ A Barbara Yanela Leyva Estrada le agradezco por su interés, disposición, atención y aporte al buen desarrollo de la tesis.
- ❖ A Irleydis Miranda Oquendo por su amistad en Cristo, por sus consejos, por su apoyo y dedicación para mi tesis.
- ❖ A Kenia Legra, Eduardo Terrero, Damaris Frómeta, Sergio Mayan, Luis Ramón y Ramonita por todo su apoyo, amor, dedicación y esfuerzo en estos cinco años de mi carrera.
- ❖ A Yurislely Valdez y Yanice Fuentes por su apoyo incondicional y enseñanzas
- ❖ A todos los compañeros de la subdirección de minas por su preocupación, atención y ayuda en todo este tiempo de práctica y tesis.
- ❖ A cada uno de mis compañeros de aula, que formaron parte de una de las mayores experiencias y con los cuales he compartido innumerables recuerdos en estos cinco años de carrera universitaria.
- ❖ A todas aquellas personas que han formado parte importante y sin las cuales no hubiera sido posible haber logrado el desarrollo de esta tesis.

## **RESUMEN**

Al hablar de minería en Cuba habitualmente se hace referencia a la producción de níquel obtenida mediante los procesos de beneficio de las menas lateríticas ubicadas en la región oriental del país, en especial en la provincia de Holguín. Esta actividad minera mediante la explotación a cielo abierto de los depósitos lateríticos con contenidos de níquel y cobalto, se localiza en el municipio de Moa. La explotación minera trae consigo un impacto negativo sobre el medio, provocando la deforestación de las áreas y vertimiento de residuos provenientes del proceso de obtención de los concentrados de níquel y cobalto, de las menas lateríticas. Como resultado del beneficio de dichas menas, la industria minero-metalúrgica del territorio producen materiales residuales, los cuales constituyen desechos para el proceso metalúrgico actual, estos residuos son conocidos con el nombre de colas. La deposición de estos desechos de manera segura es de vital importancia para la conservación de vidas humanas y el buen funcionamiento de la industria. Las buenas prácticas identificadas han estado orientadas a garantizar la estabilidad de la presa de colas, con el objetivo de minimizar el impacto sobre la sociedad, el medio ambiente y la conservación adecuada del material de depositado. En la última década diferentes compañías e instituciones aportaron nuevas prácticas en la presa de colas de Moa, enfocadas a mitigar las probabilidades de falla de las estructuras activas e inactivas en la presa de colas, pero estas buenas prácticas no están consolidadas o documentadas de forma tal que exista una guía de las mejores prácticas que puedan adecuarse a las colas provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión.

Palabras claves: buenas prácticas, presa de cola.

## **ABSTRACT**

When talking about mining in Cuba, reference is usually made to the production of nickel obtained through the benefit processes of lateritic ores located in the eastern region of the country, especially in the province of Holguín. This mining activity through the open pit exploitation of lateritic deposits with nickel and cobalt content, is located in the municipality of Moa. The mining exploitation brings with it a negative impact on the environment, causing the deforestation of the areas and the dumping of residues from the process of obtaining nickel and cobalt concentrates, from the lateritic ores. As a result of the benefit of these ores, the mining-metallurgical industry of the territory produces residual materials, which constitute waste for the current metallurgical process, these residues are known as tailings. The safe disposal of this waste is of vital importance for the conservation of human lives and the proper functioning of the industry. The good practices identified have been aimed at guaranteeing the stability of the tailings dam, with the aim of minimizing the impact on society, the environment and the adequate conservation of the deposited material. In the last decade, different companies and institutions have implemented new practices in the Moa dam, focused on mitigating the failure probabilities of active and inactive structures in the tailings dam, but these good practices have not been consolidated or documented in such a way. that there is a guide of the best practices that can be adapted to the tailings coming from the pressure acid leaching process.

Key words: good practices, tailing dan.

## ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTOR.....	2
PENSAMIENTO .....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	14
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	17
1.0. Introducción.....	17
1.1. Generalidades sobre presa de colas .....	17
1.2. Partes constituyentes de una presa de colas.....	18
1.3. Tipos de colas.....	19
1.4. Métodos de construcción de las presas de colas .....	20
1.5. Estado de la ingeniería de las presas de colas en el mundo .....	20
1.6. Monitoreo y Fiscalización .....	23
➤ Etapa de Operación.....	23
➤ Etapa cierre y post cierre .....	24
1.7. Estado de la temática a nivel nacional .....	26
1.8. Construcción y operación de la presa de la Moa Nickel S.A.....	28
1.9. Proceso minero metalúrgico de la empresa MOA NICKEL S.A.....	29
1.10. Conclusiones parciales .....	30
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTALES DEL ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS. ....	31

2.1.	Introducción.....	31
2.2.	Características geoambientales del área de estudio .....	31
2.3.	Localización geográfica del área de estudio .....	32
2.4	Geología de la región. ....	32
2.5	Geología del área de estudio .....	35
2.6	Clima del territorio .....	37
2.7	Hidrografía del medio y el impacto antrópico .....	38
2.8	Geomorfología del territorio.....	39
2.9	Tectónica del área de estudio.....	40
2.10	Sismicidad del área de estudio.....	41
2.11	Métodos de trabajo que se emplean en las etapas de construcción, operación, cierre y pos cierre en presas de colas. ....	43
➤	Control de calidad.....	44
	Ensayos geotécnicos.....	44
	Terraplén de prueba .....	44
	Proctor: ensayos de compactación.....	45
	Granulometría .....	45
	Humedad .....	45
	Perforación (estudios geotécnicos).....	46
	Piezómetros .....	47
	Libros de seguridad y salud del trabajo.....	48
	Registro de inspección diaria .....	48
➤	Control topográfico.....	48
	Inclinómetro.....	48
	Monumentos .....	48
	Vuelos de drones .....	48

Imágenes satelitales .....	48
➤ Control hidrogeológico .....	49
Pluviómetro .....	49
Pozos hidrogeológicos .....	49
Dren francés .....	49
➤ Método mecánico .....	49
Construcción de gaviones .....	49
Empleo de geotextil .....	50
Geomembrana .....	50
Geomallas .....	50
Hydroblock .....	51
Rip-rap	51
➤ Control sísmico .....	51
Acelerómetro .....	51
Monitoreo de actividad sísmica .....	51
➤ Métodos geofísicos .....	51
Ground Penetration Radar (GPR) .....	51
Tomografía .....	52
➤ Método químico .....	52
Sustancias bituminosas .....	52
Polímeros .....	52
Hidrogeles .....	52
➤ Control biológico y medio ambiental .....	52
Pastos .....	52
Fito-estabilización .....	53

Riego de agua en caminos.....	53
➤ Mantenimiento de estructuras auxiliares.....	53
2.12 Diseño de la guía de las buenas prácticas.....	53
2.13 Conclusiones parciales.....	54
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS BUENAS PRÁCTICAS EN LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA MOA NICKEL S.A.....</b>	<b>55</b>
3.1. Introducción.....	55
3.2. Identificación de las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A. ....	55
3.3. Buenas prácticas aplicadas en presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A. ....	57
3.3.1 Método mecánico.....	57
3.3.2 Mantenimiento de estructuras auxiliares.....	59
3.3.3 Control de calidad.....	59
3.3.4 Control hidrogeológico.....	61
3.3.5 Control biológico y medio ambiental.....	64
3.3.6 Método químico.....	65
3.3.7 Control topográfico.....	66
3.3.8 Control sísmico.....	71
3.3.9 Métodos geofísicos (Tomografía y GPR).....	71
3.4 Conclusiones parciales.....	74
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>

## Índice de tablas

Tabla 1: Guía de Buenas Prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A. ....	56
Tabla 2: Resultados del método geofísico de tomografía eléctrica vertical, descripción de las calas. ....	72

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Esquema de presa de cola. (Modificado por el autor).....	18
Figura 2: Tipos de colas según el porcentaje de sólidos, tomado de Ramírez Jiménez., et. al. (2019). (Modificado por el autor). ....	20
<b>Figura 3:</b> Tipo de presas de colas, según el método constructivo empleado, según (Zabala, F. et al., 2010). (Modificado por el autor). ....	20
<b>Figura 4:</b> Esquema general de la guía de buenas prácticas, según la asociación de minería de Canadá, marzo 2021. ....	28
<b>Figura 5:</b> Sección transversal del método constructivo aguas arriba empleado en la construcción. Tomado de Hernández, 2015. (Modificado por el autor).....	29
Figura 6: Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga. (Elaborado por el autor). ....	30
<b>Figura 7:</b> Foto satelital con la ubicación de las presas de colas existentes en Moa. (Elaborado por el autor). ....	31
<b>Figura 8:</b> Ubicación geográfica del área de estudio, Presa de Colas MOA NICKELS.A. (Elaborado por el autor).....	32
<b>Figura 9:</b> Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del autóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996).....	33
<b>Figura 10:</b> Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998. ....	34
<b>Figura 11:</b> Esquema Geológico del Municipio Moa(Chacón, 2015). Escala 1: 250 000. ....	36
<b>Figura 12:</b> Precipitaciones mensuales desde el 2014 hasta 2018. Valores tomados del registro de precipitaciones del pluviómetro ubicado en presa Nuevo Mundo (1695), Derivadora Moa (1696) y Cayo Grande (1306). ....	37
<b>Figura 13:</b> Hidrografía del medio y el impacto antrópico (fuente: Hernández, T. 2015). Modificado por Del Rosario, D. 2019. ....	38
<b>Figura 14:</b> Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (modificado de Rodríguez, A. 1998). ....	39
<b>Figura 15:</b> Mapa de bloques morfotectónicos de la región de Moa (tomado de Rodríguez, A. 1998). ....	41
<b>Figura 16:</b> Mapa sismo tectónico del área de estudio, radio 700 m de la Presa de Colas. Elaborado por el autor. Fallas según el mapa geológico Instituto de Geología y Paleontología (IGP). ....	43
Figura 17: Organigrama de la investigación. Elaborado por el autor. ....	44

<b>Figura 18:</b> Instalación de geomallas en los taludes de la presa. ....	57
<b>Figura 19:</b> Impermeabilización de los sedimentadores con geomembranas. ....	58
<b>Figura 20:</b> Implementación de hydroblock en el dique de la extensión norte de la presa de colas. ....	58
<b>Figura 21:</b> Sistema de bombeo para la recirculación de las aguas de la presa de colas. ....	59
<b>Figura 22:</b> Ensayos geotécnicos que se realizan en la presa de colas de la MOA NICKEL S.A. ....	60
<b>Figura 23:</b> Proceso de extracción de las aguas contenidas en las colas. ....	61
<b>Figura 24:</b> Monitoreo de las aguas subterráneas en los diques de la presa de cola. ....	62
<b>Figura 25:</b> Construcción de un dren francés en la Extensión Norte para la disminución del nivel freático. ....	63
<b>Figura 26:</b> Pluviómetro empleado en el monitoreo de las precipitaciones en la presa de cola. ....	64
<b>Figura 27:</b> Riego de agua en los caminos de la presa de colas. ....	64
<b>Figura 28:</b> Aplicación de hidrogel y pastos en el talud oeste de la presa de colas, antes y posterior a la implementación. ....	65
<b>Figura 29:</b> Aplicación de polímeros para la estabilidad de los taludes de la presa de colas. ....	66
<b>Figura 30:</b> Mapa de ubicación de los cuatro monumentos topográficos de control (2) norte y (2) hacia el este de la presa de colas. ....	67
<b>Figura 31:</b> Resultados del control de los monumentos topográficos en la dirección Este. ....	68
<b>Figura 32:</b> Resultados del control de los monumentos topográficos dirección norte. ....	69
<b>Figura 33:</b> Resultados del control de los monumentos topográficos, dirección vertical (Z). ....	69
<b>Figura 34:</b> Mapa de las principales direcciones de desplazamiento del sector norte de la presa de colas. ....	70
<b>Figura 35:</b> Ortofoto de la Extensión Norte de presa de colas. ....	71
<b>Figura 36:</b> Resultados experimentales de geofísica de GPR en el dique de la extensión norte, presa de colas MOA NICKEL S.A. ....	73

## INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad productiva de alto impacto capaz de generar recursos de valor económico donde se desarrolla. Si bien el avance de esta actividad ha sido fundamental para el progreso de Cuba, también ha tenido un efecto negativo en el medio ambiente, producto al vertimiento de los residuos conocidos como colas, provenientes del proceso metalúrgico.

Los desechos sólidos y líquidos generados durante el proceso de extracción de níquel y cobalto de las menas lateríticas, los cuales son depositados en construcciones específicas denominadas presas de colas, se almacenan desde la década de los años sesenta cuando inició la explotación de los yacimientos lateríticos en la fábrica comandante Pedro Sotto Alba de Moa.

Las exigencias de las instituciones reguladoras en relación a las normas de manejo y conservación de los materiales de desecho aun aumentado y progresado, incorporando nuevos aspectos que en el pasado no fueron considerados en los criterios de diseño, operación y cierre de la presa de colas de MO NICKEL S.A.

En la última década diferentes compañías e instituciones aportaron nuevas prácticas en la presa de colas de Moa, enfocadas a mitigar las probabilidades de falla de las estructuras activas e inactivas, pero estas buenas prácticas no han sido consolidadas o documentadas de forma tal que exista una guía de las mejores prácticas que puedan adecuarse a las colas provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión.

Este hecho sugiere que se evalúen las buenas prácticas actuales aplicadas en las presas de colas a nivel nacional e internacional, de forma que permita tomar en cuenta las mejores experiencias que puedan adecuarse a las presas de colas de la industria cubana del níquel.

En correspondencia con lo expresado anteriormente se deriva el siguiente **problema científico**: necesidad de identificar las buenas prácticas aplicadas en las presas de colas en la industria cubana del níquel.

**Objeto de estudio:**

La presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A.

**Campo de acción:**

Las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas en la empresa MOA NICKEL S.A.

**Objetivo general:**

Diseñar una guía de buenas prácticas para las presas de colas de la industria cubana del níquel.

**Objetivos específicos:**

1. Diagnosticar el estado de la temática de las buenas prácticas en las presas de colas a nivel internacional y nacional.
2. Identificar las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A.
3. Declarar las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A a través de una guía.

**Hipótesis:**

Si se conocen las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A. entonces se podrá obtener una guía de buenas prácticas que puedan adecuarse a las presas de colas del país, esto garantiza la prevención y mitigación de los fallos de estas obras ante eventos de origen natural o antrópico.

**Tareas de investigación a desarrollar:**

1. Búsqueda de información actualizada de la temática a nivel mundial y en Cuba.
2. Realizar un diagnóstico sobre las buenas prácticas implementadas en la presa de colas de la MOA NICKEL S.A.
3. Elaborar una guía de las buenas prácticas implementadas y recomendadas para

su aplicación en las presas de colas.

**Resultados científicos esperados:**

1. Aportar una guía de buenas prácticas ambientales para el desarrollo de los proyectos de presas de colas en Cuba.

## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

### **1.0. Introducción**

Los desastres ocurridos de las últimas décadas, relacionados con presa de colas, han motivado a nivel internacional a comprender la necesidad de compartir las buenas prácticas aplicadas para el funcionamiento seguro de estas estructuras.

En Cuba el conocimiento sobre el funcionamiento y conservación de los materiales de desecho de los procesos metalúrgicos ha ido en un progreso significativo, pero aún quedan aspectos que deben ser mejorados que permitan la prevención de futuros desastres medio ambientales; siendo este el objetivo fundamental del presente capítulo.

### **1.1. Generalidades sobre presa de colas.**

La presa o embalse de colas es un depósito donde se almacenan los materiales de desechos, estas presas se ubican en depresiones del terreno donde se requiere en la mayoría de los casos la construcción de un muro de contención.

Las colas se corresponden con el material residual del proceso de beneficio de las diferentes menas en explotación, estos materiales desechados normalmente presentan un escaso valor económico o existen limitaciones tecnológicas para extraer otros elementos útiles presentes en la misma.

Para su almacenamiento, se deben diseñar y construir las llamadas presas de colas cuya función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales residuales sólidos transportados desde la planta, lo que posibilita la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos (Rosario, R., 2019).

El agotamiento de los yacimientos con altas concentraciones de elementos de interés económico ha llevado a la necesidad de utilizar o incorporar al proceso las menas con menores contenidos, disminuyendo en cierta medida los residuos, pero no garantizan eliminar todos los residuos que en las circunstancias actuales no son objeto de beneficio.

Esta tendencia ha implicado también la incorporación de otras industrias productoras que

generan grandes cantidades de residuos que necesitan ser almacenados en condiciones ambientalmente seguras (Rodríguez & García-Cortés, 2006), se convierte de esta manera el almacenamiento de las colas en una de las importantes labores de los procesos mineros metalúrgicos.

