



Trabajo de Diploma

en opción al título de

Ingeniera Geóloga

Título: Aplicación de la Bioingeniería para la estabilidad de terrenos en la minería.

Autor: Katia Rivera Hardy

Tutor: Dra. C. Teresa Hernández Columbié

“AÑO 64 DE LA REVOLUCIÓN”

Moa.2022

Pensamientos

"No te rindas, por favor no cedas, aunque el frío queme, aunque el miedo muerda, aunque el sol se esconda, y se calle el viento, aún hay fuego en tu alma, aún hay vida en tus sueños. Porque la vida es tuya y tuyo también es el deseo, porque cada día es un comienzo nuevo, porque esta es la hora y el mejor momento".

Mario Benedetti

"Cada persona brilla con luz propia entre todas las demás. No hay dos fuegos iguales. Hay fuegos grandes y fuegos chicos y fuegos de todos los colores. Hay gente de fuego sereno, que ni siquiera se entera del viento, y gente de fuego loco, que llena el aire de chispas. Algunos fuegos, fuegos bobos, no alumbran ni queman, pero otros arden la vida con tantas ganas que no se les puede mirar sin parpadear, y quien se acerca se enciende".

José Julián Martí Pérez

"Criticar no es morder, ni tenacear, ni clavar en la áspera picota; no es consagrarse impíamente a escudriñar con miradas avaras en la obra bella, los lunares y manchas que la afean. Es señalar con noble intento el lunar negro, y desvanecer con mano piadosa la sombra que oscurece la obra bella".

José Julián Martí Pérez

Dedicatoria

- Le dedico mi trabajo de diploma a mi madre Lurdes Hardy Pérez por ser mi motor impulsor para este logro de llegar a ser ingeniera. Todo logrado es por ella y para ella.
- A mi hermana Keyla Heredia Hardy, mi pekito por apoyarme hasta de malas ganas en todo, gracias por siempre estar ahí cuando más te necesitaba.
- A mi tía Yanniris Hardy Pérez mi otra madre y a su esposo Amaury Silva por ser mis segundos padres y apoyarme y ayudarme en todo en cuanto podían para alcanzar mi título y lograr ser una profesional.
- A mi abuelo Raúl Rivera (El Gallego) por su apoyo, sus consejos, y por siempre estar ahí dándome su cariño de padre.
- A mi padrastro Alterio Sánchez por ayudarnos a mí a mi familia y apoyarnos como padre de familia.
- A mi ex padrastro Fidel Vázquez por haberme enseñado todo lo que se hoy y por hacerme crecer en medio de las adversidades.
- A mis chicas, mis compañeras de cuarto, de aula, de rumba a ellas también les dedico este logro: Evelyn Savigne, Rosibel González, Dayami Mejías y Heydis Cachimay López.
- A esos amigos que llegan a última instancia, pero, marcan un ente y hacen más amenos nuestros días: Roelkis Tamayo Vera, Dariel y Felo.
- A ese hijo mío adoptivo de Johan por su apoyo también en esta obra.
- A todos los colegas de la FEU de la universidad de Moa.
- A la Revolución Cubana por permitirme optar por el título de ingeniera en geología en esta casa de altos estudios Universidad de Moa.
- A todos y cada uno de los que creyeron en mi posibilitaron este logro.

Agradecimientos

- Le agradezco ese Dios Todopoderoso que en medio de adversidades permitió que llegara hasta la etapa final de este largo recorrido.
- A mi mami bella Lurdes Hardy y mi hermana Keyla Heredia por ser todo para mí.
- A mi tutora Tereza Hernández Columbié por depositar su confianza en mí, por su ayuda, comprensión y dedicación en esta de tesis. Gracias a ella por este hermoso trabajo que hicimos.
- A profesores del departamento de Geología desde su etapa estudiantil en el día a día. : Livan García Obregón ,Reinier Hernández Guilarte ,gracias a Luis Alberto por sus consejos y sus rancheras ,A Ángel Eduardo Espinosa Borges,Marianela Crespo Lambert, Carlos Sánchez, José Carmentate y el profe Arian.
- A Leo el técnico del laboratorio de Geomática por su apoyo para lograr el desarrollo de mi trabajo de diploma.
- A mis compañeros de aula durante los 5 y casi 6 años de batalla que compartimos juntos ,siempre estuvieron ahí en las buenas y malas : Evelyn ,Rosi ,Cachi , Daya ,Yania ,Rosita ,Yaneisis, Aly y Mile. A mis chicos Harito, Lachi, Titico, Villi, Texi, One Sagua, Mandy y otros no tan cercanos pero marcaron mi estancia en la Universidad.
- A los profesores en todos los niveles de la enseñanza, a los que en estos 5 años me apoyaron y enriquecieron mis conocimientos para ser una buena profesional.
- A mi prima postiza y a su madre por su apoyo en el proceso adaptativo cuando llegué a Moa.
- A mis amistades de las Tunas, mi hermano Leandro Ramos, Dayron por ser hermano de fe y amigo.
- A los compañeros de la FEU de Moa por compartir en eventos, congresos y ser amigos, dirigentes y familia.
- A mis vecinos, amistades de Santiago de Cuba y de Moa que aportaron su granito de arena para mi formación como profesional.
- A mis niños por hacer que este último año, fuera el de todos el más recordado: como decimos "la vida en un año "y se cumplió la profecía. Gracias mi negro Roelkis Tamayo Vera, a Dari, a Felo a Melody.

Resumen

La presente investigación tiene como finalidad demostrar las ventajas de la aplicación de la bioingeniería en la estabilidad de terrenos en la minería, analizando previamente las condiciones de estabilidad para diferentes escenarios de suelos degradados utilizando técnicas de bioingeniería para el reforzamiento de suelos, con el objetivo de incentivar la implementación de los mismos para la estabilización de terrenos y evaluar el impacto de las técnicas aplicadas, acorde a las condiciones específicas y tipo de obras. Se aplican métodos de evaluación cualitativos y cuantitativos, desarrollados en los últimos 15 años en la empresa Moa Nickel S.A. Los resultados se basan en la evaluación de los métodos implementados para el control de la erosión y la sedimentación en los terrenos degradados por la actividad minera, se muestran los resultados aplicados para tres tipos de especies vegetales con respecto al nivel de intercepción de la lluvia y su influencia en el control de la erosión de los suelos y se proponen nuevos métodos de estabilización de suelos. Finalmente se logra, a través de las técnicas de bioingeniería prevenir o mitigar impactos negativos sobre la economía, la sociedad y el medio ambiente

Palabras claves: bioingeniería, erosión, rehabilitación.

Summary

The purpose of this research is to demonstrate the advantages of the application of bioengineering in the stability of land in mining, previously analyzing the stability conditions for different scenarios of degraded soils using bioengineering techniques for soil reinforcement, with the objective of encourage the implementation of the same for the stabilization of land and evaluate the impact of the applied techniques, according to the specific conditions and type of works. Qualitative and quantitative evaluation methods are applied, developed in the last 15 years in the company Moa Nickel S.A. The results are based on the evaluation of the methods implemented to control erosion and sedimentation in land degraded by mining activity, the results applied for three types of plant species are shown with respect to the level of rainfall interception and its influence on soil erosion control and new soil stabilization methods are proposed. Finally, through bioengineering techniques, it is possible to prevent or mitigate negative impacts on the economy, society and the environment.

Keywords: bioengineering, erosion, rehabilitation.

ÍNDICE

Pensamientos.....	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Summary	6
ÍNDICE	7
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
INTRODUCCIÓN.....	12
Antecedentes de la bioingeniería	14
Estado actual de la temática a nivel:	20
Internacional.....	20
Nacional	23
Técnicas generales de bioingeniería.	27
Sistemas de cobertura destinados a la protección de terrenos.....	27
Modificación del perfil del terreno.	29
Otras técnicas de Bioingeniería y estabilización biotécnica para el control de la erosión y la protección de taludes.....	29
Tratamientos de regulación de flujos hídricos.....	30
Tratamientos de incremento de la infiltración.....	31
Tratamientos lineales de control en laderas y taludes.....	32
Tratamientos de cubiertas superficiales.	33
Tratamientos de regulación de flujos hídricos en cauces.....	33
Tratamientos de control y estabilización de taludes.	34
Biológicos.....	35
Intercepción.....	36
Influencia de la vegetación sobre suelos minados.	37
Conclusiones parciales	38
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y ECONÓMICAS DE LA REGIÓN.	39
1.0 Introducción.....	39
1.1 Ubicación geográfica.....	39
1.1.1 Localización geográfica del área de estudio.	40
1.2 Características hidrográficas.....	40
1.3 Suelos.	41

1.4	Clima	42
1.5	Vegetación.....	42
1.6	Red de comunicaciones	43
1.7	Fuentes energéticas.....	43
1.8	Población.	43
1.9	Infraestructura económica.	44
	Conclusiones parciales	44
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN.		45
2.0	Introducción.....	45
2.1	Geología de la región.	45
2.2	Geología del área.	48
2.3	Geomorfología del área.....	49
2.4	Características estratigráficas.....	50
2.5	Tectónica.	51
2.6	Sismicidad del área de estudio.....	51
2.7	Geología del yacimiento.....	52
	Conclusiones parciales	54
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LA INVESTIGACIÓN.		55
3.0.	Introducción	55
3.1.	Etapas de la investigación	55
3.1.1	Etapa preliminar:	55
3.1.2	Etapa de campo:	56
3.1.3	Etapa de gabinete	56
3.2	Fases de la propuesta metodológica:	57
	Escenarios de actuación:	57
	Selección y aplicación de la bioingeniería como método para la estabilización de terrenos degradados:	58
	Conclusiones parciales	58
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....		59
4.0	Introducción.....	59
4.1.	Análisis de las técnicas de bioingeniería existentes en la mina Moa Nickel S.A:	59
4.2	Cálculo de la interceptación de la lluvia según los diferentes tipos de especies vegetales.	69
4.3	Análisis económico de las técnicas de bioingeniería según el porcentaje de retención de lluvias.	72
4.4	El impacto económico de las diferentes técnicas de bioingeniería se basa en:	73
4.5	Trabajos de mantenimientos y monitoreo	74

4.6 Propuestas de otras técnicas de bioingeniería.....	78
Conclusiones parciales.....	78
CONCLUSIONES GENERALES.....	79
RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXO	86

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Partes constructivas de un talud, a) artificial (cortes y terraplenes) y b) natural (ladera) (Suárez, 1998). (Tomado de Custodio, 2017)	16
<i>Figura 2.</i> Influencia de la vegetación en las condiciones de un talud.....	18
<i>Figura 3.</i> Acción de refuerzo de las raíces.	19
<i>Figura 4.</i> Efectos físicos de la vegetación.....	38
<i>Figura 1.1</i> Ubicación geográfica de la región de estudio.	39
<i>Figura 1.2.</i> Red Hidrográfica (Tomado de Fernández Fis, Y.2015.).....	41
<i>Figura 2.1</i> Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996)	46
<i>Figura 2.2</i> Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998 (tomado de Lezcano, Celia.2018).....	47
<i>Figura 2.3</i> Diagrama de Streckeinsen, 1976.	47
<i>Figura 2.4</i> Mapa Geomorfológico. Rodríguez, A. 1998	49
<i>Figura 2.5</i> Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014.....	52
<i>Figura 3.1</i> Etapas de trabajo de la investigación.....	55
<i>Figura 3.2</i> Organigrama de la investigación.	57
<i>Figura 4.1</i> Método de reforzamiento de suelos aplicando Geoceldas.	59
<i>Figura 4.2</i> Métodos de bloques premoldeados y geoceldas en protección de riberas.	60
<i>Figura 4.3.</i> Método de Hidrobloques.	61
<i>Figura 4.4</i> Método de plantaciones en áreas minadas.	61
<i>Figura 4.5</i> Método de gaviones.....	62
<i>Figura 4.6</i> Técnicas de estabilización con el método de terrazas (siembra de pinos y helechos).....	62
<i>Figura 4.7</i> Muros de postes de madera para estabilizar el talud y las cárcavas.	63

<i>Figura 4.8</i> Recuperación de áreas minadas.	63
<i>Figura 4.9</i> Recuperación de suelo en áreas minadas.	64
<i>Figura 4.10</i> Muro reforzado	64
<i>Figura 4.11</i> Hidrobloques	65
<i>Figura 4.12</i> Capa de sedimentos.	65
<i>Figura 4.13</i> Son un conjunto de obras que se diseñan en dependencia del avance de la minería, con el objetivo de mantener un control efectivo de la erosión y sedimentación dentro de las áreas que van a hacer minadas.	66
<i>Figura 4.14</i> Viviendas construidas en zonas de actividad minera.	66
<i>Figura 4.15</i> Aliviadero.....	67
<i>Figura 4.16</i> Piscinas	67
<i>Figura 4.17</i> Piscinas en la zona minera	68
<i>Figura 4.18</i> Mapa temático que relaciona espacialmente según especies vegetales en la rehabilitación de áreas minadas.	69
<i>Figura 4.19</i> Técnicas de bioingeniería intercalando con pastos y estaquillados de madera para estabilizar taludes en la minería.	70
<i>Figura 4.20</i> Cubierta vegetal con <i>Casuarina equisetifolia</i>	71
<i>Figura 4.21</i> Intercepción de agua lluvia según especies vegetales presentes en los tres yacimientos de estudio.	72
<i>Figura 4.22</i> Trabajos de mantenimiento en obras de bioingeniería para la estabilización de suelos minados en la empresa Moa Nickel S: A.	75
<i>Figura 4.23</i> Mantenimiento en piscinas.	75
<i>Figura 4.24</i> Mantenimiento a las geoceldas colocadas en diferentes áreas del sector de estudio.	76
<i>Figura 4.25</i> Mantenimiento a obras de bioingeniería que regulan el flujo hídrico en la minería.	76
<i>Figura 4.26</i> Control fitosanitario.	77
<i>Figura 4.27</i> Verificación de la aplicación de las técnicas de bioingeniería en áreas afectadas por la minería	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de tratamientos de control de erosión	36
Tabla 2 .Tipos de vegetación con porcentaje de cubierta vegetal.....	69
Tabla 3. Análisis económico y costo por hectárea según por ciento de retención aplicando cada técnica de bioingeniería en los 3 yacimientos de estudio.	72
Tabla 4. Evaluación económica de las técnicas de bioingeniería.	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	37
------------------	----

INTRODUCCIÓN

La actividad minera constituye una actividad fundamental en el desarrollo de la economía a nivel mundial, la degradación de los suelos y la contaminación ambiental son consecuencias directas de la explotación de recursos minerales. El objetivo de la presente sección es analizar los avances de las investigaciones en cuanto a los métodos de protección de los suelos afectados por el laboreo minero.