Los términos usados para referirse a estos residuos metalúrgicos varían en dependencia del país, por ejemplo, en México: jales; en España: lodos mineros; en Perú, Chile y Argentina: relaves; y en Cuba: colas.

El relave minero es un conjunto de desechos producto del proceso metalúrgico para la obtención de minerales comerciales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua, minerales de ganga y productos químicos usados en el proceso metalúrgico, aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados, tales como, cobre, plomo, mercurio y metaloides como el arsénico, entre otros.

## 1.2. Partes constituyentes de una presa de colas

En términos generales, una presa de colas cuenta con los componentes que se mencionan a continuación y que se muestran en la Figura 1.

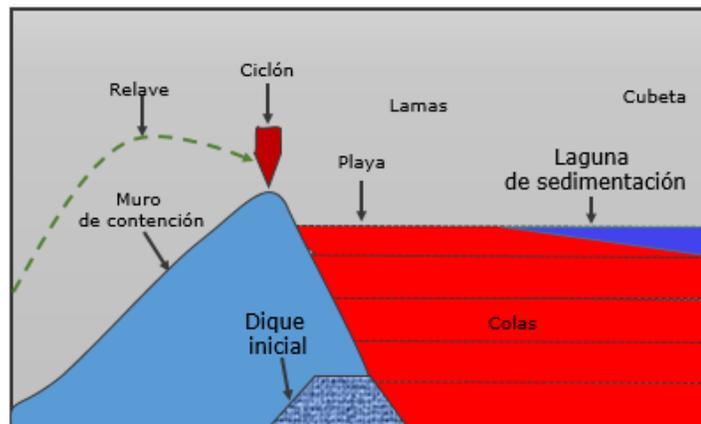


Figura 1: Esquema de presa de cola. (Modificado por el autor).

**Muro de contención, talud o dique:** estructura que permite contener los residuos sólidos que se descargan, corresponde a la zona periférica del depósito de colas, estructurada artificialmente y complementa el perímetro natural para conformar la

zona del vaso de la presa.

**Vaso o Cubeta:** volumen físico, delimitado por el muro, disponible para el depósito de relaves, junto con gran parte del agua de este material.

**Laguna de Aguas claras:** parte de la cubeta de un depósito, y se forma en tanto los sólidos precipitan sedimentándose en los niveles inferiores dejando los niveles superiores ocupados por la porción de aguas solamente.

**Sistema de drenaje:** sistema utilizado para retirar el grado adecuado de agua contenida dentro del perímetro de la presa, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro.

**Revancha o Borde libre:** diferencia menor, en altura, entre la línea de coronamiento del talud de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua almacenada dentro del depósito.

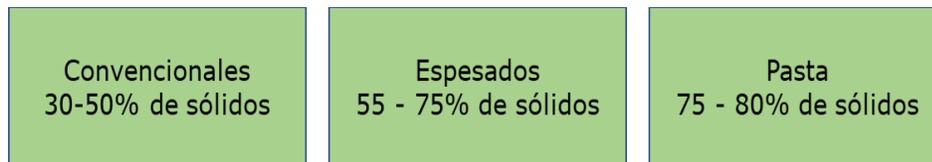
**Coronamiento:** parte superior del talud de contención.

**Canal de contorno:** canal de desvío efectuado en los contornos de la presa con el objetivo de desviar las aguas que pudiera captar como resultado de las escorrentías superficiales, impidiendo de este modo su ingreso a la cubeta de la presa de colas.

**Playa activa:** zona donde se descargan las colas en la cubeta. Es la parte del depósito situada en las cercanías de la línea de vaciado.

### 1.3. Tipos de colas

Las características y el comportamiento de las colas dependen fundamentalmente de su porcentaje de sólidos, que corresponde a la relación entre el peso seco de las colas y el peso total de la pulpa (colas más agua). Este valor define la clasificación de los tipos de colas y su forma de almacenamiento, (Figura 2).



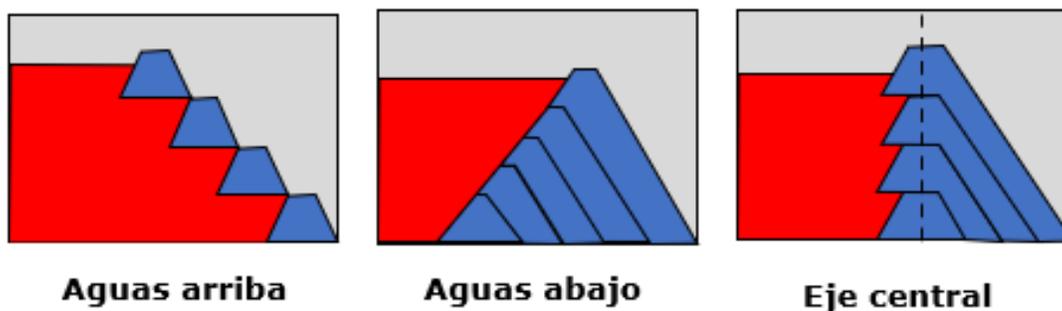
**Figura 2:** Tipos de colas según el porcentaje de sólidos, tomado de Ramírez Jiménez., et. al. (2019). (Modificado por el autor).

La utilización de equipos especiales permite obtener, previo a la deposición, colas filtradas que deben asegurar que la humedad de las colas se encuentre entre 20% y 30%.

Las colas de la presa de la Pedro Sotro Alba se clasifican como **colas convencionales**, poseen un elevado índice de humedad correspondiente a una porción de líquido superior al 60% y una porción entre 30% y 40% de sólidos.

#### 1.4. Métodos de construcción de las presas de colas

En correspondencia con el método de construcción utilizado para el crecimiento de los diques, se clasifican en tres tipos de presas, según se muestra en la Figura 3.



**Figura 3:** Tipo de presas de colas, según el método constructivo empleado, según (Zabala, F. et al., 2010). (Modificado por el autor).

El método de construcción aguas arriba está prohibido en países como Chile y Perú, por localizarse estos países en zonas sísmicas activas lo que genera un alto riesgo de falla de estas estructuras; en el caso de México es permitido este método constructivo.

#### 1.5. Estado de la ingeniería de las presas de colas en el mundo

Las presas de colas se construyen progresivamente a lo largo de todo el período de

explotación de la mina. Los cambios más importantes en el régimen de operación de la presa están relacionados por el aumento de la carga hidráulica y de las tensiones generadas en la presa producto a los procesos 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.

En lo referente a la evaluación de impacto ambiental, un aspecto común en el ordenamiento jurídico y constitucional en la mayoría de los países, es la exigencia de una Evaluación de Impacto Ambiental para los proyectos. El sistema, en general, presenta las mismas características, es decir, el interesado presenta un proyecto que debe cumplir cierto formato, estándares y exigencias.

En Chile el proyecto es examinado, y luego de atravesar varias etapas intermedias en donde distintos órganos sectoriales especializados participan, el proyecto puede ser aprobado, objetado o rechazado por (Sernageomin, 2018).

A partir del efecto directo de los desechos de la industria minero metalúrgica en el cambio climático, países como Estados Unidos, Sudáfrica, Australia, México, Perú y Reino Unido implementaron diferentes prácticas en el tema relacionado con el impacto ambiental:

**Estados Unidos:** se exige el levantamiento de una línea base. Sin embargo, los servicios especializados son los encargados de caracterizar la línea base.

**Chile:** los responsables del levantamiento de una línea base les corresponde a los titulares del proyecto, (Sernageomin, 2018).

Es importante señalar que en Chile específica que se deben adoptar medidas para asegurar la estabilidad física y química del depósito, sin embargo, no menciona temas asociados a la remediación o rehabilitación del sitio minero, como consecuencia la garantía financiera tampoco incluye este tipo de medidas a diferencia de países como Perú, Reino Unido, Estados Unidos, Australia y Sudáfrica.

En Cuba el levantamiento de una línea base les corresponde a los titulares contratar entidades especializadas como la empresa Geocuba, que cuenta con una amplia experiencia y personal especializado en esta temática.

**Sudáfrica:** relativo al diseño de un depósito de residuos, este debe ser realizado por un profesional registrado, ingeniero civil o ingeniero de minas.

**Australia:** sobre cómo enfrentar distintos criterios, requisitos e inspecciones en Australia se asigna una categoría de riesgo según el impacto que produciría una posible falla en los embalses y/o tranques de relaves, la cual varía dependiendo de la población en riesgo y el nivel de severidad potencial de daño o pérdida. La categoría asignada se usa para determinar los criterios de diseño, los requisitos de gestión y supervisión de la construcción, y los requisitos y frecuencias de gestión de riesgos, inspecciones e informes (Sernageomin, 2018).

**México:** cuenta con una clasificación de embalses y tranques de relaves, en donde a partir de la topografía, hidrología y sismicidad del sitio se asigna una categoría. Con esta clasificación la matriz entrega las opciones para el método constructivo, el análisis de estabilidad del muro contenedor.

Si bien cada depósito es único y complejo, esto permite estandarizar ciertos aspectos y, en consecuencia, hacer más eficiente el proceso tanto para el sistema evaluador como para el titular del proyecto.

**Perú:** el titular minero deberá constituir garantías a favor de la autoridad competente para cubrir los costos de las medidas de rehabilitación para los períodos de operación de Cierre Final y Post Cierre. Además, en el caso de que el Plan de Cierre de Minas deba considerar medidas para la rehabilitación de áreas que han sido impactadas por las operaciones del titular de actividad minera solicitante y por terceros, se podrá optar por presentar medidas de rehabilitación colectivas o individuales (Sernageomin, 2018).

**Reino Unido:** se debe asegurar que existan fondos fácilmente disponibles en cualquier momento para la rehabilitación del terreno afectado por la instalación de residuos (Sernageomin, 2018). Adicionalmente, existe un Fondo de Restauración (destinado a financiar la restauración de las tierras utilizadas para la explotación de hierro mediante operaciones a rajo abierto).

**Estados Unidos:** Bureau of Land Management puede requerir o establecer un fondo fiduciario u otro mecanismo de financiamiento para garantizar la continuidad de la

rehabilitación en el largo plazo (Sernageomin, 2018).

**Australia:** antes de llevar a cabo cualquier actividad, se debe proponer una cantidad para asegurar financieramente el costo potencial total de la rehabilitación de la tierra perturbada, de conformidad con el programa de rehabilitación aprobado (Sernageomin, 2018).

**Sudáfrica:** todo solicitante titular de un derecho minero tiene la obligación de constituir una provisión financiera, con el objeto de proporcionar los recursos suficientes para los costos específicos relacionados con la gestión, rehabilitación y remediación de los impactos ambientales (Sernageomin, 2018).

Estos países antes mencionados excepto Chile, garantizan los recursos financieros para desarrollar las actividades de rehabilitación durante el proceso de cierre de las presas de colas, a nivel nacional en Cuba también se planifican presupuestos para estos trabajos.

## **1.6. Monitoreo y fiscalización**

A continuación, se mencionarán como procede en algunas naciones en materias de monitoreo y fiscalización, tanto en la etapa de operación como en el cierre y post cierre de una faena minera.

### ➤ **Etapas de Operación**

En Chile, las principales entidades encargadas de fiscalizar corresponden a Sernageomin y las mismas empresas mineras. Sin embargo, en el marco regulatorio no se especifica la periodicidad de sus monitoreos y/o fiscalizaciones. A continuación, se revisará la situación actual de países con avances en este tema.

El control sobre la conservación de estos residuos es chequeado de forma sistemática por la Oficina Nacional de Recursos Minerales y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA, como agencia reguladora y protección ambiental de los recursos naturales.

- **Reino Unido:** no contempla específicamente un sistema de fiscalización tradicional, es más bien el encargado o titular el responsable de mantener un adecuado control del estado de la operación. Sin embargo, se debe hacer una

inspección visual a diario por los operadores del relave, que debe ser informada a la autoridad en un formato adecuado, con la frecuencia definida por ella. Además, anualmente un ingeniero especializado debe realizar un informe y cada dos años se debe realizar una auditoría independiente.

- **Estados Unidos:** la entidad Bureau of Land Management realiza inspecciones al menos 4 veces al año, en el caso de operaciones que utilicen cianuro en sus procesos u operaciones que presenten un potencial significativo de generar drenaje ácido (Sernageomin, 2018).
- **Canadá:** existen fiscalizaciones anuales exigidas por parte de los gobiernos provinciales, los cuales estipulan aspectos particulares propios del monitoreo. Además, se otorga una clasificación según riesgo, y en función de los elementos de riesgo identificados, las empresas se ven obligadas a acatar las sugerencias e indicaciones que se entreguen en cada inspección (Sernageomin, 2018).
- **Perú:** el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental es quien cuenta con un registro de Actos Administrativos y de Infractores Ambientales, los cuales son sistemas de información que permiten al público general conocer las sanciones, medidas cautelares y medidas correctivas impuestas, además del detalle de los procedimientos en los que se declaró la reincidencia de los infractores ambientales. Asimismo, cuenta con un registro de buenas prácticas ambientales en donde se encuentra inscrita toda unidad fiscalizable que no cuente con hallazgos de presuntas infracciones administrativas (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2019).

#### ➤ **Etapas de cierre y post cierre**

En la normativa internacional se señala que las empresas mineras chilenas que deban someter su plan de cierre al procedimiento de aplicación general, deberán realizar auditorías periódicas cada 5 años, a su costo y de acuerdo al programa de fiscalización que elabore el Sernageomin. En los párrafos siguientes se menciona la realidad de Canadá, Reino Unido, Sudáfrica y Perú en esta materia, países que presentan plazos de fiscalización más claros y con mayor periodicidad que el caso de Chile.

- **Canadá:** la legislación indica que la persona encargada del proyecto debe realizar una actualización del plan al menos una vez al año. Sin perjuicio de lo anterior, el plan debe ser actualizado en el caso de que los resultados de los distintos parámetros, que son monitoreados para controlar la estabilidad física y química de las aéreas de interés.
- **Reino Unido:** a través de la normativa The Mines and Quarries (Tips) Regulations de 1971, se establecen diferentes tipos de fiscalizaciones, supervisiones o inspecciones respecto al plan de cierre, tanto en minas cerradas como activas.
- **Sudáfrica:** en relación a la elaboración del plan de cierre, este debe incluir detalles de un especialista, que debe contar con un nivel de experiencia aprobado y registrado, (Sernageomin, 2018).
- **Perú:** el plan de cierre es una obligación exigible a todo titular de actividad minera: que se encuentre en operación, que inicie operaciones mineras o las reinicie después de haberlas suspendido o paralizado antes de la vigencia de la Ley.
- En Cuba en la etapa de cierre si se realiza la rehabilitación del sitio minero y de las presas de colas o relaves, existe un presupuesto designado para la actividad de cierre.

Las buenas prácticas durante todas las fases de los proyectos de presas de colas a nivel internacional poseen un desarrollo notable por el uso de tecnologías y materiales que garantizan la estabilidad de estas obras en el tiempo y menores costos de ejecución.

En Cuba la actividad de monitoreo es responsabilidad de los responsables de los proyectos de la presa de colas, la frecuencia depende de las indicaciones establecidas en las Licencias Ambientales otorgadas. La fiscalización se realiza dos veces al año por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) y la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM). Estos controles se realizan durante todas las etapas del proyecto.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), afirma que las buenas prácticas son “las que consideran modelos de mejoramiento de la gestión, manejo y

desempeño ambiental y social de los sectores productivos, a partir de la experiencia y de casos exitosos replicables, teniendo en cuenta la naturaleza y condiciones específicas de cada actividad y su entorno”.

### **1.7. Estado de la temática a nivel nacional**

En la región oriental de Cuba se localizan la mayor cantidad de presas de colas del país, en Moa específicamente existen dos presas de colas en cierre, dos en operaciones, una en construcción y una transformada en pasivo ambiental. A lo largo de más de sesenta años de minería en la industria del níquel ha existido un desarrollo de muchas buenas prácticas las cuales han quedado como métodos de trabajo particulares de la industria que las ha desarrollado, siendo la empresa Cdte. Pedro Sotto Alba la que posee mayor nivel de implementación de buenas prácticas ambientales.

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 legal en materia de reducción de riesgos de desastres abarca 3 leyes, 7 decretos ley, 13 decretos, 21 resoluciones ministeriales y la directiva No. 1 del 2017, donde se presta especial atención a la fase de respuesta ante la ocurrencia de fenómenos que constituyan riesgos potenciales para la población, la economía y el medio ambiente.

A continuación, se brindan detalles de algunas regulaciones:

La ley 75 de la Defensa Nacional, del 21 de diciembre de 1994, en el Capítulo XIV se define el Sistema de Medidas de Defensa Civil y se otorgan responsabilidades a los presidentes de las Asambleas Provinciales y Municipales del Poder Popular como líderes de Defensa Civil en sus respectivos territorios.

El decreto ley No. 170, del Sistema de Medidas de la Defensa Civil, como cuerpo legal referente a la Defensa Civil, define todos los aspectos relacionados con la reducción de riesgos de desastres en la República de Cuba.

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 las inversiones realizadas en el país al correspondiente nivel de la 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.

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

En el caso de Cuba, es típico el método de construcción aguas arribas, y en relación al diseño, este se realiza con un equipo multidisciplinario y se subcontratan empresas extranjeras como Knight Piésold Ltd de Canadá y la empresa cubana “Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Camagüey” (EIPHC).

**El diagnóstico de las buenas prácticas en las presas de colas a nivel internacional y nacional se resume en:**

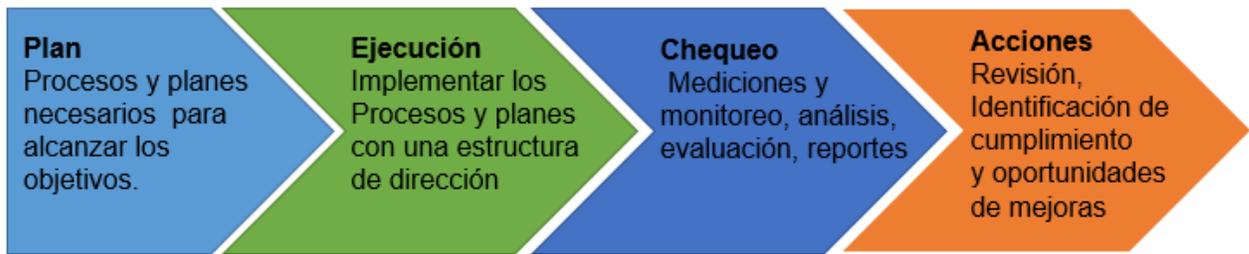
Los desastres ocurridos por el fallo de las presas de colas a nivel mundial motivaron a la necesidad de contar con documentos básicos que orienten sobre las mejores prácticas aplicadas a estas obras.

La comisión europea en el año 2018 presentó una guía que contiene las mejores técnicas disponibles para el manejo de desechos de la industria extractiva minera. Las Naciones Unidas en el año 2020 emitió el estándar global de gestión del manejo de relaves para la industria minera. En Chile en el año 2019 la dirección de estudios y políticas públicas expuso las mejores prácticas de gobernanza en materia de relaves.

En Canadá la asociación de minería en el año 2021 emitió una actualización de guía de las facilidades de presas de colas. Esta actualización estuvo enfocada en actualizar los detalles de los planes de emergencia.

Estas pautas permiten minimizar los daños físicos y químicos de los riesgos asociados con las presas de colas, enfocados a prevenir catástrofes por fallo de las estructuras y evitar los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana.

En la Figura 4 se muestra un esquema general para la elaboración de la guía de buenas prácticas, según la asociación de minería de Canadá, marzo 2021.



**Figura 4:** Esquema general de la guía de buenas prácticas, según la asociación de minería de Canadá, marzo 2021.

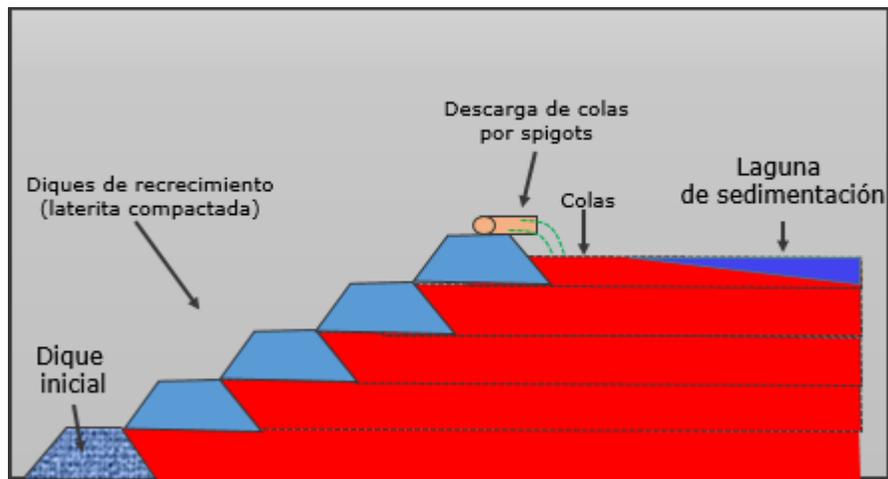
El contar con los proyectos detallados, el cálculo adecuado de los presupuestos para ejecutar los planes previstos, permite identificar los requerimientos necesarios en las diferentes etapas de la presa. No obstante, se necesita durante la ejecución la implementación de los procedimientos, chequeo y monitoreo para garantizar la conservación y almacenamiento exitoso de las colas.

En Cuba es conocida la existencia de guías de buenas prácticas en diferentes áreas de la industria geólogo minera, pero en el caso del manejo y conservación de los desechos de la industria minero metalúrgica, en especial las colas provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión, resultan de la aplicación práctica y progresiva, sin existir con un registro que documente las acciones aplicadas en la conservación de las colas.

### **1.8. Construcción y operación de la presa de la MOA NICKEL S.A**

El método de construcción aplicado es el de aguas arriba, la presa es edificada de forma progresiva con diques perimétricos. Los diques se solapan un metro con el dique que le antecede y están en contacto directo con las colas.

La particularidad de este método es que la integridad estructural de la obra está regida por las propiedades y comportamiento de las colas inferiores descargadas hidráulicamente, que forman la base del talud del dique superior. Esta característica hace de este método de construcción el más inestable ante un brusco aumento de las tensiones y cargas que actúan sobre los taludes de la presa, (Ver Figura 5).



**Figura 5:** Sección transversal del método constructivo aguas arriba empleado en la construcción. Tomado de Hernández, 2015. (Modificado por el autor).

### 1.9. Proceso minero metalúrgico de la empresa MOA NICKEL S.A.

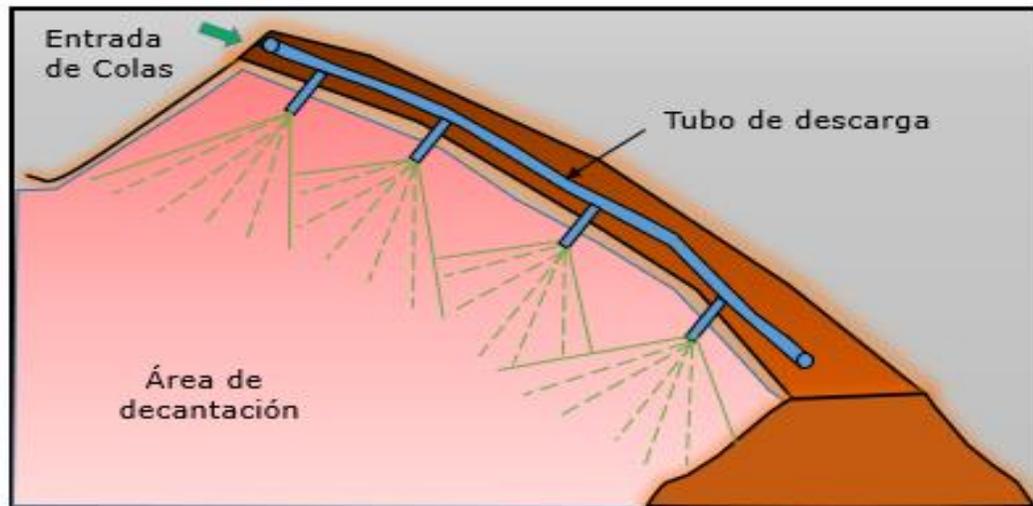
La deposición de las colas se realiza, una vez concluida la construcción de los diques perimetrales, los cuales deben cumplir con los factores de seguridad estática y pseudoestática (sísmica), requeridos para la estabilidad de la estructura.

Las menas procesadas en el proceso metalúrgico provienen de los horizontes limoníticos y saprolíticos de la corteza laterítica, donde se localizan las mayores concentraciones de níquel y cobalto. Las colas, generadas del proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL por sus siglas en inglés) se clasifican como colas convencionales derivadas de la extracción de níquel y cobalto. La tasa de producción de residuos es de aproximadamente 8 000 t secas/día, por cada 110 t de concentrado de níquel + cobalto de producción.

Las colas son mezcladas con agua y transportadas por tuberías en forma de pulpa y depositados de forma regular en el área de la presa. Los tubos de descarga (spigots) se distribuyen cada 25 metros, (Ver Figura 6), en todo el perímetro de la presa de colas; garantizando un mejor aprovechamiento de la capacidad de la presa.

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.

Los aliviaderos deben garantizar el paso del flujo de agua ante la ocurrencia de eventos extremos, con una probabilidad de ocurrencia de tormentas o intensas lluvias de 1 en 1000 años. El agua es almacenada y reciclada a la planta metalúrgica para su aprovechamiento en el proceso de lavado a contracorriente.



**Figura 6:** Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga. (Elaborado por el autor).

El agua residual del proceso sale al exterior durante eventos de lluvias intensas, roturas de las bombas o del fallo de la corriente eléctrica; en estas condiciones se extreman las medidas de control y monitoreo del vertimiento de estas aguas.

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 presenta valores entre 4 y 4.5, definiendo estas colas como ácidas. Las colas se caracterizan por una composición areno arcillosa, con un predominio de limos.

### 1.10. Conclusiones parciales

- 1) Existencia de un volumen considerable de información sobre las buenas prácticas ambientales aplicadas a los proyectos de presas de relaves, países como Chile, Perú, Reino Unido y Australia y que poseen el mayor nivel de aplicación de las mismas.
- 2) A nivel nacional existe muy poca información sobre las buenas prácticas aplicadas a investigaciones y proyectos de presas de colas.

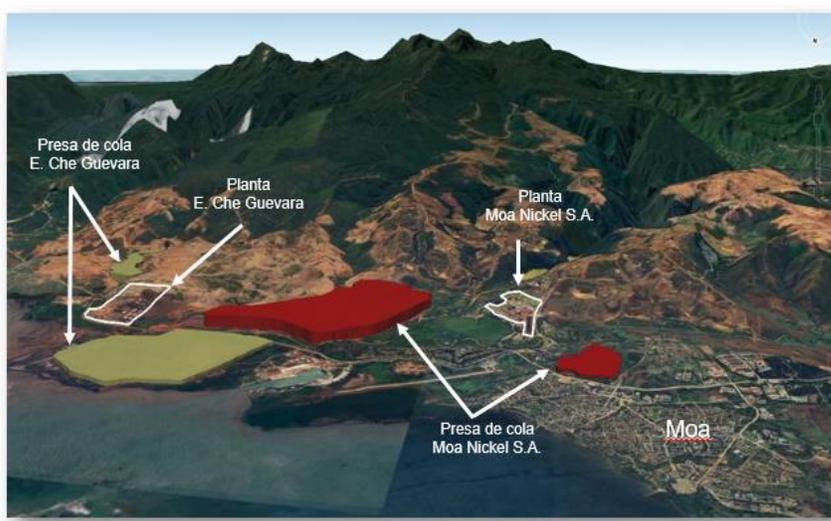
## CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTALES DEL ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS.

### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una caracterización geoambiental de la región de Moa y se exponen los principales elementos de la constitución geológica, tectónica y sísmica del área de estudio. Se establecen los principales aspectos sobre la gestión y manejo de la presa de colas, durante la construcción, operación, cierre y post-cierre. Además, se exponen los métodos de trabajo empleados en las diferentes etapas de construcción de la presa con el objetivo de identificar las buenas prácticas que se emplean para garantizar la estabilidad de la presa de cola.

### 2.2. Características geoambientales del área de estudio

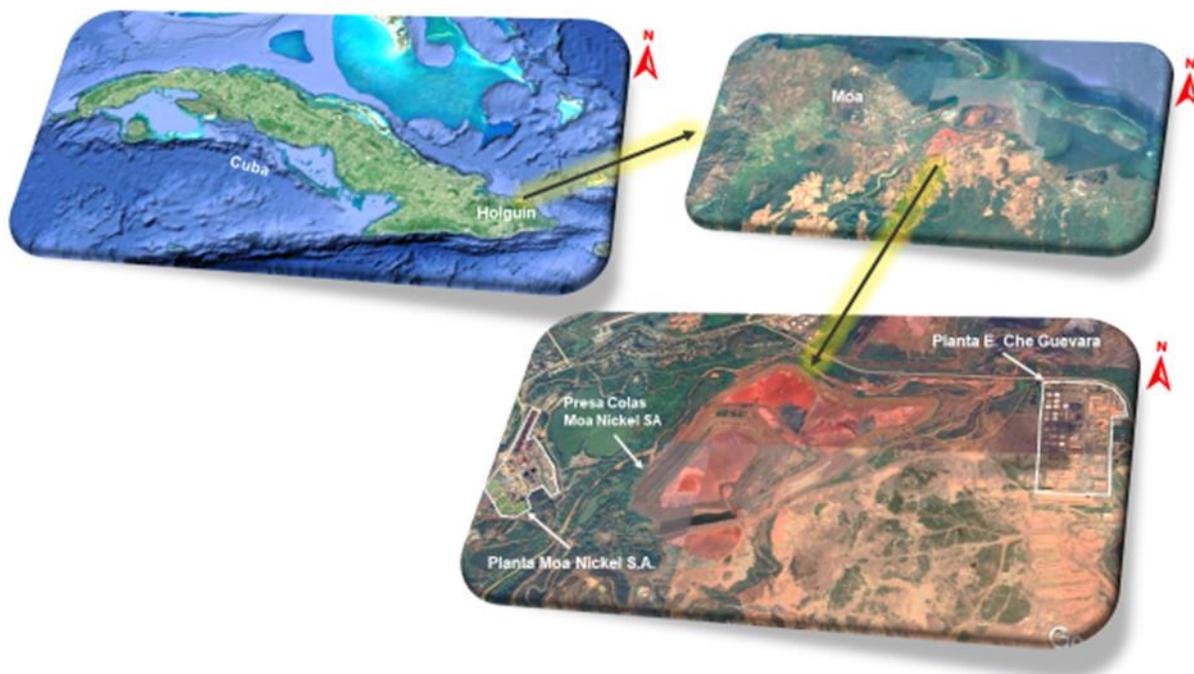
El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 km<sup>2</sup>. Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba Oriental. En el territorio existen cuatro presas de colas, dos en operaciones, una correspondiente a la empresa comandante Ernesto Che Guevara otra a la empresa MOA NICKEL S.A., otra en cierre perteneciente a la misma empresa, y una inactiva transformada en pasivo ambiental desde 1970, (Figura 7).



**Figura 7:** Foto satelital con la ubicación de las presas de colas existentes en Moa. (Elaborado por el autor).

### 2.3. Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Moa situado en la parte más oriental de la provincia de Holguín, limita al norte con el Océano Atlántico, al este y sur con la provincia de Guantánamo y al oeste con los municipios de Sagua de Tánamo y Frank País.



**Figura 8:** Ubicación geográfica del área de estudio, Presa de Colas MOA NICKEL S.A. (Elaborado por el autor).

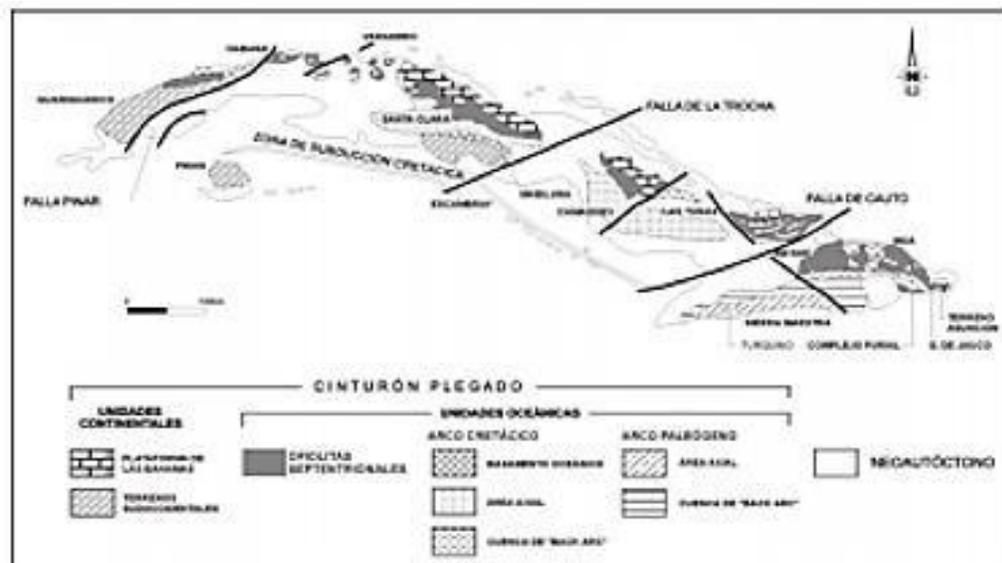
### 2.4 Geología de la región.