La región de Moa representa la zona de mayor biodiversidad del país con un 68% de especies autóctonas (Herrero *et al.*, com. esc. 1982). El área sur del municipio queda dentro de la Reserva de la Biosfera Cuchillas del Toa, patrimonio mundial declarado por la Unesco en 1998. La industria del níquel es una de las esferas económicas más importantes de Cuba, sin embargo, a la vez que genera recursos resulta agresiva para el medio ambiente. La minería, en particular, es una de las principales causas de contaminación, afectando grandes extensiones de zonas agrícolas, poblaciones, bosques y zonas de interés natural, sobre las que los impactos, en ocasiones, son extremadamente difíciles de recuperar mediante técnicas de restauración (Rodríguez-Pacheco 2002).

Cuba desde la década de los noventa conjuga el desarrollo económico y social sobre la base ética de propiciar el desarrollo sostenible en aras de conservar y proteger el medio ambiente; a raíz de la crisis ambiental mundial el país incorporó y enfatizó los acuerdos de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo, al expresar y reiterar el carácter estatal de la protección del medio ambiente, en la Constitución de la República en 1992. La investigación parte de una valoración de las experiencias alcanzadas en la rehabilitación de las áreas mineras explotadas en las empresas productoras del níquel en la región minera de Moa y se hacen recomendaciones para mejorar la rehabilitación técnica y biológica en la minería, contribuyendo así a la mitigación de los impactos negativos que esta produce.

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los terrenos ha sido muy debatido en los últimos años; el estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo, no ha tenido explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas superficiales.

Al estudiar los fenómenos de inestabilidades de los terrenos degradados por

la minería, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento, y clasificarlos adecuadamente. Un análisis preciso del tipo de inestabilidad permite optimizar las medidas de contención y estabilización de terrenos, ya que atiende al mecanismo actuante, la velocidad y las dimensiones. Las investigaciones realizadas sobre la protección de suelos afectados por la minería en la industria del níquel aún son insuficientes, haciéndose necesario abordar temas específicos como la introducción de la bioingeniería para la protección de los terrenos ante la erosión hídrica o eólica, evitando con ello impactos sobre la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Problema científico: la necesidad de aplicar métodos de bioingeniería para la estabilidad de los terrenos afectados por la minería en el municipio de Moa.

Objeto: mina de la empresa Moa Nickel S.A

Campo de acción: métodos de bioingeniería

Objetivo general: proponer los métodos y técnicas de bioingeniería para la estabilidad de terrenos afectados por la minería.

Objetivos específicos:

- Diagnosticar el estado de la temática a nivel internacional y nacional.
- Proponer un sistema para la selección de los métodos de reforzamiento de suelos aplicando la bioingeniería en la actividad minera.
- Evaluar el nivel de efectividad de los métodos de bioingeniería aplicados en terrenos afectados por la minería, a través de la evaluación del nivel de retención de lluvias, valoración económica, ambiental y social.

Hipótesis: si se aplican métodos de bioingeniería para el reforzamiento de los suelos degradados por la minería, se garantiza el control de los procesos de erosión y sedimentación; disminuyendo la probabilidad de daños al medio ambiente, la economía y la sociedad.

Los principales métodos de la investigación científica empleados:

- **Método histórico-lógico:** se utilizó para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes investigativos sobre la temática.
- **La observación,** para el conocimiento de las características fundamentales del objeto.
- **Métodos teóricos:** fue utilizado para la interpretación conceptual; haciendo uso del **análisis y síntesis** en el estudio de las partes del objeto y para comprender su comportamiento como un todo. Dentro de los métodos teóricos también se utilizó la **inducción y deducción** como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular.

Antecedentes de la bioingeniería

La bioingeniería es utilizada en el campo de obras civiles, especialmente en la consolidación de taludes, riberas y para el control de la erosión. Principalmente se emplea con la utilización de plantas superiores como material de construcción y reconstrucción, ya sean aplicados solos o combinados con otros materiales. Las técnicas de Ingeniería Biológica para estabilización de suelos se remontan desde la época medieval, en la que los únicos elementos constructivos que existían eran las piedras y la madera. La contención de deslizamientos, caminos y terrenos erosionados por arroyos, aludes y cárcavas se efectuaba con estos materiales y su combinación con plantas vivas. A finales del siglo XVIII, se tiene constancia de las primeras obras publicadas en relación a estas técnicas por lo cual se permitió establecer el origen en la Europa Alpina, particularmente en Austria y Suiza. La aparición de nuevas técnicas y materiales, sobre todo el hormigón, hizo que las técnicas de Ingeniería Biológica quedaran relegadas al ámbito rural y forestal de la zona centroeuropea perdiendo relevancia a favor de estas últimas. En la década de los años 30 del siglo XX, Europa Occidental sufrió una de sus crisis económicas más graves. Esto permitió que muchas de las técnicas de bioingeniería se rescataran debido a su bajo coste. En 1936, se creó en Alemania un centro oficial para investigación en Ingeniería Biológica. En una época de fuerte recesión, los deslizamientos, la erosión de los torrentes, las avalanchas y los aludes necesitaban técnicas artesanales baratas, con materiales disponibles in

situ, de manera inmediata y a un coste mínimo. A partir de 1980 en los países centroeuropeos, gracias a los progresos de las ciencias naturales y al conocimiento de las bases biotécnicas, se realizaron unas sustanciales mejoras en los métodos, con elección de materiales vivos más adecuados. Con ello, estas 19 técnicas se volvieron más eficientes y se han desarrollado nuevos métodos de mayor eficacia. Hoy en día existe una variedad de métodos que pueden solucionar la mayoría de los problemas de afianzamiento de taludes y riberas que puedan presentarse (Sangalli y Valenzuela, 2016).

Sangalli y Valenzuela (2016) manifiestan que la ingeniería biológica es una rama de la ingeniería en la que las plantas vivas se utilizan como elemento constructivo, conjuntamente o no con material inerte (material leñoso, piedras, hormigón, mallas metálicas, geotextiles o productos sintéticos). Proviene del término alemán 'Ingenieurbiologie' y en castellano se traduce como Ingeniería Biológicas Bioingeniería La definición dada por Hugo Schiechtl (1992), principal experto en la materia el cual es la siguiente: "La bioingeniería es una disciplina constructiva que persigue objetivos técnicos, ecológicos, estéticos y económicos, utilizando sobre todo materiales vivos como semillas, plantas, partes de plantas y comunidades vegetales. Estos objetivos se consiguen aprovechando los múltiples rendimientos de las plantas y utilizando técnicas constructivas de bajo impacto ambiental".

La bioingeniería utiliza los efectos mecánicos e hidrológicos benéficos de una comunidad de plantas para cumplir una función de ingeniería:

- La vegetación puede aumentar la resistencia del suelo al agrietamiento,
- proteger de la erosión laminar una superficie de suelo expuesta y,
- atrapar las partículas de suelo que se deslizan por el talud.

Erosión: es el resultado de la degradación y el transporte de suelo o roca que se producen por distintos procesos como la circulación del agua o hielo, el viento, o los cambios de temperatura. La erosión puede afectar una zona mediante: la topografía, la cubierta vegetal, las características internas del suelo y el clima.

Revegetación: práctica usada en la estabilización de terrenos que consiste en devolver el equilibrio o restaurar la cubierta vegetal de una zona donde sus formaciones vegetales originales están degradadas o alteradas (Decorplantas, 2015).

La inestabilidad de los terrenos se hace más crítica en los taludes debido a las diferencias de pendiente y a la acción directa de la gravedad, por tanto, se hace muy necesario conocer las partes componentes de un talud, con el objetivo de seleccionar los métodos adecuados que garanticen la estabilidad del mismo ante la acción de los mecanismos disparadores de fallas del terreno. Se comprende bajo el nombre genérico de **talud** cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, ya sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería. Los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes). Las partes de un talud son: escarpe superior, plataforma superior, pendiente predominante, altura, pie de ladera, altura del nivel freático, zanja de coronación, cabeza, pendiente y pie de talud. Ver Figura 0.1

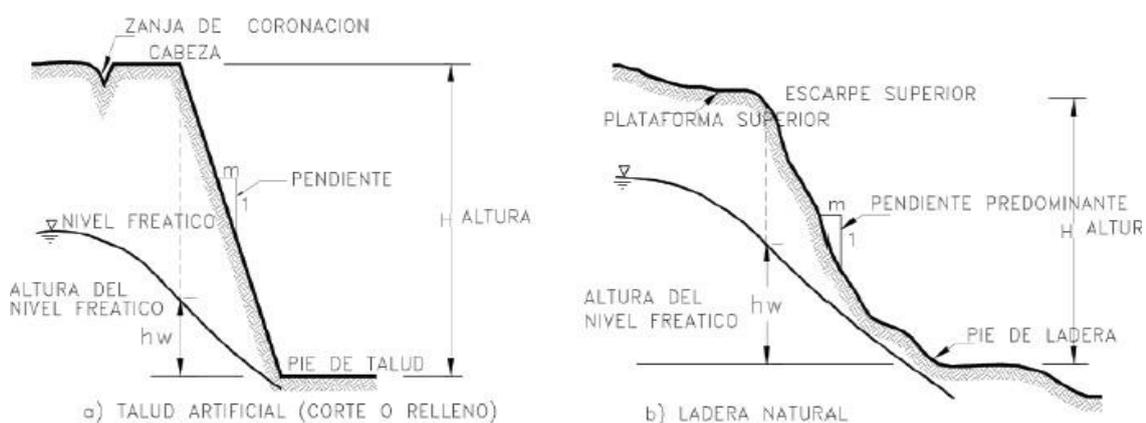


Figura 0.1. Partes constructivas de un talud, a) artificial (cortes y terraplenes) y b) natural (ladera) (Suárez, 1998). (Tomado de Custodio, 2017)

Definición de los elementos constitutivos de un talud o ladera:

1. **Altura:** es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas, debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie:** corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** distancia vertical desde el pie del talud o

ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza

5. **Pendiente:** es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (Suárez, 1998).

Análisis de estabilidad de un talud: al analizar la fuerza pasiva de los anclajes para resistir la presión y las fuerzas laterales relativas de la movilización de suelo, este sistema de protección también utiliza la manta (HPTRM) para ayudar a distribuir estas fuerzas resistentes, así como también controlar la erosión.

Nota: la estabilidad del terreno es el resultado de la combinación de condiciones geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas y su modificación por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de precipitación y sismicidad.

El análisis convencional de estabilidad de taludes en dos dimensiones busca el determinar la magnitud de las fuerzas o momentos actuantes (que provoquen el movimiento) y determinar la magnitud de las fuerzas o momentos resistentes (que se opongan al movimiento) que actúan en los suelos que forman al talud.

Control de la erosión

El efecto más importante de la vegetación, universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión. En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía. Ver *Figura 0.2*.

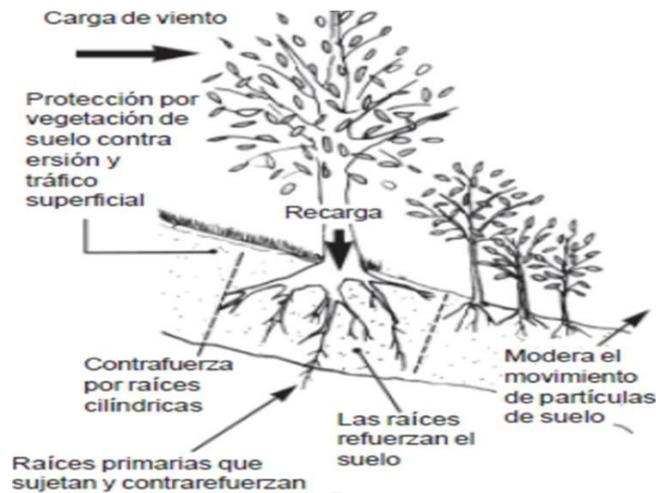


Figura 0.2. Influencia de la vegetación en las condiciones de un talud.