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 neoaútctono. 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 en 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) cinturón plegado en unidades.

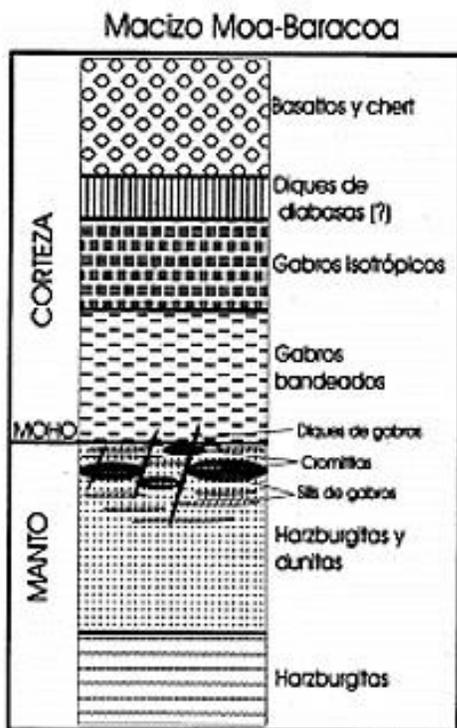


**Figura 9:** Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del autóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996).

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 estas son 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: Mayarí 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-Baracoa según Proenza, J. 1998.

En el macizo predominan las harzburgitas y peridotitas serpentinizadas, en menor medida están presentes dunitas, dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas y piroxenitas. 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).

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:

OIGP: Zona de ocre inestructurales con concreciones ferruginosas

OI: Zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas

OEF: Zona de ocre estructurales finales

OEI: Zona de ocre estructurales iniciales

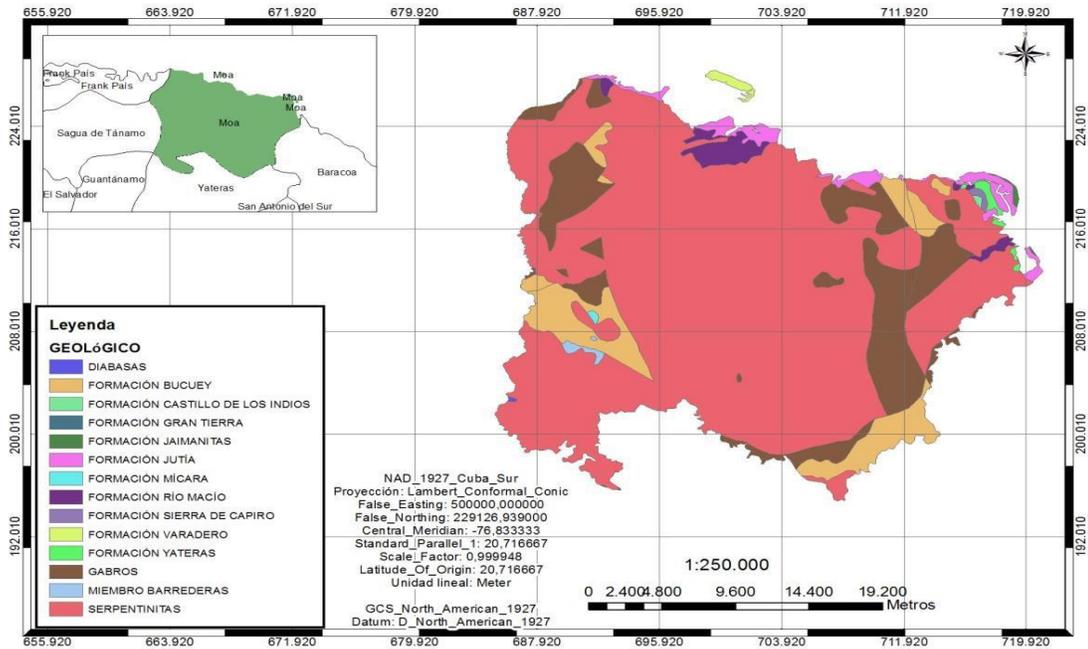
RML: Zona de rocas madres lixiviadas

RMA: Zona de rocas madres agrietadas, poco meteorizadas

## **2.5 Geología del área de estudio**

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

Según Rodríguez, A. 1998, los depósitos Cuaternarios están constituidos por calizas organodetríticas con gran contenido de fauna, predominando los moluscos contemporáneos. Aparecen también aleurolitas calcáreas, arenas margosas y arcillas. Los depósitos ubicados en los márgenes, cauces y desembocaduras fluviales están constituidos por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial. El área de afloramiento de los depósitos Cuaternarios constituye una cobertura prácticamente continua en forma de franja a lo largo de la costa y discontinua en las partes interiores. El relieve de estos depósitos, se desarrollan en zonas de llanuras costeras débilmente onduladas, en zonas pantanosas y en las desembocaduras y cauces de los ríos sobre llanuras irregulares.



**Figura 11:** Esquema Geológico del Municipio Moa(Chacón, 2015). Escala 1: 250 000.

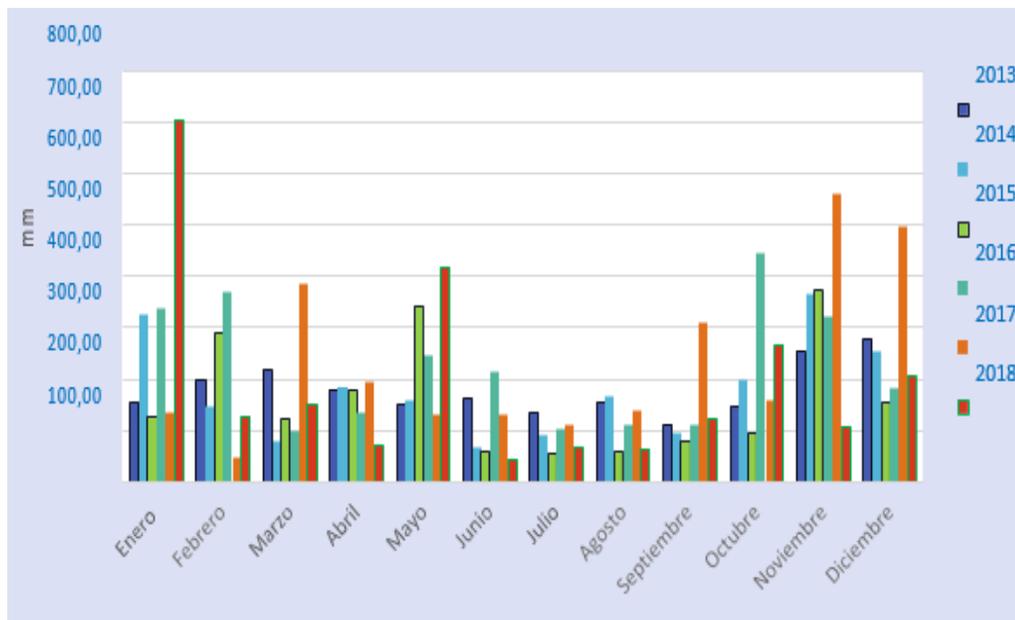
La realización de investigaciones geotécnicas desde 1996 hasta 2011 ha permitido caracterizar los materiales que conforman la cimentación, los cuales se corresponden con los sedimentos del valle aluvial del río Moa y arroyo Los Lirios y los sedimentos del Cuaternario. Los sedimentos aluviales presentan una capa que varía de 1 a 10 metros de espesor son de granulometría de fina a mediana y conforman los suelos arenosos arcillosos de la zona. El color de estos varía desde rojizo marrón a gris verdoso. Estos son materiales provenientes de la deposición del río Moa y Cabañas y demás ríos y arroyos presentando un alto grado de humedad y plasticidad.

En la zona de estudio se localiza una capa de materiales arcillosos orgánicos que posee un espesor variable de 1 a 12 metros, con un elevado grado de plasticidad y humedad. Este material arcilloso se concentra fundamentalmente hacia la parte noroeste de la presa de colas, su color varía de gris oscuro a verde. De manera general en la zona de estudio predomina la existencia de un suelo arcilloso con un alto contenido de material orgánico, con un espesor variable entre 1 y 20 m, muy húmedo y plástico, el cual se ha originado como resultado de la deposición del material arrastrado aguas abajo por el río Moa y el arroyo Los Lirios hasta la llanura de inundación en que está enmarcada el área de estudio.

## 2.6 Clima del territorio

El clima del territorio 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 de la Potabilizadora, la temperatura media anual osciló entre 22,6 o – 30,5 °C. Los meses más lluviosos, noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto; la evaporación media anual oscila entre 1880-7134 mm.

A continuación, en la Figura 12 se muestra el promedio de las precipitaciones anuales de los años 2014-2018, (Tomado de INRH de Moa, 2014-2018).



**Figura 12:** Precipitaciones mensuales desde el 2014 hasta 2018. Valores tomados del registro de precipitaciones del pluviómetro ubicado en presa Nuevo Mundo (1695), Derivadora Moa (1696) y Cayo Grande (1306).

## 2.7 Hidrografía del medio y el impacto antrópico

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 MOA NICKEL S.A., 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 (Figura 13), haciéndolos retroceder lo que potencia el efecto erosivo sobre los taludes de la presa de colas de la MOA NICKEL S.A. (Hernández, T. y Guardado, R., 2014).



**Figura 13:** Hidrografía del medio y el impacto antrópico (fuente: Hernández, T. 2015).

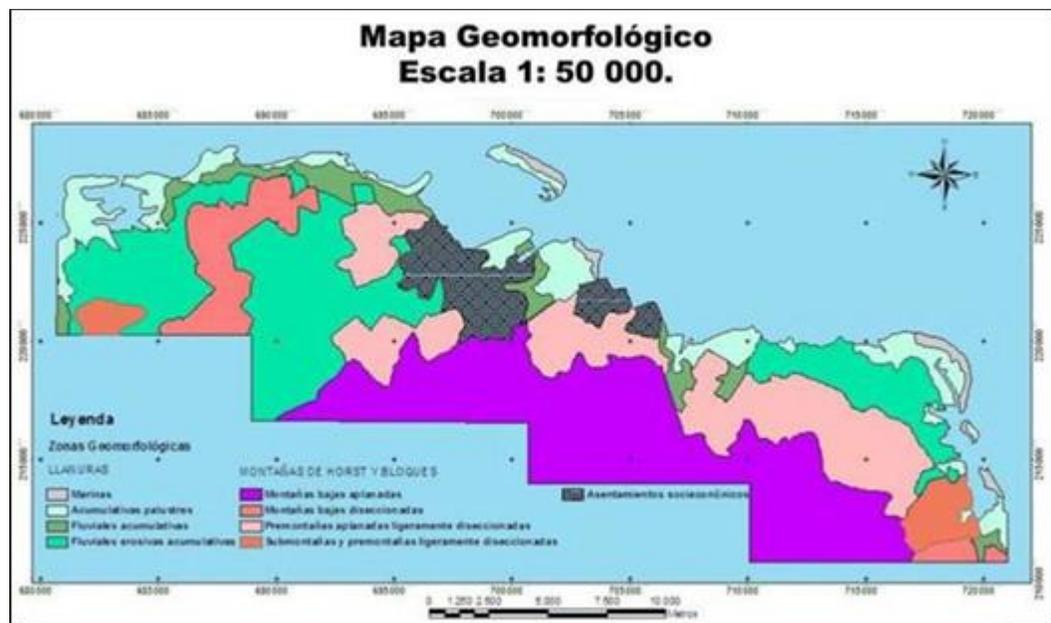
Modificado por Del Rosario, D. 2019.

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, se 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.

## 2.8 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 14).



**Figura 14:** 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 disecionados (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. 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 12° de inclinación.

## **2.9 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 generaron 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 Moa (Rodríguez, A. 1998). Este bloque es uno de los más extensos de la región, posee valores máximos de ascenso relativo (Figura 15) 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.

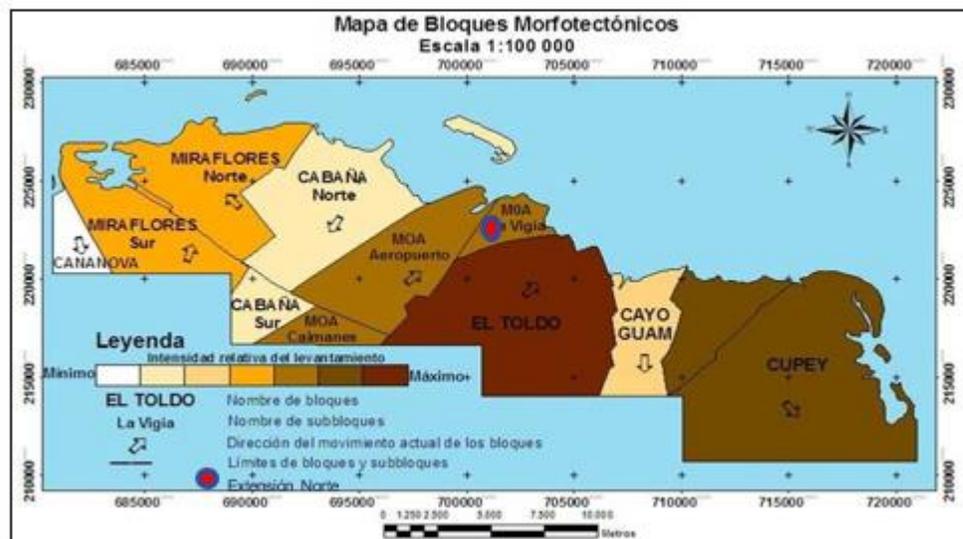


Figura 15: Mapa de bloques morfotectónicos de la región de Moa (tomado de Rodríguez, A. 1998).

## 2.10 Sismicidad del área de estudio

Aunque no se tienen reportes históricos sobre 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 la falta de un sistema para recopilar estos tipos de datos no constituye un elemento confiable para descartar la posible ocurrencia de fenómenos de este tipo en el pasado.

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 (CENAI) 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°

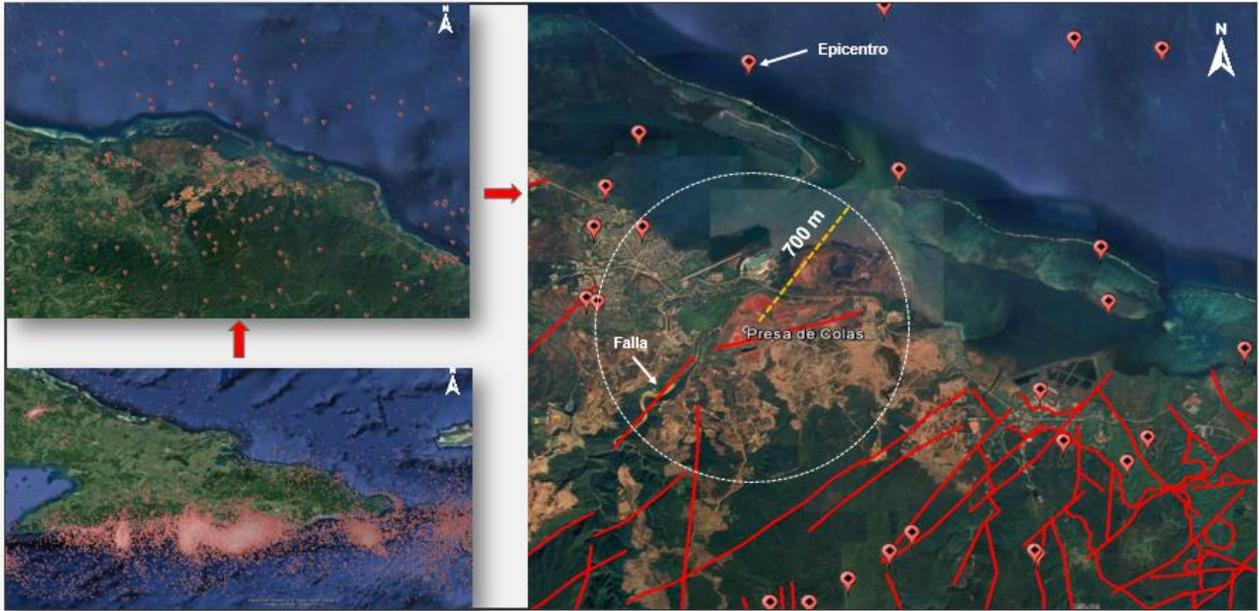
48' de Longitud Oeste frente a la localidad de Cupey, a una profundidad de 5 km. Este sismo con una intensidad máxima de VI en la escala MSK en Moa, produjo agrietamientos de paredes en escuelas y edificios de viviendas de esta ciudad. Este es el primer terremoto con estas características que se registra 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).

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 16).

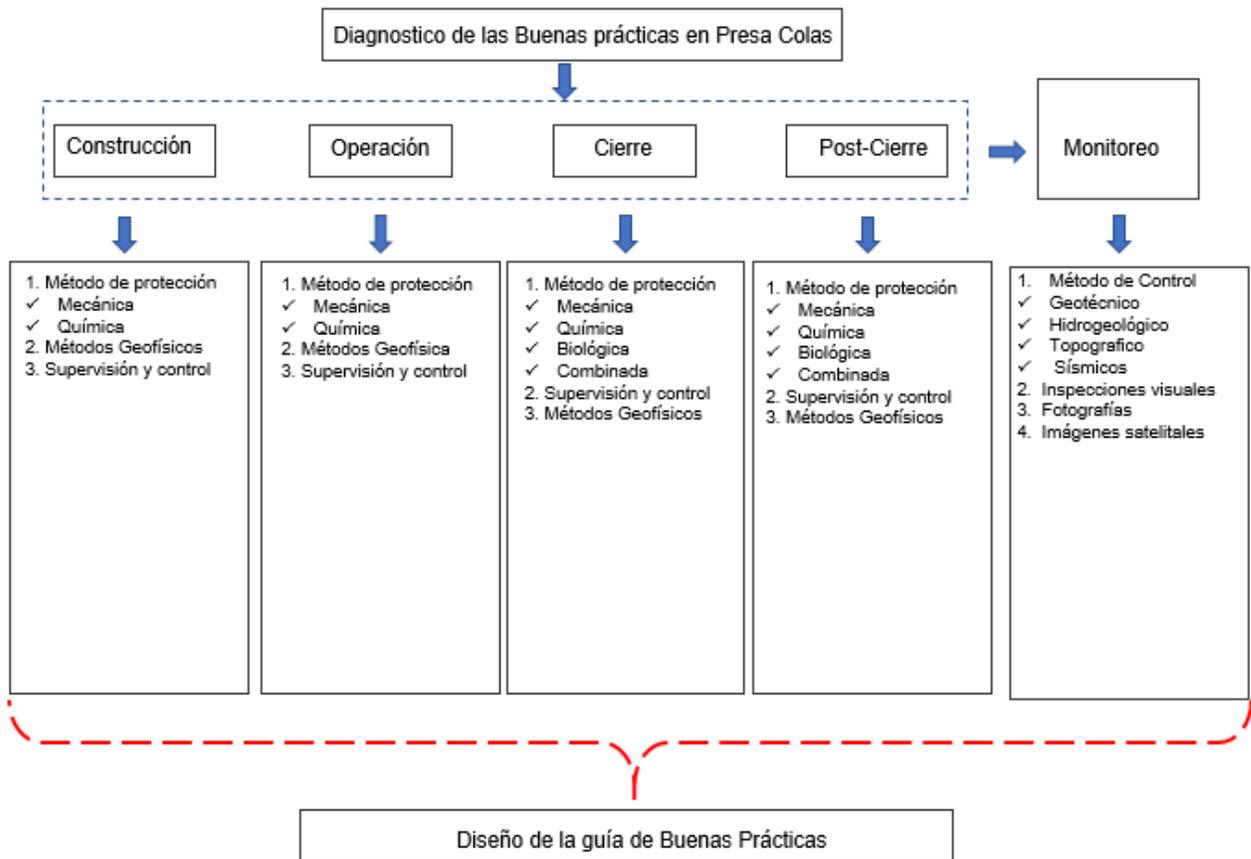
En el año 2018 se reportó en el municipio de Moa durante los días 6 y 7 de octubre la ocurrencia de sismos perceptibles en todo el territorio, los cuales tuvieron su epicentro en Haití, con coordenadas de 20.130 grados de latitud Norte y 73.055 grados de longitud Oeste (el primero), así como de 20.11 grados de latitud Norte y -73.02 grados de longitud Oeste (el segundo). Ambos sismos con un epicentro localizado 116 km al este del municipio Maisí y una magnitud de 5.9 e y 5.2 en la escala de Richter. Estos sismos fueron percibidos con una intensidad mucho menor en el extremo oriental cubano.



**Figura 16:** Mapa sismo tectónico del área de estudio, radio 700 m de la Presa de Colas. Elaborado por el autor. Fallas según el mapa geológico Instituto de Geología y Paleontología (IGP).

### **2.11 Métodos de trabajo que se emplean en las etapas de construcción, operación, cierre y post cierre en presas de colas.**

Los métodos de trabajos identificados, durante la búsqueda bibliográfica a nivel internacional y nacional de las buenas prácticas, permiten tener un buen manejo y control de la presa de colas. En la Figura 17 se muestra el resultado y las particularidades de cada una de ellas en las diferentes etapas de construcción, las cuales tributan a la guía de diseño de buenas prácticas propuesto.



**Figura 17:** Organigrama de la investigación. Elaborado por el autor.

A continuación, se realiza una descripción de los métodos de protección empleados en las presas de colas, los cuales se han transformado en buenas prácticas ambientales:

➤ **Control de calidad**

**Ensayos geotécnicos**

**Terraplén de prueba**

Procedimiento para determinar el régimen óptimo de trabajo del equipo de compactación en los suelos procedentes de una zona de préstamo, para las condiciones de una obra dada, determinando el espesor de capa y el número de pasadas más eficiente del compactador utilizado, teniendo en cuenta los elementos que favorecen la organización y el uso tecnológico de los equipos utilizados. El terraplén de prueba se define como una obra de movimiento de tierra que se realiza como parte de la investigación geotécnica del suelo como material de construcción, con la finalidad de conocer los parámetros de compactación más eficientes de un suelo, de acuerdo con las características de un

compactador determinado y las condiciones de trabajo del suelo.

### **Proctor: ensayos de compactación**

Es un ensayo de compactación de suelo que tiene como finalidad obtener la humedad óptima de compactación de un suelo para una determinada energía de compactación. La humedad óptima de compactación es aquella humedad para la cual la densidad del suelo es máxima, es decir, la cantidad de agua que hemos de añadir a un suelo para poderlo compactar al máximo con una energía concreta.

La compactación de un suelo produce un incremento en la densidad del material y con ello tres beneficios importantes:

- Reducción de la compresibilidad
- Incremento de la resistencia al corte
- Disminución de la permeabilidad

### **Granulometría**

El ensayo o análisis granulométrico consiste en la medición y gradación de los granos o partículas constitutivas de una muestra de suelo o formación sedimentaria con el fin de determinar sus propiedades mecánicas, cálculos de abundancia, y la separación de los componentes del sustrato.

Para este análisis se hace pasar una muestra seca, disgregada y pesada por diferentes tamices dispuesto de mayor a menor abertura, agitándolos para hacer pasar la muestra a través de ellos.

### **Humedad**

Determina la humedad de los suelos y las rocas en el laboratorio mediante el secado de un espécimen en la estufa a una masa seca constante, y se determina el contenido de humedad, utilizando la masa de agua y la masa del espécimen seco. Se mantienen las muestras que se almacenan antes del ensayo en recipientes herméticos no corrosivos a una temperatura entre 3 °C y 30 °C, y en un área que evite el contacto directo con la luz solar. Las muestras alteradas contenidas en distintos recipientes se deberán almacenar de forma tal, que se evite

o minimice la condensación de la humedad en el interior de los recipientes.

### **Perforación (estudios geotécnicos)**

Permite conocer las condiciones del terreno, lo que es de suma importancia si se quiere trabajar en él, entre otras cosas realizar un sondeo geotécnico te permitirá:

- Conocer las condiciones geológicas e hidrológicas: el sondeo geotécnico permite conocer las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo, así como los perfiles estratigráficos. Datos cruciales para realizar el cálculo del proyecto y prever cualquier variación que pueda generarse por las condiciones del terreno.
- Determinar problemas constructivos: luego de realizar la perforación geotécnica y obtener sus resultados se pueden determinar factores como el tipo de maquinaria a emplear, cimentación, los materiales que deben ser excavados, profundidad del nivel freático, riesgos de filtraciones, etc.
- Definir la tipología y dimensiones del proyecto: este método de exploración geotécnica ayuda a que lo generado por cimentaciones, excavaciones, estructuras de contención, entre otros; no generen inestabilidad de las estructuras o del terreno.

Realizar este tipo de estudio geotécnico es importante porque antes de afrontar cualquier proyecto se deben conocer las características del terreno en el que se va a trabajar.

Este método de exploración geotécnica también presenta importantes ventajas con relación a otras técnicas, entre ellas están:

- Se trata de un método directo que permite una interpretación real y comporta factores de seguridad muy altos.
- Permite realizar ensayos in situ a diferentes profundidades.
- Con la perforación geotécnica se pueden alcanzar mayores profundidades

que con otras técnicas.

- Permite obtener muestras alteradas o inalteradas.
- Con este estudio geotécnico se puede reconocer el territorio bajo nivel freático y atravesar capas de alta resistencia.
- Funcionan como punto de instalación para diferentes aparatos y herramientas como tuberías pizométricas, elementos de auscultación y de medida.

### **Piezómetros**

Se corresponden con elementos de monitoreo que se utilizan para mediciones del agua subterránea. En ellos se pueden medir parámetros como la profundidad del nivel freático y la presión intersticial del terreno en suelos y rocas.

Los piezómetros también permiten la extracción de muestras de agua para determinar sus componentes o incluso para detectar la presencia de elementos contaminantes como los hidrocarburos. El uso de los piezómetros es amplio en temas de geotecnia e hidrogeología.

La medición del nivel freático típicamente se utiliza una sonda eléctrica acústica portátil, graduada, que se introduce en el piezómetro desde la superficie. De acuerdo con su tipo o función los piezómetros clasifican en dos tipos:

- Abiertos o tipo Casagrande
- **De cuerda vibrante:** empleados en la presa de colas de MOA NICKEL S.A.

Los piezómetros de cuerda vibrante se utilizan para controlar, además del nivel freático, las variaciones de las presiones intersticiales del terreno en el punto donde están instalados, son adecuados para el seguimiento y medición de presiones a largo plazo. Las mediciones de este tipo de piezómetros se basan en un modelo de frecuencia de vibración, la cual se asocia proporcionalmente con la presión de poro. La medición de la frecuencia vibratoria se realiza mediante un cable tensado a una membrana y un tubo principal; la

medición se realiza por medio de una bobina electromagnética.

## **Libros de seguridad y salud del trabajo**

El libro de seguridad recoge todos los aspectos relacionados con las instrucciones de seguridad de la presa de colas para cada una de las actividades.

## **Registro de inspección diaria**

En los trabajos de supervisión los especialistas realizan anotaciones en los libros de control, como parte de las buenas prácticas de inspección del cumplimiento de los parámetros de diseño, incidencias ocurridas en las diferentes etapas de construcción.

### **➤ Control topográfico**

#### **Inclinómetro**

Permite medir movimientos horizontales a lo largo de la vertical, por lo que resulta muy útil para detectar la zona de movimientos más acusados, su evolución y, en ocasiones, la velocidad de los mismos.

#### **Monumentos**

Los monumentos son un marcador fijo relativamente permanente utilizado en topografía, tal como un bloque de hormigón o una placa de acero, con la inscripción de la localización y la cota.

#### **Vuelos de drones**

Permiten la toma de ortofoto, realiza un modelo digital del terreno, cálculo de volumen, determina áreas de acumulación de aguas, levantamiento y perfiles topográfico, monitoreo de la reforestación de los diques y de residuos producto de la actividad minera.

#### **Imágenes satelitales**

Es una representación numérica de las características topográficas del terreno, a partir de las coordenadas tridimensionales (x, y, z) de los puntos que lo definen. Es la representación continua de una superficie. Con el Modelo Digital del Terreno se logra representar la superficie topográfica real, todos los puntos están a nivel del suelo natural, por lo que pueden ser empleados para fines hidrológicos, los cuales permiten hacer

análisis de escurrimientos, correntias, inundaciones, también, pueden ser empleados en estudio de erosión, anteproyectos de infraestructuras vial, como redes de carreteras y ferroviarias, canalización, análisis de riegos, representación del relieve del terreno mediante curvas de nivel, cálculo de volúmenes, trazado de perfiles y visibilidad entre puntos.

### ➤ **Control hidrogeológico**

#### **Pluviómetro**

Es un instrumento que se emplea en las estaciones meteorológicas para la recogida y medición de la precipitación. Se usa para medir la cantidad de precipitaciones caídas en un lugar durante un tiempo determinado.

La cantidad de agua caída se expresa en milímetros de altura (o equivalentemente en litros por metro cuadrado). El diseño básico de un pluviómetro consiste en una abertura superior (de área conocida) de entrada de agua al recipiente, que luego es dirigida a través de un embudo hacia un colector donde se recoge y puede medirse visualmente con una regla graduada o mediante el peso del agua depositada. Normalmente la lectura se realiza cada doce horas. Un litro caído en un metro cuadrado alcanzaría una altura de un milímetro.

#### **Pozos hidrogeológicos**

Controla la calidad del agua en los perímetros de la presa, con el objetivo de definir infiltraciones de agua ácida hacia el exterior y valorar las variaciones de la columna de agua.

#### **Dren francés**

Son zanjas poco profundas recubiertas de geotextil y rellenas de material filtrante en donde existe un conductor inferior de transporte su objetivo es captar y filtrar las aguas de escorrentía de los terrenos y evitar que queden estancadas.

### ➤ **Método mecánico**

#### **Construcción de gaviones**

Los gaviones son utilizados para la construcción de muros frontales del dique de tierra

armada, combinados con paños de red de malla hexagonal a doble torsión empotradas en el terreno que permiten reforzar el macizo de suelo reforzado (dique). Los sistemas de gaviones contribuyen a soportar los empujes generados por el macizo a contener. El gavión es conformado con rellenos de rocas de 4" a 6", las cuales deberán estar libres de raíces, materia orgánica, y otros elementos perjudiciales, aspecto que debe ser supervisado para evitar la construcción con materiales de características inestable o rocas sobre dimensionadas. En países como Perú son empleados para la elevación de los depósitos de relaves y garantizar la estabilidad de los diques externos de las presas de relaves. (Ciriaco Apaza, 2019).

### **Empleo de geotextil**

Es un sistema de impermeabilización con el propósito de eliminar algún flujo del depósito de relaves hacia el dique principal y cubrir el vaso de almacenamiento y la superficie del talud del dique aguas arriba. La impermeabilización del vaso consta de colocar el geotextil a todo lo largo del dique aguas arriba, se coloca el geotextil en contacto directo con el talud perfilado, luego se coloca la geomembrana a todo lo largo del dique y otra vez se coloca el geotextil, quedando de la siguiente manera, geotextil, geomembrana, geotextil, para posteriormente anclar la geomembrana en ambos estribos del dique y en la corana o cresta de la misma.

### **Geomembrana**

El objetivo de la impermeabilización del vaso es reducir el flujo de agua a través de un medio permeable mediante el uso de un recubrimiento de muy baja permeabilidad (Geomembrana) integrado con un sistema de protección (Geotextil), con la finalidad de proteger la estabilidad del dique que podría y además de prevenir la contaminación del suelo de las zonas aledañas, así como la contaminación de las aguas subterráneas que se ubican cerca al depósito de colas.

### **Geomallas**

Los taludes son estructuras que están expuestas a deslizamientos, meteorización, erosión o incluso, el hundimiento del mismo, las geomallas tienen un diseño en forma de costillas paralelas tensionadas que aportan un mejor soporte y distribuye la carga uniformemente en un área mayor. Por lo que se utilizan para reforzar y estabilizar suelos blandos, terraplenes, taludes y muros de contención, entre otros.

## **Hydroblock**

Es un contenedor estructural en forma de bloque fabricado con geotextil encapsulado de alta resistencia a la intemperie. Son rellenos por medios mecánicos o hidráulicos con tierra o arena de la obra, para obtener unidades de gran masa y volumen que se acomodan en el terreno de forma versátil por su forma y tamaño. Se utilizan en la construcción de estructuras de gravedad, en la fachada de muros en suelo reforzado y en estructuras de control hidráulico, control de erosión de riberas y rehabilitación de bancos erosionados, revestimiento de taludes de canales y protección de tuberías submarinas.

## **Rip-rap**

Se emplea en la protección de los taludes, los canales o las zonas sujetas a la erosión por la acción del agua. El rip-rap protege el suelo de la erosión disminuyendo la velocidad de las escorrentías concentradas. Se utiliza para estabilizar los taludes que son inestables debido a la infiltración y a la acción directa de corrientes de ríos o arroyos.

### ➤ **Control sísmico**

## **Acelerómetro**

Se utilizan en mediciones de aceleración gravitacional estática, lo que le permite determinar el ángulo de desviación del objeto medido de la vertical, así como en mediciones de aceleración dinámica debido a golpes, movimiento, impacto o vibración, es decir, vibraciones de baja amplitud y baja frecuencia, que alcanzan varias docenas de Hz.

## **Monitoreo de actividad sísmica**

Su objetivo es contribuir a registrar, analizar, monitorear y guardar los Sismos ocurridos en la República de Cuba y realizar un pronóstico de posible ocurrencia. Establecido en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, (NC 46/2017, CENASIS).