Acción de refuerzo de las raíces

Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades. Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

- a.** Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- b.** Formar una red densa entretejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- c.** Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud.

La resistencia a la tensión de las raíces puede ser hasta el 30% de la del acero, según Schiechl (1980) y pueden extenderse varios metros por debajo de la superficie del talud. Ver Figura 0.3.

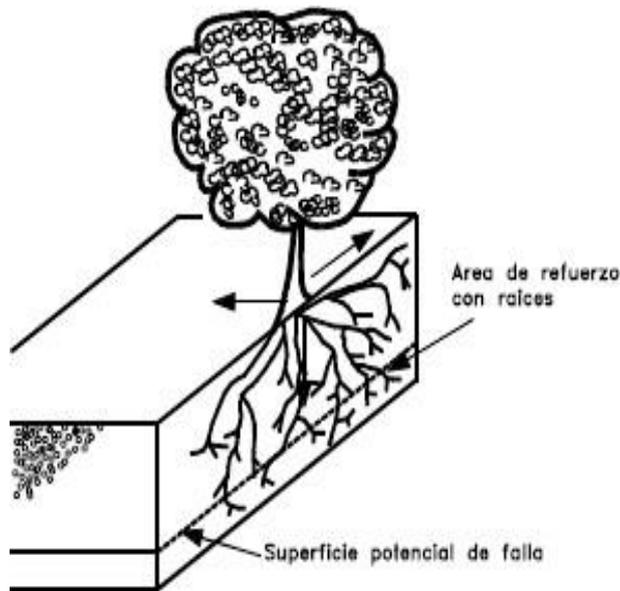


Figura 0.3. Acción de refuerzo de las raíces.

Ventajas de la bioingeniería.

La bioingeniería de suelos se refiere al control de erosión, protección y estabilización de laderas, y problemas de movimientos masales mediante la construcción de diferentes tipos de estructuras totalmente vivas como elementos mecánicos, usando partes de las plantas, tales como: raíces, rizomas, estolones, ramas y tallos. Partes de las plantas (raíces y tallos) en los sistemas de protección de Laderas, se convierten en refuerzo, drenaje hidráulico y barreras para contener la erosión y movimientos masales.

Es una tecnología diferente y más económica que las prácticas de ingeniería convencionales; trabaja muy bien en forma independiente o combinada con las estructuras clásicas de ingeniería; ofreciendo varias alternativas para control de erosión, estabilización de suelos y recuperación de fuentes de agua.

Los suelos siempre están en proceso de cambio y movimiento, contrario a las estructuras rígidas y estáticas que tradicionalmente se construyen; al ser un sistema dinámico y flexible, permite al terreno acomodarse a su estado natural, recobrando su estabilidad y capacidad de mantenerse por sí mismo; y este es el fundamento básico de la bioingeniería de suelos.

Su utilización es muy genérica: taludes y protección de obras en carreteras, depósitos de tierra; riberas y bancos de ríos y quebradas; represas, zonas mineras y canteras; fuentes de agua y humedales.

Ventajas de los estudios de bioingeniería.

- Se organiza e involucra a la comunidad en las soluciones.
- Costos y mantenimiento a largo plazo más bajos que los métodos tradicionales.
- Beneficios ambientales para hábitat de vida silvestre, mejoramiento de la calidad del agua y estética.
- Aumento a través del tiempo de la fuerza de las raíces de las plantas, para incrementar el factor de seguridad y la estabilidad estructural del terreno.
- Compatibilidad con sitios ambientalmente susceptibles a los movimientos masales o lugares con acceso limitado.

Al emplear técnicas de bioingeniería, se debe tener en cuenta, tanto sus antecedentes históricos, como su actualidad, de esta manera se podrá evaluar la técnica que mejor se adaptaría al terreno en el que se haya hecho la evaluación del sitio. Refiere Franti, (1997), que "La bioingeniería ha sido practicada ampliamente y en forma exitosa en Europa, especialmente en Alemania, donde los métodos bioingenieriles han sido usados por más de 150 años" La diferencia de las técnicas que se conocen como bioingeniería y las técnicas de la ingeniería tradicional radica en que las técnicas de bioingeniería son renovables y se acoplan con el entorno de manera que son más amigables, al tiempo que resuelven de manera funcional una necesidad ingenieril.

Rice (1977) citado por Flórez (1986), afirma que la bioingeniería es considerada como algo único en el sentido que las mismas partes de las plantas sirven como elementos mecánicos a la estructura principal en los sistemas de protección de laderas y con el tiempo las raíces de las plantas incrementan el refuerzo mecánico por la mayor cohesión del suelo, disminuyen la presión de poros mediante la evapotranspiración, e incrementan la resistencia de éste al cortante tangencial y con ello, la estabilidad del terreno. Estas estructuras a través del tiempo se convierten en refuerzo mecánico, drenaje hidráulico y barreras para prevenir y contener la erosión y los movimientos masales.

Estado actual de la temática a nivel:

Internacional

Hoy en día, la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2020), declaró que el 33 por ciento de la tierra se encuentra de moderada a altamente degradada debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación y la contaminación química

de los suelos. La actividad minera solo es responsable del 7 % de dicha afectación, los mayores daños de la extracción minera están centrados en: pérdida de la biodiversidad, compactación de los suelos, salinidad, acidificación, contaminación del agua, suelo y el aire.

Para el estudio de la degradación de los suelos se requiere un conocimiento previo del comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, que ayuda a la hora del diseño y proyecto de las obras de ingeniería. A continuación, se exponen algunos trabajos relacionados con la evaluación de la estabilidad y aplicaciones de la bioingeniería.

El suelo en su condición de uso primario es susceptible de recibir impacto que puede expresarse en diferentes formas de degradación. El impacto de ocupación es generado por cualquier actividad que tome posesión de la tierra e invalide la utilización primaria del suelo, y conlleva generalmente a una pérdida irreversible del mismo (López, 2002). La explotación minera puede considerarse como impacto de ocupación (Detvvyler, 1971).

Las explotaciones mineras pueden ser causa y origen de fuertes impactos sobre el suelo, debido principalmente a los grandes volúmenes de materiales que se desplazan, creando huecos y escombreras que cambian la fisiografía de la zona y alteran las características productivas del terreno, dando lugar a problemas ambientales, ecológicos y paisajísticos, allí donde se ubica la operación minera y trascendiendo a los alrededores en muchas ocasiones (Paradelo, 2013).

Suárez, (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia. Abarca desde una caracterización geológica del área en estudio analizando el equilibrio límite y factor de seguridad para así aplicar métodos de análisis de estabilidad de taludes en la roca aplicando la bioingeniería, toma en cuenta características de las plantas y del suelo fértil los efectos hidrológicos de la vegetación (intercepción de la lluvia, retención de agua, acumulación de agua, goteo o flujo por el follaje) y como esto influye en el control de la erosión. Muestra diferentes técnicas de control de aguas superficiales y subterráneas además de técnicas con estructuras de contención o refuerzo. Según Suárez-Díaz, (2008) en el medio tropical latinoamericano no existe mucha información sobre las especies vegetales idóneas para el control de erosión. Se priorizan las especies endémicas o naturales de la zona. Las especies exóticas que se empleen con fines determinados dentro de la

rehabilitación deben poseer un plan de manejo silvicultural que contenga el reemplazo de esas especies a mediano y largo plazo por otras especies de la flora de la región.

González, J. R. Q., & Morcote, C. A. (2012). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Metodologías sostenibles para el control de la erosión en laderas naturales y taludes artificiales. Se presentan los aspectos fundamentales y principales consideraciones para el tratamiento de taludes erosionados haciendo una descripción de los métodos hasta ahora desarrollados aplicados al control de la erosión. Se exponen los aspectos generales relacionados con el fenómeno de la erosión, su control, los métodos de cobertura y los métodos de barrera, que son actualmente utilizados para el tratamiento de laderas naturales y taludes artificiales erosionados o potencialmente erosivos en forma sostenible, considerando la puesta en práctica de diversas técnicas basadas en el aprovechamiento racional y preservación de los suelos, y la implementación de procesos constructivos coherentes con la topografía de las regiones en las cuales se presentan problemas de erosión.

Tenerife, (2013) Ingeniería Forestal y Ambiental En Medios Insulares (Islas Canarias), a partir de la disminución de la cubierta vegetal, y para una restauración de espacios degradados en medios insulares se aplicaron diferentes alternativas y usos potenciales de las áreas restauradas .Se aplicaron técnicas mixtas para el control de la erosión y la estabilización (geomallas, mantas orgánicas, geoesteras) además de técnicas que utilizan la vegetación combinada con materiales constructivos para la estabilización del terreno (muros de escollera con vegetación, gaviones con vegetación, muros de madera con vegetación, gradas vivas).

Reyes Suárez ,Yeffer (2019).Realiza un análisis de la estabilidad de taludes aplicando diferentes técnicas de revegetalización el mismo analiza las condiciones de estabilidad para diferentes taludes utilizando técnicas de revegetalización basados en el primer programa piloto de revegetalización y paisajismo de taludes realizado por el Instituto Nacional de Vías en el año 2017.Se determinaron las técnicas de revegetalización a implementar en cada talud y se efectuó un seguimiento de la ejecución de los proyectos mencionados, mediante la realización de visitas de campo con el fin de conocer el estado en el que se encuentra cada técnica de revegetalización implementada en los taludes, esto con el propósito de verificar su efectividad

y prendimiento de la cobertura vegetal; finalmente la realización de un análisis costo–beneficio, el cual determinó el costo de la revegetalización de cada talud y el beneficio que dicha estabilización generó en el sitio de estudio. Las investigaciones antes mencionadas demuestran el alto nivel de aplicabilidad de los métodos de bioingeniería para el reforzamiento de los suelos ante fenómenos erosivos.

Nacional

Cuba como país signatario de acuerdos internacionales para la protección del medio ambiente, se compromete a detener y revertir la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad, forma parte de los Objetivos de la Agenda para el Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y en particular del Objetivo de Desarrollo Sostenible 15 (ODS 15). Cuba está comprometida con este proceso cuya incidencia en el medio ambiente, los recursos naturales, la biodiversidad, la seguridad alimentaria, la salud y la economía del país, es directa.

STEWART (1997) plantea que entre los métodos que se utilizan para restaurar laderas, terrenos de minas abiertas y márgenes de cursos de agua se encuentran; el recubrimiento de cárcavas y laderas mediante sistemas de tratamientos del suelo y la vegetación, los diques de contención y otras obras de ingeniería. En concordancia con lo señalado por este autor y lo abordado anteriormente en cuanto a la rehabilitación biológica recomendamos algunos aspectos para la restauración de laderas y cárcavas (preparación del terreno) y la recultivación biológica, de todas las áreas mineras explotadas del territorio y las áreas de Cuba que presenten características similares.

Almaguer Y. (2001), donde se aplican métodos de cálculo de estabilidad de taludes utilizando criterios de rotura a partir del estudio integral del agrietamiento del macizo roca-suelo y de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentinizado. En el 2005, Almaguer realiza una evaluación de los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, empleando las técnicas SIG en la obtención de los mapas de susceptibilidad, lo que permitió establecer criterios de estabilidad de taludes y laderas como base para futuras evaluaciones de riesgos y así prevenir o mitigar los daños derivados de estos fenómenos. Como resultados se presenta una caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área. Se realiza

una valoración de los factores que influyen en las inestabilidades.

Revista Desarrollo Local Sostenible, vol 4, No. 10, en la preparación técnica del terreno para mitigar los procesos erosivos de las áreas afectadas por la minería, el método que más se ha utilizado es el de terrazas de plataforma constante, lo cual está sustentado en que este método además de ser utilizado internacionalmente es el que más se ha experimentado en Cuba, específicamente en planes de reforestación en la Sierra del Rosario (TORRES et al., 2002) y en la rehabilitación de áreas afectadas por la minería en Ocuja, Mayarí (MIRANDA, 1984; MILIÁN & BRUZÓN, 1990). En Moa este método ha garantizado el aumento de la infiltración del agua en el suelo, la reducción de la escorrentía superficial, la disminución de la velocidad de las lluvias y la retención de los sedimentos transportados por el flujo hídrico; resultando apropiado en las laderas de pendiente moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente.

Reyes C. R. et al (2005) realizan un análisis del comportamiento de los factores pasivos (el relieve, características geológicas y geotécnicas de las formaciones) y activos (Criterio magnitud-distancia), que actúan en la estabilidad de los suelos y rocas en las provincias orientales de Cuba, proponiendo un esquema de zonación de acuerdo a la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos o derrumbes en los taludes de las carreteras provocados por terremotos de gran o mediana intensidad, atendiendo al relieve, constitución geológica y criterios del Manual de Zonación de Peligros Sísmico Geotécnicos. Como factores desencadenantes de los deslizamientos incluye los sismos y la influencia de las precipitaciones, considerado este último el más importante agente catalizador de este fenómeno.