### ➤ **Métodos geofísicos**

## **Ground Penetration Radar (GPR)**

Este método se encarga del estudio de la tierra desde el punto de vista físico, su objetivo es determinar los fenómenos relacionados con su estructura, condiciones físicas e historia evolutiva. Es un sistema electromagnético diseñado para la localización de objetos, exploración y estudio no destructivo bajo la superficie de la tierra. Este método se aplica en la geología al estudio e investigación del basamento rocoso permitiéndonos descubrir

fallas y estructuras geológicas presentes en el subsuelo rocoso.

### **Tomografía**

El método constituye una técnica de investigación en dos dimensiones (2D) del corte en profundidad, con un alto grado de detalle y un mínimo error en las mediciones, determinar las posibles zonas de fallas o fracturas en la zona de estudio y los tipos los diferentes tipos litológicos presentes en la zona en los primeros 20 y 50 m de profundidad.

#### ➤ **Método químico**

### **Sustancias bituminosas**

Se utiliza para la impermeabilización de presas de tierra y escollera. Se reviste el paramento de aguas arriba por medio de una o dos capas de material asfáltico de modo que se cree un revestimiento impermeable. Este método logra un control efectivo ante la posible erosión eólica o hídrica de los diques de la presa de colas.

### **Polímeros**

Son materiales inertes los cuales sellan la superficie, evitan la erosión, la emanación de polvo y la degradación debida a la lluvia, evitando así desprendimientos.

### **Hidrogeles**

Sustancia que es capaz de absorber 400 veces su peso en agua, la cual libera junto con nutrientes de forma sostenida (manteniendo el suelo húmedo), evita la pérdida de nutrientes y permite el desarrollo y establecimiento de las especies, garantizando la absorción de agua y nutrientes en la planta en un medio tan adverso para el desarrollo de las plantas como son las presas de colas.

#### ➤ **Control biológico y medio ambiental**

### **Pastos**

En la presa de colas se emplean diferentes tipos de técnicas de estabilización, entre estas se aplican la bioingeniería, garantizando la estabilización de taludes, además de cambiar el impacto visual de la presa de colas, a través de la combinación de los métodos tradicionales con los métodos de protección vegetal. Las especies empleadas: pastos (Pasto Bermuda), (Vetiver), (Hierba de Guinea), (Pasto Estrella), arbustos: (Icaco) y (Marañón).

## **Fito-estabilización**

Es una alternativa de vegetación dentro de sus principales ventajas están: más económica que otras técnicas de estabilización, consiste en la implantación de especies arbóreas nativas en los depósitos terminados (no activos), nativas capaces de resistir y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales, a fin de estabilizar física y químicamente sustratos ricos en metales como es el caso de los depósitos de colas.

## **Riego de agua en caminos**

Las construcciones de presas de colas provocan un impacto negativo tanto a la flora y la fauna como al ser humano. Las emisiones de las partículas de polvo son mitigadas mediante el riego del agua en los caminos de la presa, su aplicación es efectiva, pero tiene una corta durabilidad y se requiere de un mantenimiento constante, por la acción del sol, el aire y el constante tráfico de vehículos.

### **➤ Mantenimiento de estructuras auxiliares**

La dinámica de operación, los diferentes agentes y factores ambientales disminuyen la calidad y estabilidad de las estructuras y sistemas que conforman la presa, como aliviaderos, tuberías, sistemas de bombeo, caminos de acceso, canales de desviación, líneas eléctricas y de comunicación, así como los depósitos de agua a recircular. El seguimiento y cumplimiento de los trabajos de mantenimiento contribuyen a la estabilidad de la presa en todas sus etapas.

## **2.12 Diseño de la guía de las buenas prácticas**

El diseño de la guía de las buenas prácticas permite:

- Disminución de los costos de construcción, operación y cierre de la obra por concepto de no reparación de diques y contrafuertes dañados por la erosión o la ocurrencia de deslizamientos.
- Se logra demostrar el impacto de las buenas prácticas sobre el medio ambiente, la economía y la sociedad.
- Elaboración de un documento que recoge las buenas prácticas aplicadas durante

el ciclo de vida de los proyectos de presas de colas.

### **2.13 Conclusiones parciales**

- ✓ Existen condiciones desfavorables en los suelos de fundación de la presa por estar constituidos por sedimentos poco consolidados emplazados en un valle aluvial que constituye el área de descarga de los ríos Moa, Cabañas y el Arroyo Los Lirios.
- ✓ El método de construcción de la presa aguas arriba incrementa las probabilidades de fallas.
- ✓ El diseño de una guía que declara las buenas prácticas garantiza la prevención y mitigación de fallos de origen natural o antrópico.

## **CAPÍTULO III. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS BUENAS PRÁCTICAS EN LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA MOA NICKEL S.A.**

### **3.1. Introducción**

El objetivo de la presente sección es diseñar una guía de buenas prácticas, declarando las principales tecnologías disponibles y las recomendadas para los diseños, construcción, operación, cierre y pos-cierre de los proyectos asociados con la conservación de la estabilidad física y química de las presas de colas y contribuyan a minimizar los riesgos a las personas, la economía y al medio ambiente en todo el ciclo de vida de las presas.

### **3.2. Identificación de las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A.**

En la última década diferentes compañías e instituciones aportaron nuevas prácticas en la presa de colas de Moa a través de los proyectos, enfocadas a mitigar las probabilidades de falla de las estructuras activas e inactivas en la presa de colas, pero estas buenas prácticas no están consolidadas o documentadas de forma tal que exista una guía de las mejores experiencias que puedan adecuarse a las colas provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión.

Los recorridos de campo realizados, la interacción con las diferentes áreas y especialistas que actúan en el proceso de construcción, contribuyeron a identificar las acciones ejecutadas, las cuales se traducen de forma general en las buenas prácticas.

Las buenas prácticas identificadas tributan a garantizar la seguridad de la presa de colas, con el objetivo de minimizar el impacto sobre la sociedad, el medio ambiente y la conservación adecuada del material de depositado.

En la Tabla 1 se muestra la guía de buenas prácticas en las presas de colas de la MOA NICKEL S.A. Los métodos mecánicos y el mantenimiento de estructuras auxiliares (6) constituyen los más representativos seguido del control hidrogeológico (4).

**Tabla 1:** Guía de Buenas Prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A.

<b>Método mecánico</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Mantenimiento de estructuras auxiliares</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Control de calidad</b>	<b>Aplicado</b>
Geotextil	A	Aliviadero	A	Ensayo geotécnico	A
Geomembrana	A	Tuberías	A	Libros de seguridad y salud del trabajo	A
Geomalla	A	Líneas eléctricas y de comunicación	A	Registro de inspección diaria ✓ Fotografía ✓ Video ✓ Personal especializado	A
Hydroblock	A	Sistema de bombeo	A		
Gaviones	A	Camino de acceso	A		
Riprap	A	Canales de desviación	A		
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>		<b>6</b>		<b>3</b>
<b>Control hidrogeológico</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Control biológico y medio ambiental</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Método químico</b>	<b>Aplicado</b>
Recirculación de las aguas	A	Riego de agua en caminos	A	Polímeros	A
Pozo hidrogeológico	A	Hidrogeles y pastos	A	Sustancias bituminosas	R
Dren francés	A	Fito-estabilización	R		
Pluviómetro	A				
<b>TOTAL</b>	<b>4</b>		<b>2</b>		<b>1</b>
<b>Control topográfico</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Control sísmico</b>	<b>Aplicado</b>	<b>Métodos geofísicos</b>	<b>Aplicado</b>
Monumentos	A	Monitoreo de la actividad sísmica	A	GPR	A
Imágenes satelitales	A	Acelerómetro	R	Tomografía	A
Vuelos drone	A				
Inclinómetros	R				
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>		<b>1</b>		<b>2</b>

**Leyenda:** (A) Aplicado, (R) Recomendado

El control de la calidad, hidrogeológico, biológico-medio ambiental, químico y el control topográfico (3) se identificaron como buenas prácticas; en este último se recomienda la utilización de inclinómetros, identificado en la literatura como un equipo que se puede generalizar como una buena práctica.

Los métodos geofísicos (GPR y tomografía), como métodos indirectos, se introdujeron recientemente como parte de las buenas prácticas para el estudio del fundamento rocoso.

### **3.3. Buenas prácticas aplicadas en presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A.**

La consolidación de las buenas prácticas aplicadas durante el almacenamiento de las colas provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión de la empresa MOA NICKEL SA, constituyen una demostración de la implementación de nuevas tecnologías que garantizan la adecuada conservación de este tipo de colas.

Los principales métodos y controles aplicados se describen seguidamente.

#### **3.3.1 Método mecánico**

Las geomallas se emplean en la presa de colas para suministrar a los taludes una mayor estabilidad, disminuyendo los efectos de la meteorización y erosión hídrica. Una vez reforestados los taludes utilizando esta técnica, se garantiza una mayor resistencia de las capas vegetales que se desarrollan de forma natural o artificial, (Figura 18).



**Figura 18:** Instalación de geomallas en los taludes de la presa.

La geomembranas y geotextil son utilizadas en la piscina sur de la extensión norte como láminas geosintéticas que se utilizan para evitar las infiltraciones de aguas ácidas al medio, estas son aplicadas en combinación con geotextil para frenar la destrucción de la geomembrana, (Figura 19).



**Figura 19:** Impermeabilización de los sedimentadores con geomembranas.

Los hydroblock se utilizaron, por ejemplo, en el dique norte de la Extensión Norte para evitar la erosión directa ocasionada por el cauce del río Cabaña, (Figura 20). Estos se ubican de forma tal que garantizan la protección de los diques antes las crecidas del río por intensas lluvias.



**Figura 20:** Implementación de hydroblock en el dique de la extensión norte de la presa de colas.

En la presa de colas los gaviones se utilizan durante la construcción de sectores de escurrimiento de aguas en canales, evitando la erosión y arrastre de sedimentos (Anexo A). El rip-rap permite cubrir las superficies desprovistas de vegetación, evitando el arrastre de los sedimentos.

### **3.3.2 Mantenimiento de estructuras auxiliares**

Las operaciones estables de la presa están sujetas al mantenimiento sistemático de todas las estructuras auxiliares, como aliviaderos, canales de desviación, tuberías, líneas eléctricas y de comunicación. Los caminos de acceso hacia estas estructuras requieren de una alta calidad, siendo las vías que garantizan la entrada efectiva ante eventos o necesidades de mantenimiento. Los sistemas de bombeo (Figura 21) garantizan el trasiego de las aguas a ser reutilizadas en el proceso.



**Figura 21:** Sistema de bombeo para la recirculación de las aguas de la presa de colas.

### **3.3.3 Control de calidad**

La estabilidad de cada etapa de la presa de colas está sujeta a la aplicación de un estricto y riguroso control de calidad. La realización de los ensayos geotécnicos de forma periódica, cumpliendo con las normas y procedimientos de construcción establecidos, durante la operación, cierre y post-cierre que se ejecutan, constituyen una base indispensable para garantizar la seguridad de las diferentes estructuras que conforman la presa.

Entre los ensayos geotécnicos que se aplican en la presa de colas se encuentra las perforaciones (Figura 22 A), que se realizan con el objetivo de conocer la composición litológica sobre la cual se encuentra construida la presa.

La ejecución de los sondeos con alto rigor técnico, garantizan la recuperación de los testigos de perforación (Figura 22 B) para la posterior documentación y determinación de las propiedades físicas. Las pruebas de penetración estándar (SPT) contribuyen a determinar la resistencia, plasticidad y el nivel de deformación que presentan los materiales.



**Figura 22:** Ensayos geotécnicos que se realizan en la presa de colas de la MOA NICKEL S.A.

La realización de los experimentos, mediante el terraplén de prueba (Figura 22 C), permite determinar el espesor de la capa y el número de pasadas más eficiente al material utilizado en la construcción de los diques de la presa; en correspondencia con las características técnicas del compactador.

La determinación de la humedad a través de los ensayos del Proctor, garantizan definir la cantidad de agua que se debe aplicar al material, para obtener la compactación óptima del suelo, para una determinada energía de compactación. En este proceso se logra incrementar la densidad de los materiales y la resistencia al corte, además de disminuir la compresibilidad y la permeabilidad.

El empleo de los dataloger (Figura 22 D), sistemas de recolección de datos digitales de

las mediciones de los piezómetros, revelan la profundidad del nivel freático y la presión intersticial del terreno en suelos y rocas; estos piezómetros se encuentran distribuidos de forma uniforme en toda la presa y contribuyen a monitorear la carga hidrostática en el interior de la presa.

Los registros de las operaciones en los libros de seguridad y salud del trabajo constituyen evidencias que permiten certificar el cumplimiento o no de los procedimientos establecidos, además de constituir documentos de guía para la elaboración de los planes de mejoras que deben ser implementadas.

La realización de las observaciones directas a través de los registros de inspección diaria de los especialistas y supervisores responde de forma directa al control de las operaciones que se ejecutan y alertan de posibles desviaciones en los diseños previstos. La toma de fotografías, elaboración de videos durante las visitas de campo constituyen evidencias de la calidad o deficiencias detectadas durante la ejecución de los trabajos.

### 3.3.4 Control hidrogeológico

Las colas depositadas alrededor de las zonas de descarga del dique libre, son drenadas a través de los sistemas de drenaje, los cuales permiten retirar y controlar un grado adecuado el agua contenida dentro del perímetro de la presa. Figura 23.



**Figura 23:** Proceso de extracción de las aguas contenidas en las colas.

En el proceso de deposición de las colas, una vez sedimentados los materiales sólidos en

la laguna de aguas claras, las aguas son conducidas hacia las piscinas hermetizadas para la conservación y reciclaje de estas nuevamente al proceso hidrometalúrgico.

El agua es reciclada y enviada a la planta para su aprovechamiento en el proceso de lavado a contracorriente y permite la recuperación en parte del níquel y cobalto contenido en las mismas. 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.

Las aguas que pudiera captar como resultado de las escorrentías superficiales, impidiendo de este modo su ingreso a la cubeta de la presa de colas, son controladas con el canal de contorno, el cual permite el desvío de estas aguas. Los aliviaderos garantizan el paso del flujo de agua para eventos extremos, tormentas de probabilidad de 1 en 1 000 años, intensas lluvias, etc.

Las colas de la presa de la Pedro Sotto Alba poseen un elevado índice de humedad, con una porción de líquido superior al 60%. La ubicación de pozos hidrogeológicos (Figura 24) en diferentes partes de la presa contribuye al monitoreo del nivel freático en los diques.



**Figura 24:** Monitoreo de las aguas subterráneas en los diques de la presa de cola.

La ubicación de la presa de colas próximas a la cota cero, en relación al nivel medio del mar, en zonas de llanuras costeras débilmente onduladas y pantanosas de la desembocadura y cauces de los ríos Moa y Los Lirios sugieren un estricto control del nivel

freático de las aguas.

Las implementaciones del dren francés garantizan aliviar o disminuir el nivel freático de las aguas estancadas en los diques. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de implementación, luego que el piezómetro ubicado al NE de la Extensión Norte reportará un valor elevado de las aguas subterráneas estancadas en el dique. Esto permitió poner en alerta a los proyectistas y ejecutores, donde se procedió a construir un dren que permitiera aliviar el nivel freático estancado en esa zona del dique.



**Figura 25:** Construcción de un dren francés en la Extensión Norte para la disminución del nivel freático.

Las características propias del clima tropical húmedo exigen de un estricto control de las precipitaciones a través de la instalación de pluviómetros (Figura 26), los cuales registran la intensidad de las lluvias y monitorean el incremento de la carga hídrica de la presa; además de orientar sobre la calidad del material en cuanto al nivel de saturación para ser usado en el proceso de compactación.



**Figura 26:** Pluviómetro empleado en el monitoreo de las precipitaciones en la presa de cola.

### 3.3.5 Control biológico y medio ambiental

Las construcciones de presas de colas provocan un impacto negativo tanto a la flora y la fauna como al ser humano. Las emisiones de las partículas de polvo son mitigadas mediante el riego del agua, en los caminos de la presa, la cual se considera una buena práctica. Su aplicación es efectiva, pero tiene una corta durabilidad y se requiere de un mantenimiento constante, por la acción del sol y el constante tráfico de vehículos. (Ver Figura 27).



**Figura 27:** Riego de agua en los caminos de la presa de colas.

La implementación de productos químicos como el hidrogel, garantizan liberar el agua junto con nutrientes de forma continua, contribuyendo a mantener la humedad del suelo en los taludes, permitiendo que los pastos sembrados en los diques de la presa puedan

absorber los nutrientes y el desarrollo de la vida microbiana en la litosfera. (Figura 28).



**Figura 28:** Aplicación de hidrogel y pastos en el talud oeste de la presa de colas, antes y posterior a la implementación.