Chaviano, Cervantes y Pierra (2011) realizan algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para lograr una rehabilitación minera en las mineras del níquel del área de Moa, pero este estudio solo tiene presente los componentes biológicos y técnicos, dos de las vías más utilizadas para lograr esta recuperación. Estos autores tienen como finalidad lograr una reforestación del lugar, tomando experiencias con aspectos ecológicos y ambientales, pero no evalúan las integraciones que deben existir entre las tres dimensiones (económica, ambiental y social).

La explotación de los yacimientos lateríticos en Cuba ha provocado grandes degradaciones al medio ambiente, pues dicha actividad minera se realiza a cielo abierto devastando toda la flora, fauna y la biótica del ecosistema donde se encuentran enclavados, afectando así a cientos de miles de hectáreas de terreno, muchas de las cuales se encuentran en procesos de rehabilitación por la intervención del ser humano. Es por esto que varios autores han realizado aportes científicos como Rabilero (2013) quien elabora una metodología para rehabilitar desde el punto de vista biológico los terrenos explotados por la empresa Pedro Soto Alba. El mismo carece de un estudio preliminar que se debe realizar para conocer las características y composición que cuenta el ecosistema antes del proceso de explotación, para así efectuar una proyección hacia rehabilitación que permita la recuperación de los servicios ecosistémicos, aunque sea en su parcialidad.

Yaneybis (2013) hizo una investigación que tuvo como el objetivo evaluar las condiciones de estabilidad de taludes en yacimientos lateríticos aplicando métodos de equilibrio límite con vista a una explotación segura de los yacimientos del territorio de Moa.

Hernández, T. Revista Minería & Geología 2014. Propone el empleo de técnicas de bioingeniería para solucionar de modo económico y eficaz la problemática ambiental que generan las presas de colas expuestas a los agentes del intemperismo. Se experimentó la siembra de especies vegetales (*Casuarina equisetifolia*, *Vetiveria zizanioides*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum* y *Digitaria decumbens* Stent) de alto grado de disponibilidad y adaptabilidad a las condiciones existentes, para formar una cobertura vegetal que evitara la erosión de los taludes de las presas.

Los impactos ambientales producidos en la explotación de los yacimientos son múltiples. Por ello resulta indispensable analizar el proceso de rehabilitación de las áreas minadas. Este proceso es complejo pues la recuperación del ecosistema afectado requiere de distintas etapas, iniciando por la caracterización plena del ecosistema previo a su explotación, ex ante, un diagnóstico del nivel de afectaciones provocado al ecosistema durante la explotación del yacimiento y un tercer paso relacionado con las acciones dirigidas a su rehabilitación.

Para ello se han trazado diferentes políticas de desarrollo que han tenido como

prioridad la protección del medio ambiente, las cuales se ven reflejadas en:

La Constitución de la República, aprobada el 26 de febrero de 1976, en el capítulo I Fundamentos económicos, políticos y sociales del estado, en su artículo número 27 el cual establece: El Estado protege el medio ambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras. Corresponde a los órganos competentes aplicar esta política.

Es deber de los ciudadanos contribuir a la protección del agua, la atmósfera, la conservación del suelo, la flora, la fauna y todo el rico potencial de la naturaleza

- La Ley 76/1995 de Minas plantea en su artículo número 41 que los concesionarios están obligados a preservar adecuadamente el medio ambiente y las condiciones ecológicas del área, elaborando estudios y planes para prevenir, mitigar, controlar, rehabilitar y compensar el impacto derivado de la actividad minera, tanto en esta área como en las áreas y ecosistemas vinculados a aquellos que puedan ser afectados. Aparejado a esta ley se aprueba el reglamento de la Ley de Minas, donde exponen las especificaciones que deben cumplir las empresas.
- La Ley 81/1997 (Ley del Medio Ambiente), que establece la obligación de minimizar o mitigar los efectos negativos al medio ambiente.
- La Estrategia Ambiental Nacional aprobada en junio de 1997 y elaborada por el Ministro de Ciencia ,Tecnología y Medio Ambiente, que constituye el documento directriz de la política ambiental cubana .I Lineamiento 158 de la política económica social del Partido y la Revolución aprobado en el VII Congreso del PCC ,celebrado del 16 al 19 de abril de 2016 para el periodo 2016-2020 , y que dirigido a : sostener y desarrollar investigaciones integrales para proteger, conservar y rehabilitar el medio ambiente ,evaluar impactos económicos y sociales de eventos extremos y de adecuar la política ambiental a las proyecciones del entorno económico y social. Ejecutar programas para la conservación, rehabilitación y uso racional de recursos naturales. Fomentar los procesos de educación ambiental,

considerando todos los actores de la sociedad (Ruiz Quintero, 2016, p.101) (Tomado de Luna Azul, junio del 2019).

En nuestro país las investigaciones sobre la aplicación de la bioingeniería a terrenos degradados por la actividad minera aún son incipientes, haciéndose necesario profundizar en esta temática.

Normas ambientales

- Sistema Nacional de Normas para la Protección del Medio Ambiente.
- Norma NC – ISO 14001: 1998. Sistema de Gestión Ambiental. Especificaciones y Directrices.
- Norma NC – ISO 14032: 2001. Gestión Ambiental. Ejemplos y Evaluación del Desempeño Ambiental.
- Normativas Ambientales para las diferentes actividades mineras (Urbino et al., 2007).

Técnicas generales de bioingeniería.

Sistemas de cobertura destinados a la protección de terrenos.

Mulching (acolchado). Consiste en crear una cobertura del suelo con distintos materiales, orgánicos o inorgánicos. El mulch inorgánico puede estar formado por rocas volcánicas, caucho reciclado o algunos geotextiles. Este material no se descompone con facilidad, aunque si mejora la estructura del suelo. En cambio, el mulch orgánico, formado por una gran variedad de compuestos como los rastrojos de cosechas, paja, cañas de maíz, hojas o cortezas de árboles, astillas o virutas de madera, puede mejorar la calidad del suelo al descomponerse. La cubierta protege del impacto de las gotas de lluvia y reduce la velocidad de la escorrentía, al tiempo que reduce la temperatura del suelo y conserva su humedad. Esta técnica está contraindicada para taludes con grandes pendientes o muy desprotegidos si no se incluye algún sistema auxiliar que lo fije e impida que el viento, la pendiente o un aguacero desplacen el material hacia el pie de los mismos. Ver

Tabla 1.

Plantación vegetal en barrera

Un método muy efectivo es el uso de barreras vegetales perpendiculares a la línea de máxima pendiente. Para ello se deben utilizar especies perennes,

capaces de adaptarse a las condiciones del talud incluida capacidad de producción de biomasa. Se debe prestar atención a que estas plantas estén autorizadas evitando el uso de especies exóticas sin verificar previamente con los servicios correspondientes para evitar la introducción de una especie invasora.

Mantas orgánicas. Son materiales relacionados con los geotextiles, constituidos por un entrecosido de mallas y fibras naturales (fibra de coco, yute, paja, esparto...) o sintéticas. Se utilizan para el control de la erosión superficial, como soporte de suelos, de siembras o hidrosiembra, ayudando a mejorar el establecimiento y enraizamiento vegetal. Se recomienda el uso de mantas con mallas y fibras más degradables (como las de paja) en superficies con problemas de erosión ligeros y de cierta facilidad para la implantación vegetal; mallas y fibras duraderas como las de coco, esparto u otras, en pendientes muy acentuadas, con grandes riesgos de erosión y de gran dificultad para restauración vegetal; y las de mezcla de mallas y fibras duraderas y degradables(coco y paja), en terrenos con riesgo medio de erosión y situaciones intermedias de dificultad para la implantación vegetal.

Mallas o redes orgánicas. Son productos formados por fibras naturales o sintéticas en los que, por definición, la superficie de los huecos con respecto a los hilos que conforman la malla es proporcionalmente mayor que en las mantas. Se utilizan como refuerzo de otros productos geotécnicos, como pueden ser las mantas, o en terrenos con materiales de granulometría gruesa como gravas o pizarras.

Geoceldas. Son un sistema de confinamiento celular de elementos geosintéticos tridimensionales formados por una estructura alveolar de tiras de poliéster, polietileno o polipropileno de alta densidad, perforadas para facilitar el movimiento lateral de las partículas de suelo o agregados. El sistema de cavidades o alveolos permite retener materiales o incorporar diversos tipos y cantidades de suelos en función de la altura de las celdas.

Geomallas volumétricas. Son sistemas tridimensionales formados por varias mallas termosoldadas a los que se les aplica tratamientos para resistir las radiaciones ultravioletas. Se pueden usar en grandes pendientes, por lo que está indicado para desmontes, donde no sea posible aportar suelo para mejorar el sustrato. Se adoptan también en combinación con otras técnicas

de bioingeniería como las estacas vivas o los lechos de ramas.

Modificación del perfil del terreno.

Terrazas (o bermas). Las terrazas son taludes contruidos perpendicularmente a la línea de máxima pendiente del talud para interceptar la escorrentía superficial, reducir la longitud de la pendiente (terrazas de drenaje), cuando es necesario conservar el agua (terrazas de absorción), cuando se necesita cultivar en taludes de gran pendiente (bancales), o cuando la elevada longitud y pendiente del talud de obra civil sugiere su necesidad para poder tener un control efectivo de la erosión y la escorrentía.

Microcuencas. Son pequeñas depresiones formadas en el terreno, aguas arriba de la especie arbustiva o leñosa que se haya plantado en el talud, para interceptar y acumular parte de la escorrentía que escurre y mantener la humedad de la zona adyacente a la planta, con lo que se mejoran sus expectativas de crecimiento en el talud. Estas microcuencas pueden rebosar, por lo que conviene diseñarlas para controlar su desagüe.

Otras técnicas de Bioingeniería y estabilización biotécnica para el control de la erosión y la protección de taludes.

Estacas vivas o estaquillado (Live staking). Estaquillas o ramas de plantas leñosas con un grosor suficiente para hincarlas en el suelo y una longitud, entre 0.50–1.0 m, capaces de enraizar y desarrollarse. Sus raíces estabilizarán el suelo, reforzándolo y cohesionándolo, incrementando significativamente la resistencia al deslizamiento. Se pueden utilizar también en combinación con una red o malla orgánica.

Fajinas vivas (fascines). Son estructuras cilíndricas con especies leñosas que se colocan en la dirección de las curvas de nivel del talud y se fijan a la superficie del terreno con ayuda de estacas. Normalmente, se colocan sobre unas zanjas de poca profundidad, practicadas a tal efecto. Dependiendo de las características del talud, se pueden colocar al tresbolillo, para disminuir la longitud de escorrentía y minimizar los procesos erosivos, o darles una pequeña inclinación en los laterales para evacuar posibles excesos de agua.

Biorrollos. Los biorrollos son también estructuras cilíndricas, compuestas por

un saco de red de coco, polipropileno, polipropileno multifilamentado, poliéster de alta tenacidad, nylon u otras fibras, de gran resistencia a la acción del agua, que se encuentra rellena de diferentes fibras orgánicas como el coco, la paja, el esparto o fibras sintéticas como el polipropileno, que suele ser fotodegradable. Se pueden suministrar semillados, en cuyo caso, llevan en la parte posterior un papel especial que evita la pérdida de las semillas. Las dimensiones disponibles oscilan entre 0.10 y 0.50 m de diámetro y 3 o 6 m de longitud.

Escalonado de matorral (contour brush-layering). Este sistema consiste en introducir en el suelo ramas verdes de arbustos o de especies leñosas, que tengan la posibilidad de enraizar, en líneas sucesivas horizontales a lo largo de las líneas de igual nivel del talud. Este método se puede usar durante la construcción del talud o posteriormente a su ejecución, como un tratamiento para el control de la erosión.

Tratamientos de regulación de flujos hídricos.

Canal de desviación o difusión de aguas. Esta técnica resulta útil para regular el gran volumen del flujo directo o de la escorrentía superficial en las zonas semiáridas. Esta ejecución se realiza por encima de las cárcavas y/o en taludes con riesgo de erosión creciente con el objetivo de disminuir el escurrimiento superficial del área de cárcavas activas y disipar el agua retenida hacia las laderas estabilizadas.

Canal longitudinal de sacos de tierra. Esta técnica es apropiada para áreas de escurrimiento superficial moderado y medio. De sencilla ejecución, bajo costo y se puede realizar en condiciones variables. El canal tiene 0.6m de ancho y 20 cm de profundidad. Se ocupan sacos de mallas sombra (60% de cobertura) rellenos con tierra. Estos sacos se disponen intercalados: dos en sentido horizontal y después tres en sentido vertical, siguiendo esta secuencia hasta culminar la obra con el objetivo de evacuar de evacuar el agua de taludes y entregar el agua en disipadores.

Canal transversal simple. Este canal tiene como objetivo evacuar el flujo hídrico de la escorrentía moderada en caminos de pendientes medianas y escarpadas, además de regular y conducir flujos hídricos. Esta obra resulta de fácil ejecución, bajo costo, se recomienda su empleo en terrenos y caminos operacionales de pendientes escarpadas. Se utilizan postes de pinos

impregnados que se emplean como estacas verticales de 50 cm, clavadas a 30 cm de profundidad. Estos postes se disponen en dos líneas horizontales a lo largo del camino con pendientes del 1 al 2%, alambrados y calvados entre sí en las estacas vivas. Para la evacuación del agua se construye un canal simple aledaño a la estructura de postes, de 5 a 10m y con pendiente a nivel.

Canal transversal compuesto. Este canal tiene como objetivo evacuar el flujo hídrico de la escorrentía moderada en caminos de pendientes medianas y escarpadas, además de regular y conducir flujos hídricos. Esta obra resulta de fácil ejecución y se recomienda en general para el mantenimiento de terrazas agrícolas, caminos operacionales y rurales. El largo de la obra dependerá del ancho de la terraza. La profundidad del canal tiene 30 cm y un ancho de 20 cm.

Tratamientos de incremento de la infiltración.

Zanja de infiltración. Tienen como objetivo disminuir la velocidad de las aguas lluvias, aumentar la infiltración del agua en el suelo, reducir la escorrentía superficial, la retener los sedimentos removidos por el flujo hídrico y acumular el agua de las lluvias por el riego. Este tratamiento se recomienda para zonas semiáridas debido a que el flujo directo representa el componente principal del flujo hídrico y las precipitaciones máximas en 24 horas alcanzan montos de nivel medio. Estas zanjas se ejecutan en función de la precipitación de diseño con un periodo de retorno de 10 a 15 años del área a intervenir. Esta técnica ayuda a regular los volúmenes de escorrentía superficial, se retiene los sedimentos removidos por el flujo hídrico y se almacenan o cosechan aguas para el riego. Las zanjas deben tener una disposición intercalada, en función de la eventualidad que los volúmenes de escorrentía superen su capacidad de almacenaje produciéndose el rebalse en estas.

Terraza forestal. Esta técnica tiene como objetivo aumentar la infiltración de agua en el suelo, reducir la escorrentía superficial, disminuir la velocidad de las aguas lluvias y retener los sedimentos transportados por el flujo hídrico. Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. De sencilla ejecución y bajo costo. La longitud de la terraza se adecua al terreno. Se recomienda adicionar materia orgánica para enriquecer el suelo y seguidamente plantar árboles o pastos en la superficie de la terraza.

Tratamientos lineales de control en laderas y taludes.

Tratamiento lineal con revestimiento de neumáticos. Este tratamiento va a disminuir la velocidad de la erosión superficial en taludes. Tiene como objetivo disipar la escorrentía superficial en taludes, reducción del flujo hídrico y la acumulación de sedimentos. El intervalo de estos tratamientos lineales está en función del grado de inclinación de la pendiente. En taludes con una pendiente escarpadas se aconseja utilizar intervalos de 0.8 m, mientras que en aquellos con pendientes moderadas se emplean intervalos de 3 m. Permite conducir el flujo hídrico desde la cabecera de las cárcavas hacia los canales de evacuación. Se puede emplear revestimientos (foros) de neumáticos en desuso, estacas de madera y alambre. De acuerdo a los materiales empleados, este tratamiento posee una sólida estructura.

Tratamiento lineal con fajinas de sarmiento. Tiene como objetivo disminuir la erosión superficial en taludes, disipación de la escorrentía superficial en taludes, reducir la velocidad del flujo hídrico y la acumulación de sedimentos. El intervalo de los tratamientos lineales está en función del grado de inclinación de la pendiente. Esta obra no tiene restricción en cuanto a sus dimensiones. Los materiales empleados son estacas verticales de pino impregnadas de 0.6m de largo, alambre galvanizado y sarmientos trenzados con un largo de 1.8m y 0.2m de altura, para aumentar la flexibilidad.

Tratamiento lineal con fajinas de ramas. El intervalo de los tratamientos lineales está en función del grado de inclinación de la pendiente, tiene como objetivo disminuir la erosión superficial en taludes, disipación de la escorrentía superficial y reducir la velocidad del flujo hídrico. Esta obra puede aplicarse en laderas de pendientes moderadas, no resulta recomendada para pendientes con derrubios o en suelos pedregosos. Se puede utilizar ramas de distintas especies arbóreas. No tiene restricciones en cuanto a sus dimensiones.

Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra. La obra resulta muy adecuada y de fácil ejecución para trabajar taludes de pendientes moderadas, medianas y escarpadas. También para conducir el flujo hídrico desde la cabecera de las cárcavas hacia los canales de evacuación. Esta técnica se utiliza con el fin de disminuir la erosión superficial en taludes y disipar la escorrentía en taludes.

Tratamiento lineal con postes de madera. Esta estructura es apropiada en laderas con pendientes moderadas y escarpadas, no apropiada en taludes de derrubios o de suelos de alta pedregosidad. Se utiliza postes de pino impregnados para las estacas verticales (0.6cm) y las líneas horizontales, tratando que sean lo más rectos posible. Se realizan terrazas de 0.6 m de ancho a lo largo del talud.

Tratamientos de cubiertas superficiales.

Tratamiento de cubiertas de esteras de varias especies. La estructura se realiza entre intervalos de tiempos de los tratamientos lineales, lo que conforma una obra compuesta. Resulta ideal para disminuir la erosión hídrica por el efecto amortiguador que proporcionan. Es adecuado para recubrir áreas degradadas con pendientes moderadas y escarpadas. Se genera un microclima y una capacidad de sostenimiento de las semillas en el talud. Tiene como objetivo evitar la compactación acelerada de la superficie del suelo. Permite captar la humedad atmosférica e impide el arrastre de las semillas debido al flujo hídrico.

Tratamiento de cubierta con ramas de eucalipto. Este tratamiento utiliza el follaje de un bosque de eucalipto después de ser talado. Las ramas se disponen sobre un talud previamente preparado. Se debe aplicar una cubierta continua con un espesor min de 50cm. Esta técnica disminuye la escorrentía superficial en el talud, impide el arrastre de las semillas debido al flujo hídrico y evita la compactación acelerada de la superficie de la superficie del suelo. Este tipo de cubierta, según su superficie, germinación de las semillas y el retoño de los eucaliptos es favorable para disminuir los efectos erosivos de la escorrentía superficial.

Tratamiento de cubiertas de cañas. Para la realización de esta obra de cubierta se puede emplear una gran variedad de materiales, distinguiéndose, algunos favorables para la germinación, crecimiento y sobrevivencia de diversas especies de pastos. Evita la desecación de las semillas por efectos del viento y la radiación solar, y minimiza las pérdidas de semillas por ataque de la avifauna.

Tratamientos de regulación de flujos hídricos en cauces.

Diques de postes de madera. Un dique representa una obra relevante en el

control de erosión en zonas de cárcavas al regular el flujo hídrico y contener los sedimentos transportados. La vida útil del dique se estima superior a 10 años. Se recomienda aumentar la estabilidad de la estructura y la regulación del flujo hídrico con un muro de sacos de malla sombra rellena de tierra, que se construye en la parte posterior del dique. Su objetivo es resistir la socavación del lecho en las cárcavas. Prepara las condiciones para la plantación y siembra en cárcavas.

Diques de estructura gavionada. Este tratamiento permite regular los flujos hídricos en cauces medianos y mayores, debido a su gran resistencia en periodos de crecimiento, se pueden realizar conjuntamente disipadores, diques y estructuras de defensa fluvial. Tienen como objetivo amortiguar del flujo hídrico.

Disipador. Esta obra se complementa con tratamientos de regulación, conducción y evacuación de agua. Evita el socavamiento en cauces y base de taludes, al recibir los flujos hídricos en bruscos cambios de pendiente. No es recomendable para cursos de agua con grandes descargas o caudales, excepto que se empleen estructuras gavionadas. Puede realizarse en dimensiones variables, el tamaño dependerá del caudal de los cursos de agua. Amortigua el flujo hídrico en bruscos cambios de pendiente y disminuye la velocidad de las aguas.

Tratamientos de control y estabilización de taludes.

Estructuras de postes de madera. Resulta apropiada para taludes de pendientes moderadas y escarpadas, no recomendables para taludes de derrubios o superficies muy inestables. Son obras objetivas para la estabilización de un talud y el establecimiento de estructuras aptas para siembras y plantación. Las dimensiones totales varían de acuerdo a las necesidades de intervención.

Malla de sombra tipo raschel. Resulta apropiada para taludes con pendientes escarpadas con suelos de baja fertilidad, afectados por procesos de intensa escorrentía superficial. Se recomienda su empleo en áreas de difíciles de estabilizar mediante métodos tradicionales. Esta malla se rellena con tierra y semillas de pastos. Tiene como objetivo estabilizar taludes de pendientes inclinadas y vegetalizar con pastos el talud

Muro de postes de madera. A través de este tipo de tratamiento se pueden

estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua. Este tipo de muros se puede construir con distintos tipos de madera. Esta técnica se aplica con el objetivo de estabilizar taludes y cárcavas, el área de contacto de talud y cauces. Evita la socavación en la base de taludes y modera el impacto lateral del flujo directo de los surcos de agua.

Muros de sacos rellenos. Con este tratamiento se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas. Resulta apropiado para aquellos taludes donde no existan intensas presiones del suelo de la ladera. Se puede realizar en dimensiones variadas y se ejecuta de manera sencilla y de bajo costo. Su tiempo de vida útil promedio corresponde a 4 años, periodo suficiente para que los pastos se desarrollen y se asiente en el talud. Tiene como objetivo moderar el impacto lateral del flujo directo de los cursos de agua y evitar la socavación de los taludes.

Muros de neumáticos. Esta obra se puede utilizar para estabilizar áreas inestables, tanto en taludes como en cauces y cárcavas. La flexibilidad del material del neumático resulta apropiada para moderar el impacto del escurrimiento provocado por las crecidas de los cursos de agua. En la actualidad los revestimientos de neumáticos constituyen desechos sólidos por lo que su reutilización resulta relevante y de bajo costo.

Biológicos.

Hidrosiembra. Este tratamiento biológico se recomienda en áreas difíciles de estabilizar y de terrenos escarpados. Se recomienda realizar tratamientos lineales complementarios en la superficie del talud en condiciones de alta escorrentía superficial y de arrastre de sedimentos. Esta técnica tiene como objetivo vegetalizar áreas con erosión severa y taludes de pendiente escarpadas. Se debe contar con el siguiente equipamiento: un motor de 6 a 12 hp, una bomba centrífuga, un estanque móvil de 500 a 1.500lt, un agitador hidráulico, mangueras reforzadas, pitón de salida con válvula de cierre manual con un alcance de hasta 30m. El caudal apropiado para la ejecución es del orden de 100 a 150 lt por minuto. Se deben seleccionar las especies de pastos adecuadas para cada suelo y clima. Además, resulta recomendable contar con compuestos adicionales de humus, fibras y fertilizantes.



Tabla 1. Clasificación de tratamientos de control de erosión

Intercepción.

La cubierta vegetal intercepta y retiene una proporción variable del volumen de precipitación recibida. Parte de la precipitación interceptada se almacena en las hojas y tallos, desde donde regresa a la atmósfera por evaporación. El resto de la intercepción, denominada drenaje foliar o precipitación temporalmente interceptada, pasa al suelo escurriendo por los tallos, ramas y troncos, o goteando desde las hojas. Ver Ecuación 1.

Conservación y protección del suelo:

- Reducción del volumen de precipitación que alcanza la superficie del terreno y, por lo tanto, la cantidad de agua capaz de producir remoción y movilización del suelo.
- Retraso de la llegada de la lluvia al suelo, disminuyendo la intensidad de precipitación.
- Evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, disipando la energía erosiva al frenar su caída.

La cantidad de agua interceptada varía según la cantidad de cubierta vegetal y las características de las precipitaciones como la cantidad, intensidad y duración.

Si suponemos que la lluvia cae verticalmente, el volumen de precipitación interceptada (P_i) puede estimarse utilizando ecuaciones simples que relacionan la cantidad de precipitación total con la superficie de intercepción:

Ecuación 1

$$P_i = P_t * C, \quad (1)$$

En donde:

P_i = Volumen de precipitación interceptada por la vegetación

P_t = Volumen total de precipitación

C = Grado de cubierta vegetal (% de suelo cubierto).

Otro factor que interviene en la intercepción, es la intensidad de las lluvias. Es así como con intensidad moderada y el volumen de agua interceptada puede alcanzar el 100% de la precipitación recibida; mientras que con aguaceros intensos no suele superarse el 25%." López, 2000.

Influencia de la vegetación sobre suelos minados.

La vegetación juega un papel importante en el control de procesos erosivos y como elemento de protección y conservación del suelo, por la influencia que ejerce sobre él, tanto en la superficie, protegiendo y sosteniendo el suelo, como en profundidad, aumentando la resistencia y la cohesión de los terrenos. Además, tiene una influencia significativa en el nivel de humedad y en su capacidad de retención de agua. Ver *Figura 1*.