La fito-estabilización se recomienda por ser una práctica que se utilizan en las presas de cola para remover contaminantes inorgánicos (como metales) mediante el uso de especies vegetales o plantas. Los contaminantes son absorbidos por las raíces de las plantas, donde son acumulados, evitando así los efectos tóxicos sobre otros seres vivos.

Se utilizarán especies vegetales nativas para inmovilizar contaminantes en el suelo, sedimentos y lodos. Previene y reduce la movilidad y la migración de contaminantes a través de erosión por viento y agua. Disminuye la biodisponibilidad (cantidad presente) de metales para su entrada a la cadena alimenticia.

### **3.3.6 Método químico**

La región de Moa se caracteriza por ser una zona tropical húmeda donde existen abundantes precipitaciones que aceleran los procesos erosivos, en especial los taludes que conforman la presa. Las aplicaciones de polímeros permiten mitigar la erosión de los taludes, sellando la superficie y evitando el contacto directo del agua con el material que conforma los diques, evitando así los desprendimientos y degradación por la acción de la lluvia. (Figura 29).



**Figura 29:** Aplicación de polímeros para la estabilidad de los taludes de la presa de colas.

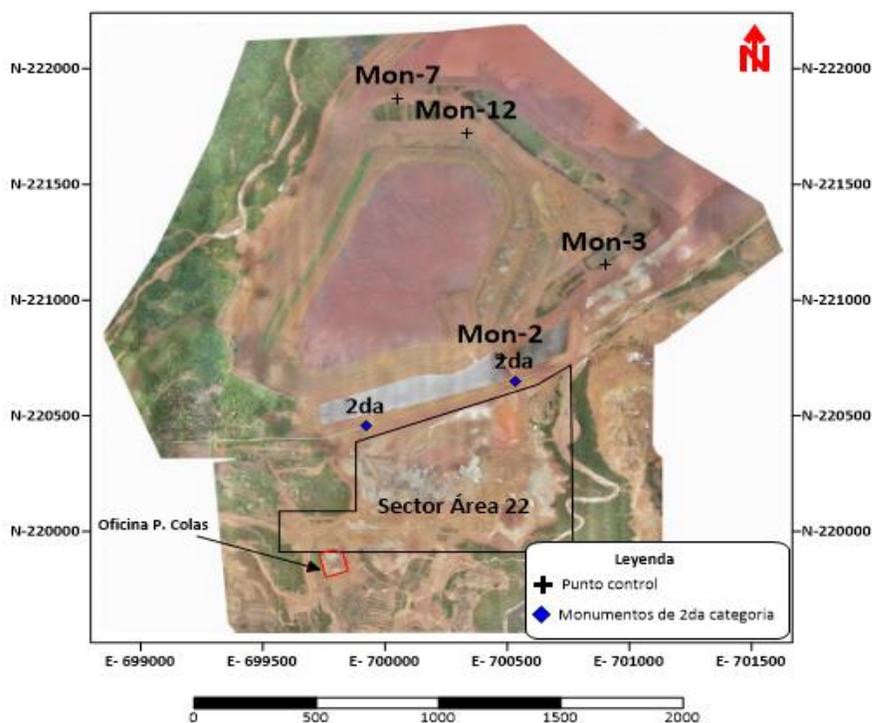
La sustancia bituminosa se recomienda para la impermeabilización de presas de tierra y escollera. Se reviste el paramento de aguas arriba por medio de una o dos capas de hormigón asfáltico de modo que se cree un revestimiento impermeable de unos 20 a 25 cm. Sellado de juntas en pavimentos de hormigón. Los cambios dimensionales producidos en el hormigón por la retracción de fraguado y por variaciones de humedad y temperatura obligan a disponer juntas, pues si no se producen grietas.

Estas deben ser impermeables, para eso pueden usarse productos bituminosos que se adhieran perfectamente al hormigón. El material será dúctil y duradero. Material de relleno: madera, corcho, caucho y materiales bituminosos como láminas prefabricadas de punto de reblandecimiento alto con arena y polvo de lana de vidrio. Estabilización de suelos granulares o cohesivos. Es una operación encaminada a mejorar la estabilidad de los suelos para proporcionar calidad a la explanada o capas de subbase. Mejorar su estabilidad supone disminuir su deformabilidad ante una carga o cargas repetidas, bajo cualquier condición exterior de humedad, temperatura, etc.

### **3.3.7 Control topográfico**

El control topográfico de la estructura, como se describió anteriormente, es una buena práctica a nivel internacional que permite alertar de forma sistemática sobre las zonas donde se presentan desplazamientos que deben ser tenidos en consideración para implementar de forma preventiva las medidas correctoras que permitan mitigar o eliminar la posible falla de la estructura.

Dentro de las buenas prácticas implementadas en la presa de colas de MOA NICKEL S.A. está la realización de mediciones mensuales de los monumentos topográficos distribuidos en toda la presa de colas. En la presente investigación se muestra un ejemplo, a partir de la evaluación de los datos disponibles de cuatro puntos de control de monitoreo topográficos, dos localizados hacia el Norte y dos hacia el Este de la presa de colas, (Figura 30).



**Figura 30:** Mapa de ubicación de los cuatro monumentos topográficos de control (2) norte y (2) hacia el este de la presa de colas.

Las mediciones se corresponden con el mes de diciembre del año 2021 hasta julio del 2022, donde se realizaron ocho mediciones de control en cada uno de los monumentos, con el objetivo de evaluar la posible ocurrencia de desplazamiento en los diques de la presa, mediante estaciones topográficas de alta precisión y puntos topográficos de control de segunda categoría. La evaluación de los reportes disponibles del control topográfico revela que los análisis se realizan comparando los desplazamientos de las mediciones en relación al mes anterior.

A partir de los datos acumulados de las mediciones se realizó una evaluación integral de

todas las mediciones, comparando los desplazamientos acumulados en relación al punto de control de segunda categoría; lo que permitió revelar con mayor detalle los valores de desplazamiento de los diferentes monumentos analizados.

En la Figura 31 se muestra las diferencias de desplazamiento determinadas durante los trabajos de control de campo. En la dirección Este, los monumentos 7 y 12 presentan los mayores desplazamientos en los meses de abril y julio; Mon 7 de 0.06 cm hacia el oeste en el mes de abril, 0.12 cm hacia el este en el mes de julio. El Mon12 -0.04 hacia el oeste en el mes de abril y de 0.06 cm hacia el este en el mes de julio.



**Figura 31:** Resultados del control de los monumentos topográficos en la dirección Este.

Los monumentos localizados hacia el norte del área de estudio (Mon 7 y Mon12) se muestran los mayores desplazamientos, presentando el valor más alto el Mon 7 (0.13 cm hacia el norte en el mes de junio, en julio -0.10 cm hacia el sur) y el Mon12 de (0.10 cm hacia el norte en el mes de junio y de -0.11 cm en el mes de julio con dirección al sur), (Figura 32).



**Figura 32:** Resultados del control de los monumentos topográficos dirección norte.

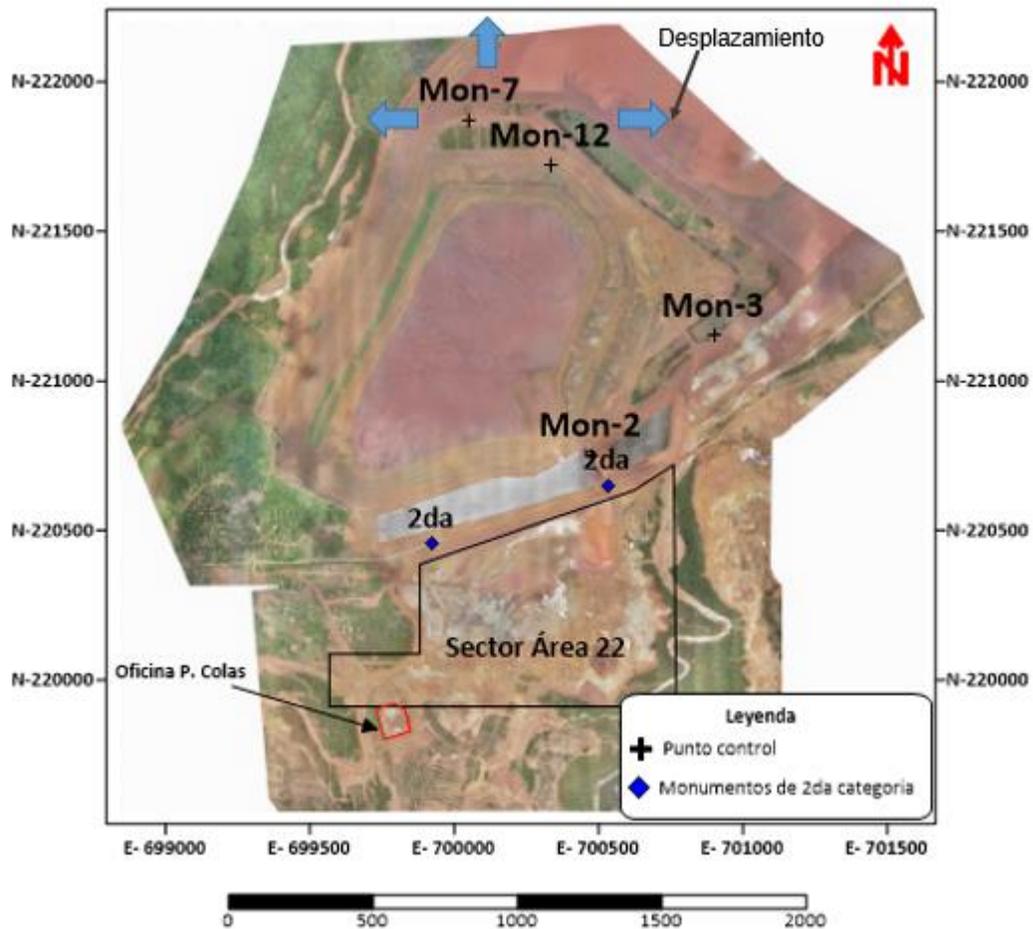
En la Figura 33 se muestran las determinaciones de desplazamiento en la dirección vertical (Z) en los monumentos de la presa de colas, donde los mayores valores se identificaron en el Mon 7 de (0.12 cm y -0.07 cm en el mes de junio), el Mon12 (0.06 cm y de -0.06 cm en abril).



**Figura 33:** Resultados del control de los monumentos topográficos, dirección vertical (Z).

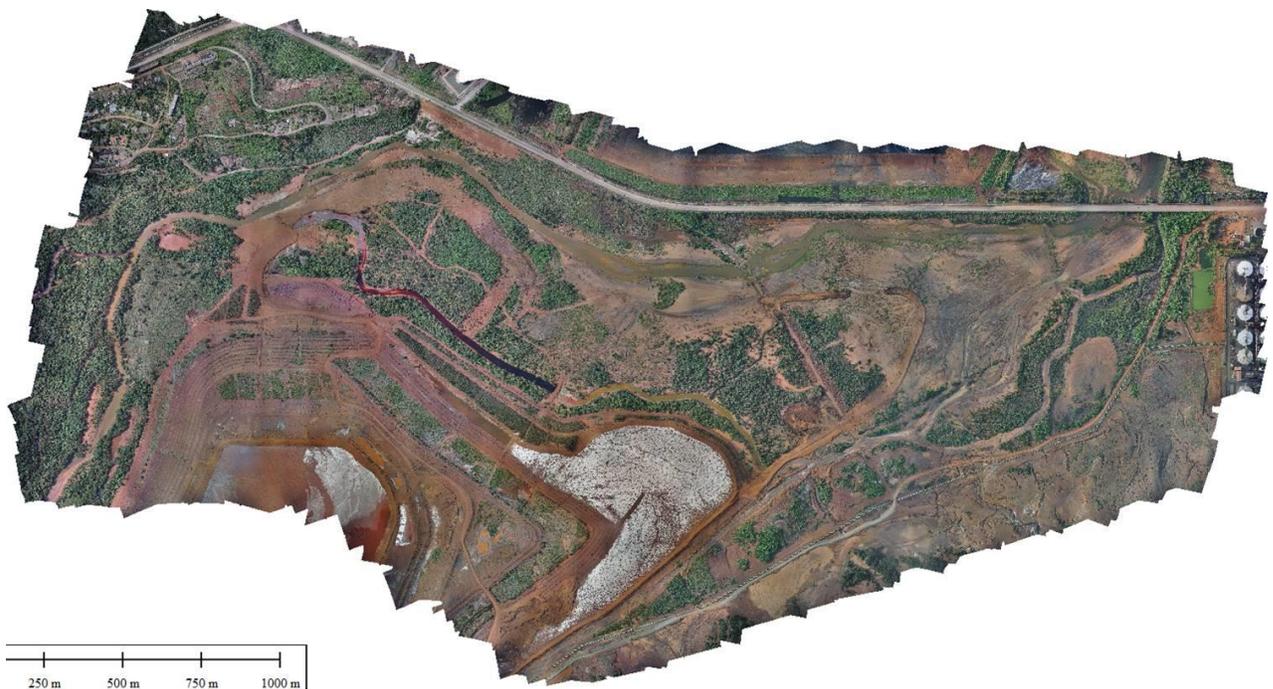
En la Figura 34 se muestran las principales direcciones de desplazamiento del sector norte de la presa de colas, relacionadas con los Mon 7 y Mon 12 en la dirección norte, este y oeste. Estos desplazamientos pudieran estar influenciados por las operaciones que se ejecutan en la extensión norte combinado con la inestabilidad propia de la estructura en

este sector de la presa y la proximidad del dique hacia el oeste con el rio Moa.



**Figura 34:** Mapa de las principales direcciones de desplazamiento del sector norte de la presa de colas.

La evaluación general del progreso de construcción y estabilidad de las estructuras inactivas se realiza a través de la ejecución de los levantamientos topográficos mediante los vuelos de drone y el análisis de las imágenes satelitales. La ejecución de vuelos con control topográfico de forma periódica, constituye una buena práctica que alerta y orienta sobre el estado técnico de las diferentes estructuras, (Figura 35).



**Figura 35:** Ortofoto de la Extensión Norte de presa de colas.

### **3.3.8 Control sísmico**

El control sísmico se realiza a través del monitoreo de la actividad sísmica de los movimientos de tierra registrados por las estaciones sismológicas controladas por el CENAIS. La actualización sistemática de los eventos que ocurren en la región permite orientar sobre necesidad de intensificar los monitoreos de las estructuras en la presa de colas.

El acelerómetro se identificó como buena práctica recomendada para implementar dentro del control sísmico (Ver Anexo D). Acorde al Informe del 2015 de conceptualización, son utilizados en Chile y en el mundo tanto en tranques como en otras obras de ingeniería para monitorear sismos. Sus lecturas son en línea y en general se activan al sobrepasar cierto umbral de aceleración. En tranques chilenos, se instalan generalmente en el muro, tanto en la base como el coronamiento.

### **3.3.9 Métodos geofísicos (Tomografía y GPR)**

El perfil de prueba realizado en con el método de tomografía eléctrica vertical permitió identificar, a partir de los valores de resistividad, tres horizontes principales, (Tabla 2).

La capa de corteza laterítica presenta un espesor y resistividad variable, los valores de

resistividad menores de 20  $\Omega$ .m es característico de las serpentinitas erosionadas: limos, arcillas y arcillas limo arenosas, además de estar asociado con la presencia de humedad en las rocas.

La porción de mayor profundidad del corte, subyaciendo a la zona de baja resistividad con un rango de resistividad del orden 50 – 150  $\Omega$ .m se correlaciona con la serpentinita alterada en presencia de agua subterránea.

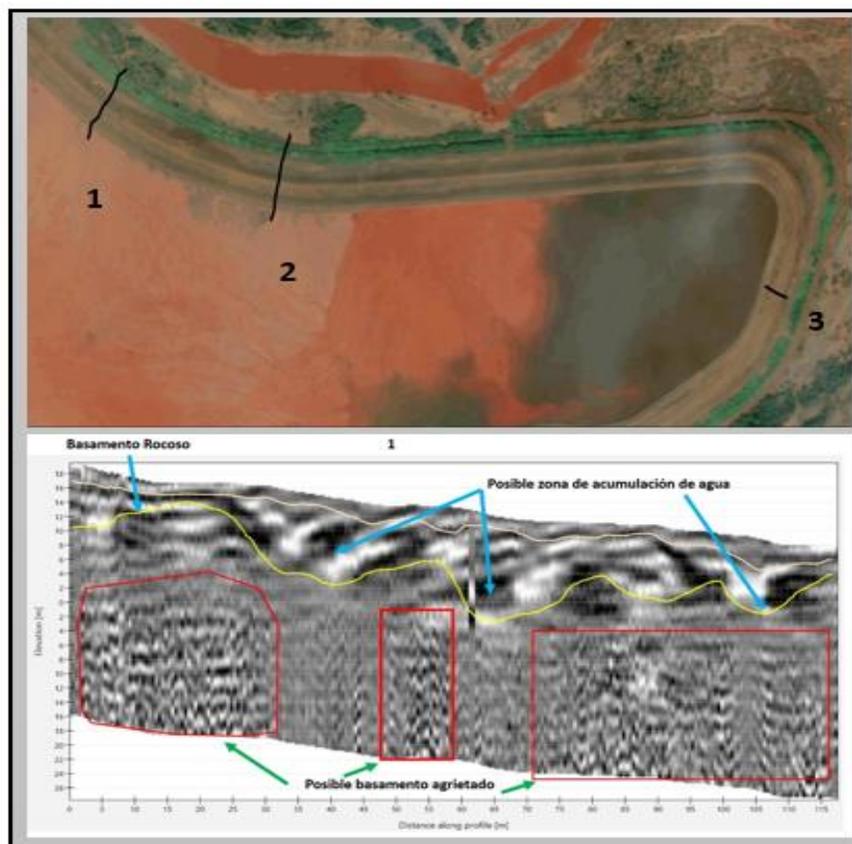
La comparación de los resultados de topografía con las calas geotécnicas consultadas, próximas al área de estudio, contribuyó a la validación del método geofísico como potencial para caracterizar los diferentes niveles de la corteza en la presa.