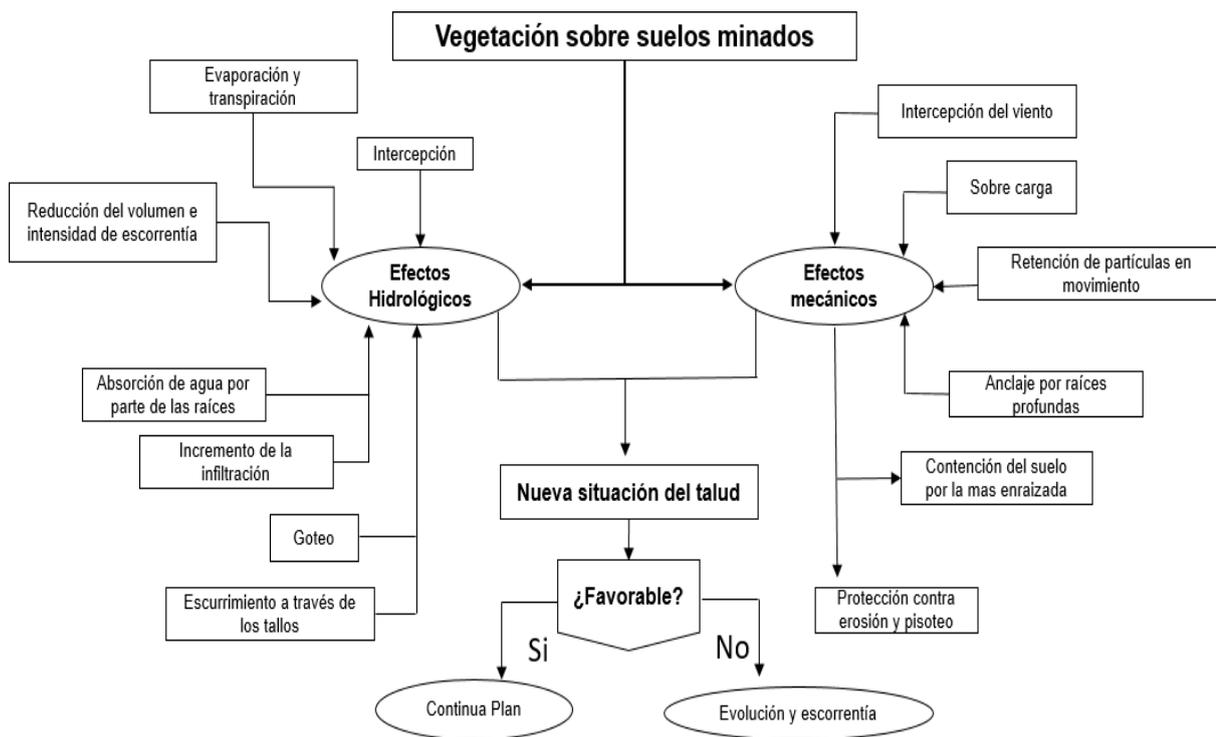


Figura 1. Efectos físicos de la vegetación

Conclusiones parciales

1. A nivel internacional se han realizado varias investigaciones acerca de la bioingeniería aplicada para el reforzamiento de suelos y diferentes obras.
2. En Cuba los trabajos de esta temática son incipientes y en la minería se han aplicado algunos métodos, no existiendo información documentada suficientemente socializada en el sector minero del país.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y ECONÓMICAS DE LA REGIÓN.

1.0 Introducción

En este capítulo se exponen los principales rasgos geográficos, económicos de la región de estudio, con el objetivo de obtener una base informacional referencial y actualizada teniendo en cuenta su ubicación geográfica, las aguas superficiales y subterráneas, los suelos, el clima, el uso y tendencia de la tierra además de sus servicios y redes técnicas.

1.1 Ubicación geográfica.

El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 km². Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba Oriental. El límite hacia el este es con el municipio Baracoa, separados por el río Jaguaní; por el sur limita con el municipio guantanamero de Yateras; por el oeste con los municipios de Frank País y Sagua de Tánamo y por el norte con el estrecho de Bahamas en el Océano Atlántico. Próximos a sus costas se encuentran los cayos Moa Chico y Moa Grande situados frente a la ciudad de Moa y Cayo del Medio en la bahía de Yamanigüey. Ver Figura 1.1

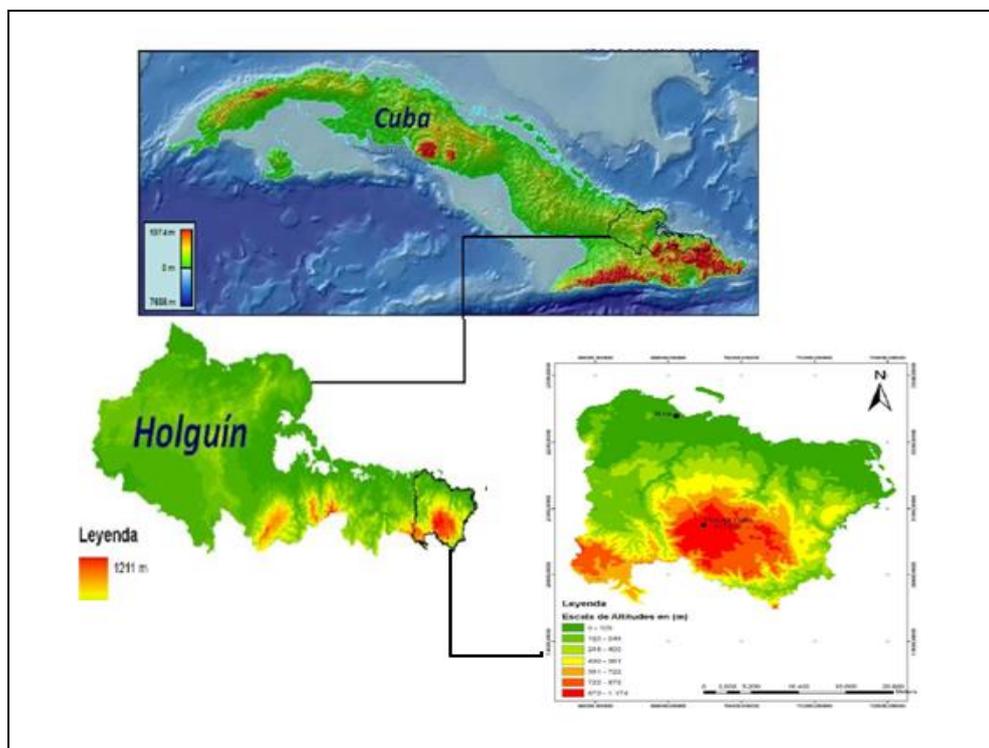


Figura 1.1 Ubicación geográfica de la región de estudio.

1.1.1 Localización geográfica del área de estudio.

Los yacimientos se encuentran localizados al noreste de la provincia de Holguín, en el municipio de Moa, ubicados dentro del macizo montañoso Moa - Baracoa. A la mina de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba (Moa Nickel S.A) pertenecen los yacimientos que forman parte de los depósitos de óxidos silicatados níquelíferos de Cuba.

Moa Oriental: este yacimiento se localiza al este del río Moa y las cortezas de intemperismo que lo forman ocupan un área total de aproximadamente 8,2 km². Desde el punto de vista geomorfológico éste es un yacimiento que presenta vaguadas con ondulaciones moderadas, predominan los perfiles completos de la corteza de intemperismo y altos espesores de la mena tecnológica.

Moa Occidental (Zona A): el yacimiento es parte del yacimiento perteneciente al macizo Moa - Baracoa, se ubica al noroeste del grupo de los yacimientos lateríticos, formando parte de la concesión minera de la Empresa Moa Nickel S.A, Pedro Sotto Alba. Limitando por el norte con el río Cabañas, por el este con el yacimiento Zona Central -Septentrional, por el oeste con las áreas de la fábrica y el valle del río Moa y por el sur con las áreas de la Planta de Pulpa, taller de la Mina y el valle del río Moa el cual lo separa del yacimiento Moa Oriental, ocupando un área de 3,5 km².

Camarioca Norte: el yacimiento Camarioca Norte forma parte de las Cuchillas de Moa, ubicadas en el macizo Moa-Baracoa, al sur de la ciudad de Moa, colinda por el norte con el yacimiento Moa Oriental, por el este con el yacimiento Camarioca Este y hacia el suroeste con el yacimiento Camarioca Sur y el río Moa.

1.2 Características hidrográficas.

La red hidrográfica del área de estudio es densa y dendrítica, representada por numerosos ríos y arroyos, entre los que se encuentran los ríos Moa, Cabaña, Cayo Guam, Quesigua, Yagrumaje y Punta Gorda. La mayoría de ellos son de corrientes permanentes debido a las abundantes lluvias en la región durante todo el año, las cuales sobrepasan los 3 000 mm anuales.

Las principales arterias de la región desembocan en el Océano Atlántico, formando deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar. La mayor parte de estas reservas hídricas no se utilizan, existiendo sólo una presa de importancia a unos 10 km al sur de la ciudad de Moa (Presa Nuevo Mundo) cuyas aguas se utilizan para el funcionamiento de las

industrias del territorio. Ver *Figura 1.2*

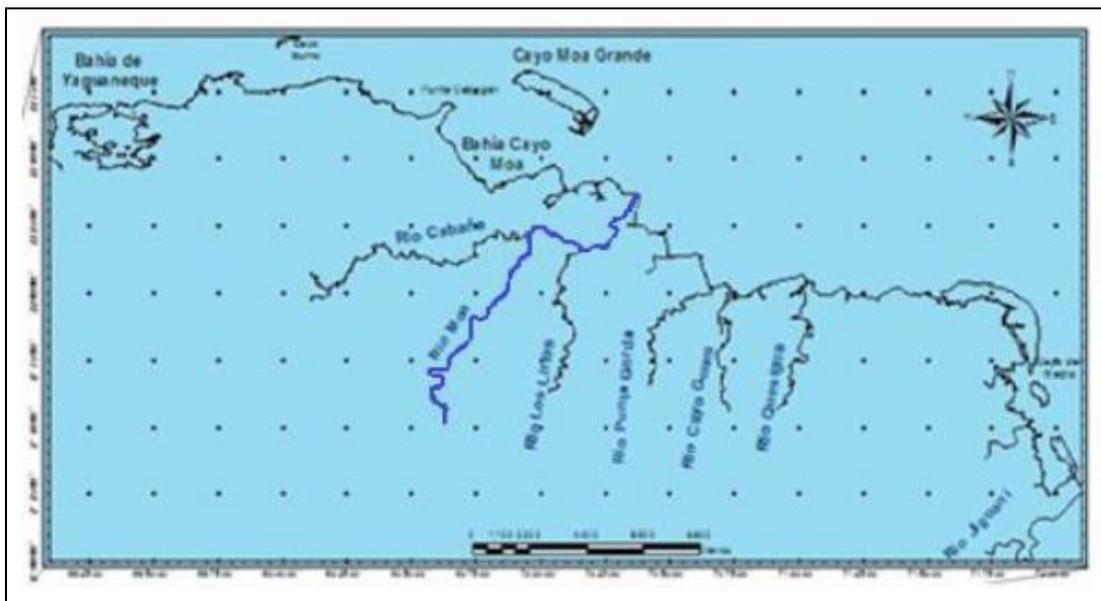


Figura 1.2. Red Hidrográfica (Tomado de Fernández Fis, Y.2015.)

1.3 Suelos.

Existe variedad de suelos producto al clima, la vegetación y la morfología. En la zona costera baja aparecen ciénagas con un terreno carmelita grisáceo, muy arcillosos y con un alto contenido de material orgánico. En las riberas de los ríos aparecen suelos aluviales de diferentes tamaños y colores. En el territorio predominan los suelos aluviales formados de la meteorización de las rocas serpentinizadas y graboides. Estos suelos pueden alcanzar potencias considerables de más de 50 m en bolsones situados en zonas tectónicas. En sentido general, las cortezas más potentes se desarrollan en las partes inferiores de las laderas con pendientes suaves y aplanadas en forma de mesetas. En las cimas más elevadas, los suelos son pardos, violetas, rojos y amarillentos. Estos no fueron sometidos a un proceso de sumersión, lo que puede probarse porque muchas plantas primitivas se conservan, han evolucionado, adaptándose a estos terrenos. La composición química de estos terrenos, ricos en distintos minerales pesados, lo hacen poco fértil, dificultando la alimentación de la población en lo que respecta a los productos del agro. El drenaje superficial y subterráneo en estos suelos son buenos y en ocasiones excesivos, lo que unido a sus características físico-mecánicas y las intensas precipitaciones y el tectonismo del terreno, dan lugar a la fuerte erosión hídrica laminar y en cárcavas (Edmon, 1996).

En la región aparecen suelos ferríticos - púrpura de la serie Nipe, de

composición arcillosa y alto contenido de perdigones de hierro, le siguen en importancia los suelos escabrosos, poco profundos, esqueléticos de escaso desarrollo en el perfil y alto contenido de hierro.

1.4 Clima

El clima de la zona es del tipo tropical húmedo, con abundantes lluvias, influenciado por la orografía. Las montañas del grupo Sagua-Baracoa sirven de barrera a los vientos Alisios del noreste, los cuales descargan toda su humedad en forma de abundantes precipitaciones en la parte norte. La distribución de las precipitaciones se caracteriza por dos períodos de lluvia, (mayo - junio) y (septiembre - enero) y dos períodos de seca (febrero - abril) y (julio - agosto). En un año, la precipitación media es 1624 mm y según los análisis estadísticos de 21 años (1989–2009) el total anual varía entre 767 – 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos.