**Tabla 2:** Resultados del método geofísico de tomografía eléctrica vertical, descripción de las calas.

<b>Capa por tomografía</b>	<b>Descripción de las calas</b>
<b>Laterita</b>	Arena gravo – limosa con fracciones finas a gruesas en ocasiones con perdigones de óxido de hierro. Resistividad 50 – 150 $\Omega$ .m, descripción 5 en el plano EG-2.
<b>Saprolita</b>	Limo arcilloso, arcilla, limo con inclusiones de serpentinita meteorizada. Resistividad <20 $\Omega$ .m.  Limo, arcilla seca, arcilla arenosa, arena con gravas. Resistividad mayor de 20 $\Omega$ .m.
<b>Serpentinitas</b>	Roca muy lixiviada, presente en forma de arena limo - gravosa con arcilla y fracciones de serpentinita. Resistividades menores de 20 $\Omega$ .m en ambiente salino.  Serpentinita muy agrietada y fracturada en presencia de agua subterránea. Resistividad 50 – 150 $\Omega$ .m.  Roca menos agrietada. Resistividad > 150 $\Omega$ .m

En la exploración geológica de los yacimientos lateríticos recientemente se está empleando la geofísica de GPR como método de investigación de la variabilidad del fundamento rocoso de la corteza laterítica.

En el presente año 2022 se realizaron tres perfiles de evaluación en las zonas donde ocurrieron las fallas de los diques de la presa de colas, con el objetivo de valorar el potencial de la geofísica de GPR en revelar las características y variabilidad del basamento rocoso, (Figura 36).



**Figura 36:** Resultados experimentales de geofísica de GPR en el dique de la extensión norte, presa de colas MOA NICKEL S.A.

Los resultados muestran que el fundamento rocoso de los sectores estudiados presenta una alta variabilidad, lo que puede incidir en la acumulación de las aguas de infiltración, incrementando el grado de humedad e inestabilidad de la presa. Las áreas marcadas en color rojo en la Figura 36 revelan las zonas del basamento con mayor intensidad de

agrietamiento, posible relacionado con la presencia de fallas tectónicas, aspecto que debe ser estudiado con otros métodos.

La variabilidad del basamento rocoso a su vez contribuye a que existan zonas donde se puede acumular el agua que se infiltra proveniente de las lluvias o propias de la constitución de las colas. La implementación de la geofísica de GPR puede constituir una buena práctica, que permita identificar y orientar la ubicación de los pozos hidrogeológicos, piezómetros utilizados en el monitoreo de los niveles de agua subterránea dentro de la presa.

### **3.4 Conclusiones parciales**

1. En la presa de colas de MOA NICKEL S.A. se implementan buenas prácticas para la conservación y manejo de las colas ácidas provenientes del proceso metalúrgico, las cuales han permitido diseñar una guía que garantiza:
  - ✧ Recirculación de las aguas hacia la planta metalúrgica permite disminuir el impacto negativo de las aguas ácidas al medio y la recuperación en parte del níquel y cobalto contenido en las mismas. Además de disminuir por costos por no compra de agua y la obtención de ganancias por la recuperación de 1 tonelada de Ni+Co diariamente de las aguas de recirculación de la presa de colas.
  - ✧ El análisis de los datos obtenidos del control topográfico debe considerar la comparación con los valores certificados de segunda categoría.
  - ✧ La implementación de métodos geofísicos indirectos permite evaluar las características del fundamento rocoso, se revela alto nivel de variabilidad en los estratos inferiores existiendo una correlación directa con los fallos ocurridos en el área.
2. Se recomiendan buenas prácticas ambientales para mejorar los procesos de la presa de colas objeto de estudio.

## **CONCLUSIÓN**

1. El diagnóstico del estado de la temática de las buenas prácticas en las presas de colas a nivel internacional demostró la existencia de un alto nivel de información relacionada con la implementación de estos métodos, a escala nacional la información existente es escasa y muy ambigua.
2. Se identificaron las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A., las mismas se agrupan por cada una de las fases del ciclo de vida de los proyectos.
3. Se declararon las buenas prácticas aplicadas en la presa de colas de la empresa MOA NICKEL S.A. a través de una guía, y demostró el impacto positivo de la implementación de las mismas en la economía, la sociedad y el medio ambiente.

## **RECOMENDACIONES**

1. Establecer una guía oficial de buenas prácticas del manejo de colas en el país tomando como referencia la documentación disponible en las empresas mineras y los informes internacionales.
2. Extender la implementación de las buenas prácticas a otras empresas del país que se relacionan con el manejo de colas o desechos peligrosos.
3. Entregar la presente investigación a la Dirección Técnica del Grupo Empresarial Cubaniquel, al Centro de Gestión de Riesgos del Municipio de Moa y a la Oficina Nacional de Recursos Minerales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Arango, E. et al. (2009). "Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo oriental de Cuba. Acta GGM Debrecina. Vol 4, pp 43-52.
2. Arioza, J.D. (2002). Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-CO en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. Revista de Minería y Geología. Nos.1 -2.
3. Ciariaco, S. (2019). Diseño de recrecimiento de las presas de relaves de la unidad de producción de la unidad de producción untuca/minera cori puno SAC, Peru.
4. Charte, R. et., al. (2015). Buenas prácticas en la gestión de la estabilidad química en la industria minera, Chile.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. EMNDC., "Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres". 2010.
9. EMDCN., 2012. "Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres", Cuba.
10. 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.
11. Fonseca, E.; Zelepugin V.N.; Heredia M. (1985): Structure of the ophiolite association of Cuba. Geotectonic, 19: 321 -329.

12. 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.
13. *Guide to the Management of Tailings Facilities* (MAC 1998). Canada, 1998.
14. García, A. (2006). "Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente". Editorial: Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1 -744.
15. 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.
16. 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.
17. Hernández, T. y Guardado, R. (2010). "Rehabilitación de las presas de colas de la mina MOA NICKEL S.A. 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.
18. Hernández, T. y Guardado, R. (2011). "Aplicación de la Bioingeniería al cierre de la presa de colas de la MNSAPSA", Proyecto de cierre, Moa, Cuba.
19. Hernández, T. y Guardado, R. (2012). "Empleo de la Vetiveria Zizanoides para el control de la erosión en la presa de colas de la MNSAPSA", Proyecto de cierre.
20. 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.
21. Hernández, T. y Guardado, R. (2014). "Gestión de Riesgos por Deslizamientos en la presa de colas de la MNSAPSA. I Simposio de Minería y Medio Ambiente, Moa, Cuba.
22. Hernández, T. y Guardado, R. (2014). "Gestión de riesgos por deslizamientos en presas de colas". IV Congreso de desastres, Habana, Cuba.
23. Hernández, T. y Ulloa, M. (2014). "Impacto ambiental de la ampliación de una presa de colas de la industria cubana del níquel". *Revista Minería y Geología*, 30 (3).
24. 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.
25. 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.
  26. Ministerio de Minería de Chile. (2007). Decreto Supremo N o 248: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, 159–182.
  27. Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2015). Decreto 50.
  28. Oliva, G. (1989). "Nuevo Atlas Nacional de Cuba". Instituto de Geografía, ACC.
  29. Rogge, J.R. (1992). "Una agenda de investigación para el manejo de desastres y emergencias, PNUD-UNDRO, Universidad de Minitoba.
  30. Rodríguez, A. (1998). 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.
  31. 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.
  32. 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. 12 (24): 7
  33. SERNAGEOMIN. (2018). Preguntas Frecuentes sobre Relaves, Chile.
  34. The Mining Association of Canada. (2021). A Guide to the Management of Tailings Facilities Version 3.2, Canadá.

## **Páginas de internet**

- <https://www.ancold.org.au/wp-content/uploads/2019/07/Tailings-Guideline-Addendum-July-2019.pdf>.
- <https://www.govinfo.gov/content/pkg/USCODE-2017-title42/pdf/USCODE-2017-title42-chap55-sec4321.pdf>.

## ANEXOS



**Anexo A:** Construcción de gaviones.



**Anexo B:** Tendido de gaviones y geotextiles para relleno de material de préstamo.

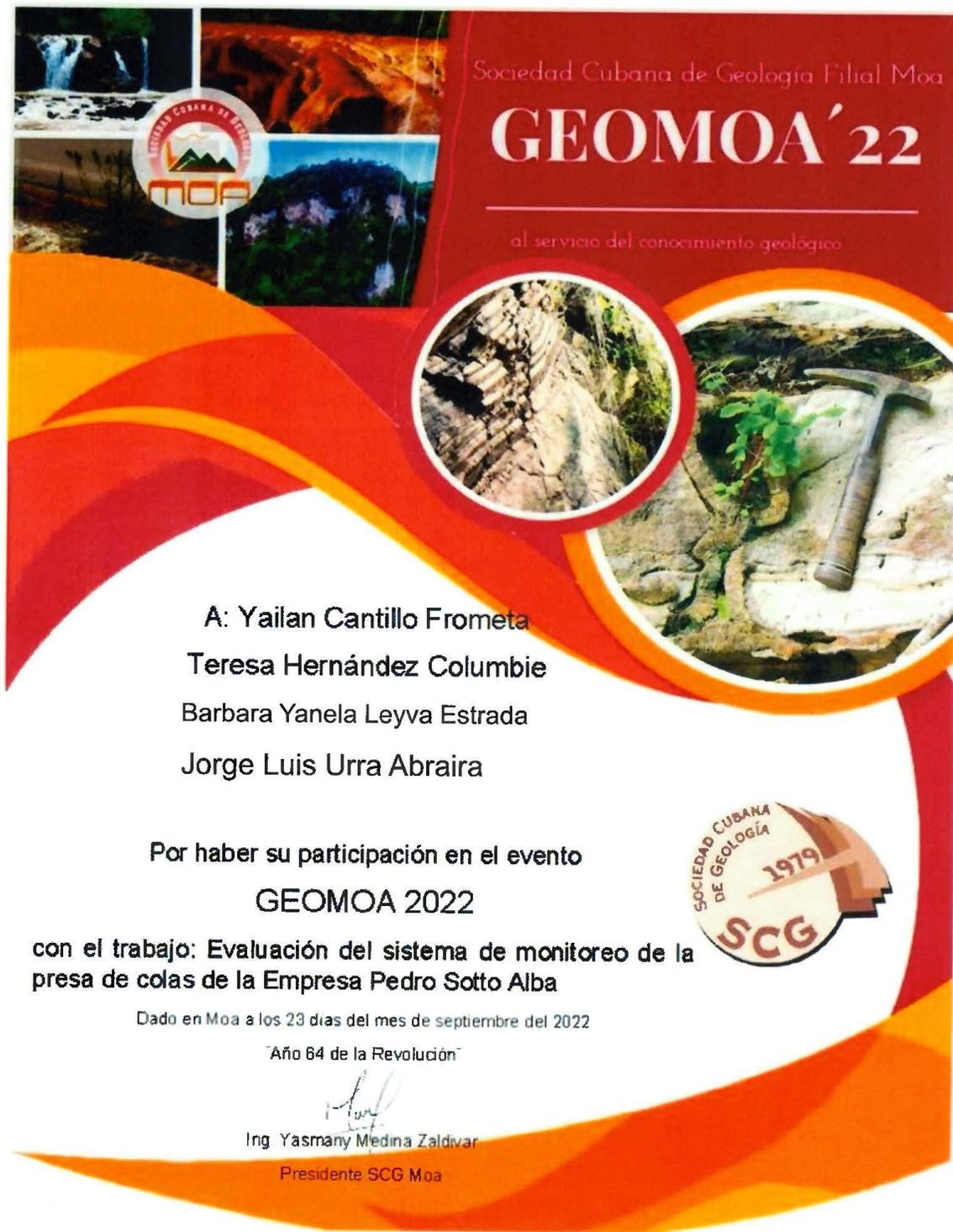


**Anexo C:** Inclínómetro.



**Anexo D:** Acelerómetro.

**Certificaciones de la participación en eventos de los resultados de la tesis.**





Facultad de Geología Minería

**OTORGA**

# Reconocimiento

**A: Yailan Cantillo Frómata  
Evelin Savigne Prade**

*Por alcanzar la condición de  
RELEVANTE*

**EN EL FORUM CIENTÍFICO ESTUDIANTIL**

*Con el trabajo: Diseño de herramienta educativa de apoyo  
para la asignatura mecánica de rocas.*

*"...el ser humano es el único capaz [...] de pasar por encima de  
instintos. [...] la naturaleza le impone los instintos, la  
educación impone las virtudes..."*

*Fidel Castro Ruz*

Dado en Moa, a los 15 días del mes de junio de 2022

"Año 64 de la Revolución"

Dr. C. Yoandry Diéguez García

Decano





# RECONOCIMIENTO

**A: Yailan Cantillo Frómata**

Con el trabajo: Diseño de herramientas educativas de apoyo para la asignatura Mecánica de Rocas

**POR SU PARTICIPACIÓN EN EL FORUM CIENTÍFICO ESTUDIANTIL.**

*"Vivir es tener una meta, un objetivo, una tarea, una obra a la cual dedicar tiempo, energía y la vida"*

*Fidel Castro Ruz*

Dado en Moa, a los 15 días del mes de junio de 2022  
"Año 64 de la Revolución"

Dr. C. Yolandira DÍEGUEZ LAMCIA  
Decano



**GRUPO EMPRESARIAL DEL NÍQUEL**



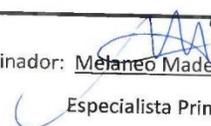
## **Taller sobre las Buenas Prácticas Ambientales en las Presas de Colas de Moa**

### **Reconocimiento**

A: Yailan Cantillo Frómata

Por la presentación del trabajo: “Evaluación de las buenas prácticas implementadas en la presa de colas de la Moa Nickel S.A.” en el taller sobre las buenas prácticas realizado en la Empresa Ernesto Che Guevara.

---

**DIRECCIÓN TÉCNICO PRODUCTIVA**  
  
**Cuba Níquel**  
GRUPO EMPRESARIAL

Coordinador: Melanio Maden Betancour  
Especialista Principal Medio Ambiente  
Cubaníquel

**Dado en Moa, 20 Octubre del 2022**

**AVAL SOBRE TESIS**

A través de la presente damos a conocer nuestra valoración a cerca de los resultados del trabajo: **Evaluación de las buenas prácticas implementadas en la presa de colas de la empresa Moa Nickel S.A.** de la aspirante Yailan Cantillo Frómata

La investigación recoge, de forma consolidada, los resultados de la implementación de los métodos y controles durante el ciclo de vida de la presa de cola, para la protección de las colas que se depositan en la empresa Moa Nickel S.A., provenientes del proceso de lixiviación ácida a presión.

El trabajo aporta, por primera vez, una guía de buenas prácticas enfocadas a mitigar las probabilidades de falla de las estructuras activas e inactivas en la presa de colas. Además, identifica las principales acciones ejecutadas en mitigar el efecto negativo que ocasiona este tipo de desecho al medio ambiente.

Basado en los resultados obtenidos, la dirección técnica de Cubaníquel propone la generalización de esta investigación en la presa de colas de la empresa Ernesto Che Guevara, por su alto efecto ambiental, económico y social.

Para que así conste, firmamos la presente:

  
Especialista Principal Medio Ambiente

Melaneo Maden Betancourt

Cubaníquel





## Reconocimiento

*Yailan Cantillo Frómata*

### Expoambiente 2022

*Por su participación como PONENTE.*

*"La eco-innovación: una apuesta a la sostenibilidad ambiental holguinera"*



Dado en Holguín a los 11 días del mes de noviembre de 2022.

"Año 64 de la Revolución"

Dr. C. Alejandro Torres Gómez de Cádiz Hernández  
Delegado Territorial