Los períodos húmedos comprendidos entre los meses de septiembre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 168 - 336 mm y mayo - junio con un promedio de 149 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses de febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia de 94 mm y los meses de julio y agosto con un acumulado promedio de 100 mm de precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 21.5 °C y 30.41 °C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta octubre y los más fríos de diciembre a marzo; los meses más lluviosos mayo, octubre, noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto.

1.5 Vegetación

La vegetación depende de la cubierta vegetal y de la orografía. En las superficies planas cubiertas por lateritas, crecen bosques poco tupidos de pinos. Para las montañas son características las malezas subtropicales tupidas y entrelazadas. En los valles y arroyos crecen la Palma Real y la Yagruma. En sentido general esta vegetación la podemos clasificar en tres formaciones: 1. matorrales percomorfos subespinosos (charrascal), 2. Pinares, 3. pluviselvas, La vegetación endémica de la región resulta notable, existiendo variedades de plantas cuyos valores no han sido suficientemente explorados.

1.6 Red de comunicaciones

Las principales vías de comunicación en el municipio están dadas por dos carreteras principales, que lo enlazan con el municipio de Sagua de Tánamo hacia el oeste y la carretera Moa - Baracoa al este y la red de caminos, que comunican los 19 asentamientos rurales existentes, así como los asociados a la explotación de los recursos mineros y forestales. Además de las vías terrestres, existe comunicación aérea a través del aeropuerto "Orestes Acosta" y una terminal portuaria, vía principal de importación y exportación de la industria niquelífera.

1.7 Fuentes energéticas

El suministro energético se realiza en lo fundamental por el Sistema Electro - Energético Nacional, al que se suma la generación de la mini hidroeléctrica construida en la presa Nuevo Mundo. Además, existe la Central Diésel Eléctrica diseñada para suministrar energía a la planta de Ferroníquel y que por sus excedentes aporta energía a diferentes áreas del municipio Moa.

1.8 Población.

La población a finales de 2020 era de 73 012 habitantes, que lo sitúa en el cuarto lugar dentro de la provincia, con una densidad poblacional de 98,1 habitantes por kilómetro cuadrado, el sexto lugar a nivel provincial en este indicador. La tendencia demográfica de la población en el municipio de Moa, es a disminuir, pues de unos 75 mil habitantes que tenía en el último censo de población y viviendas-, al cierre del pasado año había decrecido a unos 74 000. Durante los períodos 1930-1959 y 1960-1988 se convierte en territorio de migrantes, el mayor número de ellos procedían de los municipios vecinos como Baracoa, Sagua de Tánamo, Cayo Mambí y Mayarí. La población creció de forma acelerada, con influencia de las migraciones internas principalmente. En cambio, durante el período 1989-2015 se invierte el proceso hasta convertirse en lugar emisor de población. Es decir, Moa se convierte en emisor de población. Están emigrando principalmente hacia los municipios cabeceras de provincias cercanas como Holguín, Santiago de Cuba y hacia los de la región occidental del país, como La Habana. En su mayoría son jóvenes, y en menor medida jubilados que retornan a sus lugares de orígenes.

1.9 Infraestructura económica.

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

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

Este municipio consta de 29 escuelas primarias secundarias, posee dos Institutos Preuniversitarios y un instituto Politécnico, además de una escuela especial, una escuela de oficios, varios círculos infantiles, una Universidad ISMM y una Filial de Ciencias Médicas.

Conclusiones parciales

1. En el estudio de las características geográficas se evidenció la vulnerabilidad de los suelos minados ante la acción de lluvias y otros agentes erosivos.
2. Abordamos diferentes temas con respecto a la economía de la región de estudio: sus principales redes de comunicación, las fuentes energéticas, población y su infraestructura económica actual, lo que demuestra la importancia del municipio dentro de la economía nacional.

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN.

2.0 Introducción

En este capítulo daremos a conocer las características de la geología en la región del municipio de Moa, la geología del área que estamos estudiando, tectónica, magmatismo y estratigrafía, elementos que nos permitirán tener una mayor viabilidad a la hora de la selección de técnicas y tratamientos de estabilización de terrenos en el área.

2.1 Geología de la región.

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

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

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de piggy back del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de piggy back del Eoceno Medio-Oligoceno. El neoaútóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado. Ver *Figura 2.1*



Figura 2.1 Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoaútóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996)

Cuba Oriental, desde el punto de vista geológico, es la región al este de la falla Cauto. En esta porción de la isla las ofiolitas están asociadas a la Faja Mayarí Baracoa y han sido interpretadas como un sistema de cuencas de ante arco ubicado paleogeográficamente entre el margen Cretácico de la plataforma de Bahamas y el arco volcánico de Las Antillas, los afloramientos están separados en tres complejos: Mayarí-Cristal, MoaBaracoa, Sierra del Convento (Iturralde-Vinent, M.A. 1996). El complejo ofiolítico Moa-Baracoa ocupa un área de 1500 km², muestra un corte completo del complejo ofiolítico formado por peridotitas con texturas de tectonitas, cúmulos ultramáficos, cúmulos máficos, diques de diabasas y secuencias efusivo-sedimentarias. Existen numerosos cuerpos de cromitas, sill de gabros y diques de gabros y de pegmatoides gabroicos localizados en la parte alta de la secuencia mantélica en la zona de transición con los cúmulos (Proenza, J. 1998). Ver *Figura 2.2*

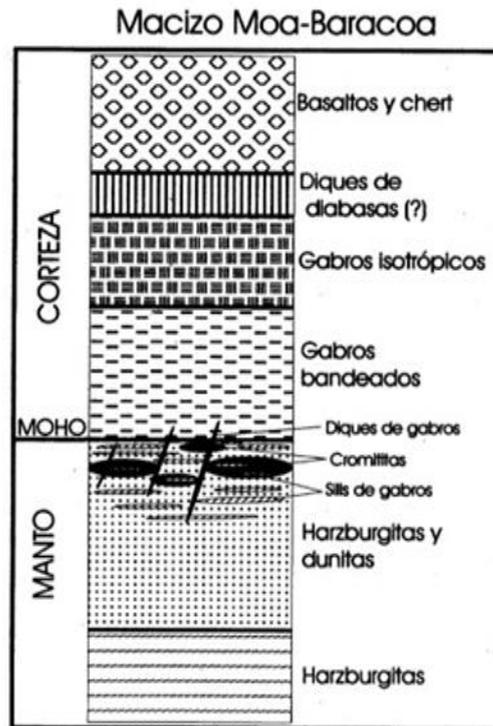


Figura 2.2 Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998 (tomado de Lezcano, Celia.2018).

En el macizo predominan las harzburgitas y peridotitas serpentinizadas, en menor medida están presentes dunitas, dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas y piroxenitas, según el diagrama de Streckeinsen, 1976, (Figura 13). 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). Ver *Figura 2.3*

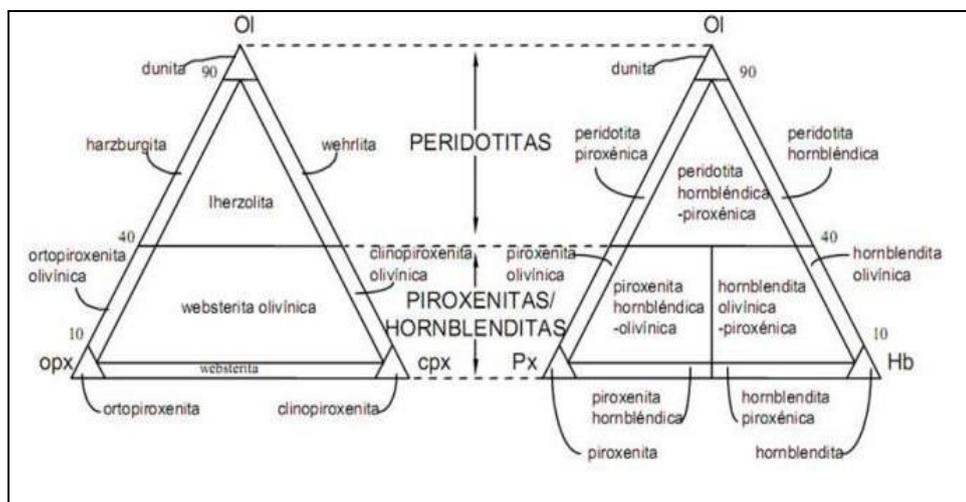


Figura 2.3 Diagrama de Streckeinsen, 1976.

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

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

2.2 Geología del área.

En toda el área afloran las rocas del complejo ofiolítico, predominando las rocas ultrabásicas serpentinizadas, aun cuando hacia el extremo noroeste afloran rocas básicas, presentando contactos alineados, presumiblemente tectónico con las rocas serpentínicas. Se muestran las serpentinitas pertenecientes a la asociación ofiolítica, que limitan al noroeste con los gabros, con poca aflorabilidad en el área de estudio, hacia el noreste con la edad cuaternario (Holoceno) aparecen los sedimentos derivadas de la erosión fluvial.

Hacia el norte son cubiertas por depósitos palustres de edad Cuaternario (Holoceno) asociados al borde costero y representado por sedimentos no consolidados, friables y fragmentarios como aleurolitas calcáreas y organodetríticas, arena margosa y arcillosa a veces con gravas pequeñas de color castaño grisáceo. La intensa meteorización de las rocas presentes bajo condiciones de altas temperaturas y humedad ha dado origen a una corteza de intemperismo del tipo laterítica muy rica en óxidos de Hierro y Aluminio, con espesores variables, compuesta por suelos eluviales y deluviales

generalmente de granulometría fina. Sobre las serpentinitas y peridotitas de base aparecen los sedimentos de la corteza de intemperismo o cobertura, formados por suelos lateríticos finos y gruesos con densidades y consistencias variables compuestos por arcillas, arcillas limosas, arcillas limo arenosas, arenas arcillosas, gravas areno arcillosas entre otras.

2.3 Geomorfología del área.

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). Ver *Figura 2.4*

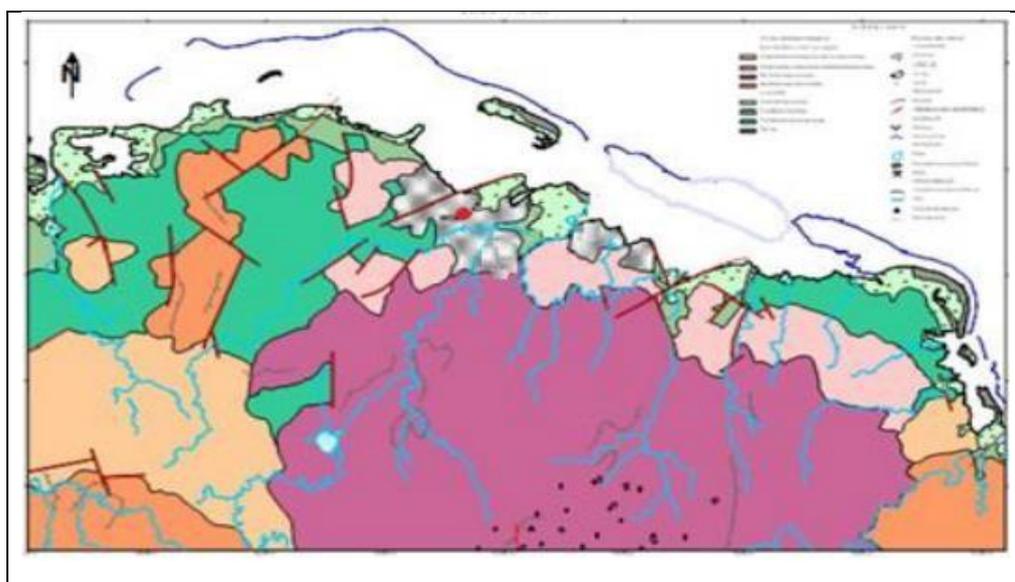


Figura 2.4 Mapa Geomorfológico. Rodríguez, A. 1998

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

A partir del mapa geomorfológico del Nuevo Atlas Nacional de Cuba se clasificó el territorio en dos zonas geomorfológicas fundamentales: la zona de relieve de llanura y la zona de relieve de montañas, con subtipos específicos que se mencionan a continuación. 1) Zona de llanuras, 2) Zona de montañas, 3) Zona de premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas, 4) Zona de

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

2.4 Características estratigráficas.

La geología de la región se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica (estratigráfica) presente y los distintos eventos tectónicos ocurridos en el transcurso del tiempo geológico, lo que justifica los diferentes estudios y clasificaciones realizadas, basadas en criterios o parámetros específicos según el objeto de la investigación (Rodríguez, 1998). El complejo de las rocas ultrabásicas aflora en toda la porción central y meridional del área y está constituido predominantemente por harzburgitas subordinadamente dunitas, Iherzolitas y piroxenitas. Estas rocas se caracterizan por presentar un grado de serpentización variable a sistemática.

Las formaciones sedimentarias y vulcanógeno-sedimentarias tienen una propagación a nivel de área muy reducida (no más del 10% del territorio), entre las cuales se localizan las siguientes formaciones:

Cretácico inferior (K1): formación Santo Domingo, representada por relictos de diabasas, espilitas y porfiritas basálticas.

Cretácico superior (K2): formación Picota (Maestrichtiano), formada por rocas terrígenas.

Cretácico Superior (K2) - Paleoceno: formación Mícara de edad Maestrichtiano - paleoceno, formada por areniscas tobáceas de granos medios y finos y aleurolitas tobáceas.

Eoceno (F2): formación San Ignacio, representada por rocas aleurolíticas arcillosas con inclusiones de calizas, areniscas carbonatadas y margas.

Depósitos Oligocénicos Miocénicos (F3-N1) no clasificados: representados por calizas, conglomerados y areniscas.

Depósitos Cuaternarios: los más antiguos representados por calizas (CO3) coralinas. Al sur del territorio se han establecido pequeños arcos de rocas metamórficas, principalmente compuestas por esquistos micáceos.

2.5 Tectónica.

El Bloque Oriental Cubano comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, A. 1998). En los estudios tectónicos precedentes del territorio se reconoció cuatro sistemas de fallas que cortan las rocas de la asociación ofiolítica y que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica. (Tomado de Lezcano Rodríguez, 2018).

2.6 Sismicidad del área de estudio.

Aunque no se tienen reportes históricos de la ocurrencia de un terremoto fuerte con epicentro en la localidad de Moa, no se niega la posibilidad de su ocurrencia en épocas anteriores, esto se debe a la no existencia de una infraestructura socioeconómica y cultural que permitiera el archivo de estos datos. Es de interés señalar, que, en Moa, se reporta la percepción de muchos terremotos, algunos de los cuales tuvieron su epicentro al norte de La Española. En el período desde 1992 hasta el 19 de abril de 1998 se reportaron tres sismos percibidos por la población de Moa. El primero de éstos, ocurrió el 2 de marzo de 1994 ($M_s = 5.6$), al norte de República Dominicana, el segundo ocurrió el 13 de septiembre de 1996 ($M_s = 3.3$) y el otro tuvo lugar el 19 de abril de 1998 ($M_s = 3.5$), en el macizo Moa - Baracoa, a unos 20 km. al sur de Moa, cuya réplica perceptible tuvo una intensidad de 3.0 grados MSK (Chuy, T. 1999). El 28 de diciembre de 1998 se registró un fuerte temblor ($M_s = 5.5$) ubicado al noreste de Moa que generó intensidades de hasta VI grados MSK, provocó agrietamiento de paredes en viviendas de mampostería y edificios multifamiliares, y fue percibido por toda la población como una sacudida fuerte del terreno. La ocurrencia de este sismo afectó la presa de colas inactiva de Moa. Los datos estadísticos de los sismos ocurridos en las zonas de monitoreo de la región oriental y en particular en Moa - Purial hasta el año 2014 reflejan que estas zonas han continuado activas. Ver *Figura 2.5*

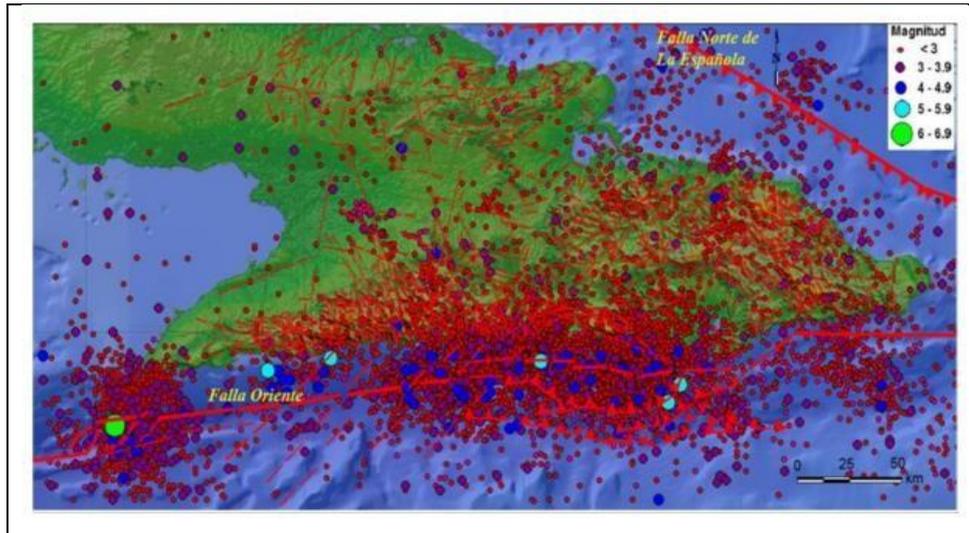


Figura 2.5 Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014

2.7 Geología del yacimiento.

Los yacimientos que componen la región de estudio se desarrollan a partir de las rocas ultrabásicas serpentinizadas que integran el cinturón hiperbásicos de Cuba, el cual, después de varias hipótesis de acuerdo a su origen, se ha considerado sobre la base de los trabajos de Knipper, Fonseca, Telepuguin y otros, como una asociación ofiolítica, que tiene una relación puramente tectónica con las demás unidades que la secundan. Se puede dividir en cuatro complejos:

- Ultramáfico serpentinado.
- Cumulativo.
- Diques paralelos de diabasas.
- Basáltico con rocas vulcanógenas metaforizadas y sedimentos pelágicos asociados.

La complicada estructura interna y el desigual desarrollo son las características fundamentales de esos complejos, así como la gran actividad tectónica que los afecta en forma de grietas, lo que provoca brechas y fajas de esquistosidad paralela.

Los yacimientos estudiados se ubican en la región nororiental de Cuba donde la asociación ofiolítica se considera un manto alóctono de unos 2 500 km² con potencia de 800 – 1 000 m, en cuya base afloran las rocas del manto alóctono representado fundamentalmente por areniscas y conglomerados del cretácico al paleoceno temprano y rocas volcánicas del cretácico, lo que hace pensar que el

manto tectónico ofiolítico ocupó su actual posición en el paleoceno; esto se demuestra por la no presencia en las rocas de los contactos de deformaciones producidas por las altas temperaturas en caso de haberse formado en el lugar actual, así como por el grado de deformación de las rocas, sobre todo, en la parte cercana a la base del manto. En el bloque oriental esta asociación está representada fundamentalmente solo por tres de los complejos mencionados: el ultramáfico metamorfozido, el cumulativo y el de diques paralelos de diabasas.

El complejo Ultramáfico metamorfozido abarca del 60 – 80% del volumen total de la asociación y está representado por harzburgitas, Iherzalitas y en menor grado por Dunitas y Piroxenitas, todas intensamente serpentinizadas. El complejo cumulativo se caracteriza por el bandeamiento de las rocas y está representado por Dunitas, Iherzalitas y Piroxenitas, así como Troctolitas y Grabros.

Los dos complejos anteriores aparecen frecuentemente cortados por grietas rellenas de diabasas, las cuales forman el complejo de diques paralelos que aparecen como cuerpos tabulares con pocos metros de espesor, llegando hasta la cuarentena de metros.

En el área que abarca el yacimiento Moa Oriental, se distinguen dos frecuencias estratigráficas. Una corresponde al período cuaternario, a ella pertenecen las formaciones aluviales del río Moa, donde encontramos guijarros y lentes de arena de granos gruesos con una potencia muy pobre, la cuales carecen de importancia.

La otra secuencia es la efusiva del cretácico interior situada al nordeste, está representada por porfirita, andesitas, rodeando esta formación encontramos las ultrabásicas serpentinizadas que ocupan así todas las áreas, estando representadas por las harzburgitas y en menos cantidad dunitas y piroxenitas. Desde el punto de vista geomorfológico este es un yacimiento que presenta ondulaciones suaves.

Las zonas dependientes más bruscas, de más rápido intercambio de las aguas (laderas y confluencias) se caracterizan por una reducción en el perfil litológico de intemperismo dándose perfiles estructurales reducidos (sin serpentina) o inestructurales (ocres inestructurales con o sin perdigones).

Conclusiones parciales

1. La geología en toda la región se caracteriza por las rocas del complejo Moa-Baracoa donde se desarrollan cortezas de meteorización lateríticas y se localizan importantes yacimientos de níquel y cobalto. Los horizontes de la corteza desarrollados sobre rocas ultrabásicas, son clasificados en seis categorías locales.
2. Las formaciones sedimentarias y vulcanógenas-sedimentarias tienen una propagación a nivel de área muy reducida (no más del 10% del territorio).
3. En la región de estudio de los yacimientos el complejo Ultramáfico metamorfozado abarca del 60 – 80% del volumen total de la asociación y está representado por harzburgitas, Iherzalitas y en menor grado por Dunitas y Piroxenitas, todas intensamente serpentinizadas. El complejo cumulativo se caracteriza por el bandeamiento de las rocas y está representado por Dunitas, Iherzalitas y Piroxenitas, así como Troctolitas y Grabros.
4. En estudios tectónicos precedentes del territorio se reconocieron cuatro sistemas de fallas los cuales cortan las rocas de la asociación ofiolítico y que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica de la región.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LA INVESTIGACIÓN.

3.0. Introducción

El objetivo del presente capítulo es diseñar una metodología para la aplicación de la bioingeniería como una propuesta de solución a los problemas generados por la inestabilidad de terrenos en la actividad minera en la industria del níquel.

3.1. Etapas de la investigación

La presente investigación, para la evaluación de la aplicación de técnicas de bioingeniería en terrenos minados se dividió como se muestra en la *Figura 3.1* en tres etapas:

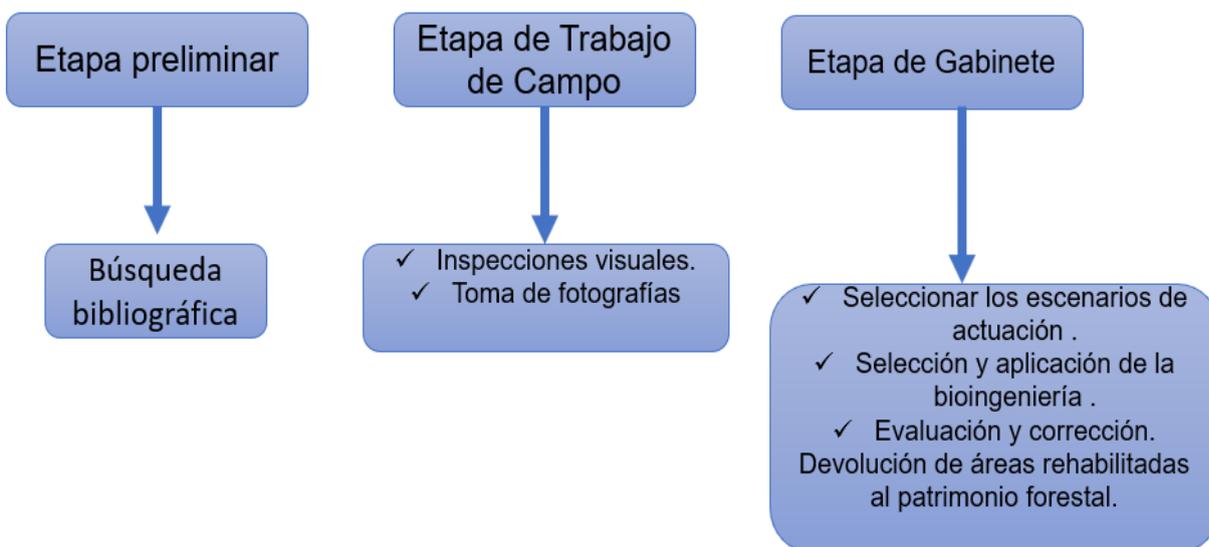


Figura 3.1 Etapas de trabajo de la investigación.

3.1.1 Etapa preliminar:

Búsqueda bibliográfica: comprendió el análisis del estado del arte de la temática de aplicación de técnicas de bioingeniería a nivel internacional y nacional, la caracterización geoambiental del área de estudio, revisión de la información técnica relacionada con proyectos, licencias ambientales, informes técnicos y otras investigaciones referentes a la aplicación de técnicas de bioingeniería en suelos minados.

Inspecciones visuales: las visitas al campo constituyen el trabajo más significativo, pues a través del mismo se inspecciona la obra y se controla visualmente las condiciones reales y actuales de la misma. Proporciona además una caracterización cualitativa de los parámetros que se analizarán en la etapa del procesamiento de la información, principalmente respecto a la situación actual de las técnicas empleadas en la mina. Esta evaluación se realiza mediante las visitas al campo y el análisis de las condiciones geológicas, geotectónicas y ambientales de la obra y de toda la zona que la circunda.

3.1.2 Etapa de campo:

Comprendió una serie de visitas a los yacimientos de Moa Occidental, Moa Septentrional y Moa Oriental, con el objeto de verificar el funcionamiento de algunos métodos de bioingeniería implementados en las áreas rehabilitadas.

3.1.3 Etapa de gabinete

Comprendió el procesamiento de los datos recopilados para dar lugar a la propuesta metodológica de la presente investigación, para la selección de técnicas más eficientes que posibiliten la recuperación de áreas inestables por acción de la minería o por erosión hídrica.

Una vez realizadas estas etapas se arribó a la propuesta para evaluar la influencia de estas técnicas.

- Seleccionar los escenarios de actuación.
- Selección y aplicación de la bioingeniería.
- Evaluación y corrección. Devolución de áreas rehabilitadas al patrimonio forestal.

En la se presenta la metodología para la aplicación de la bioingeniería en terrenos afectados por la minería. *Ver Figura 3.2*

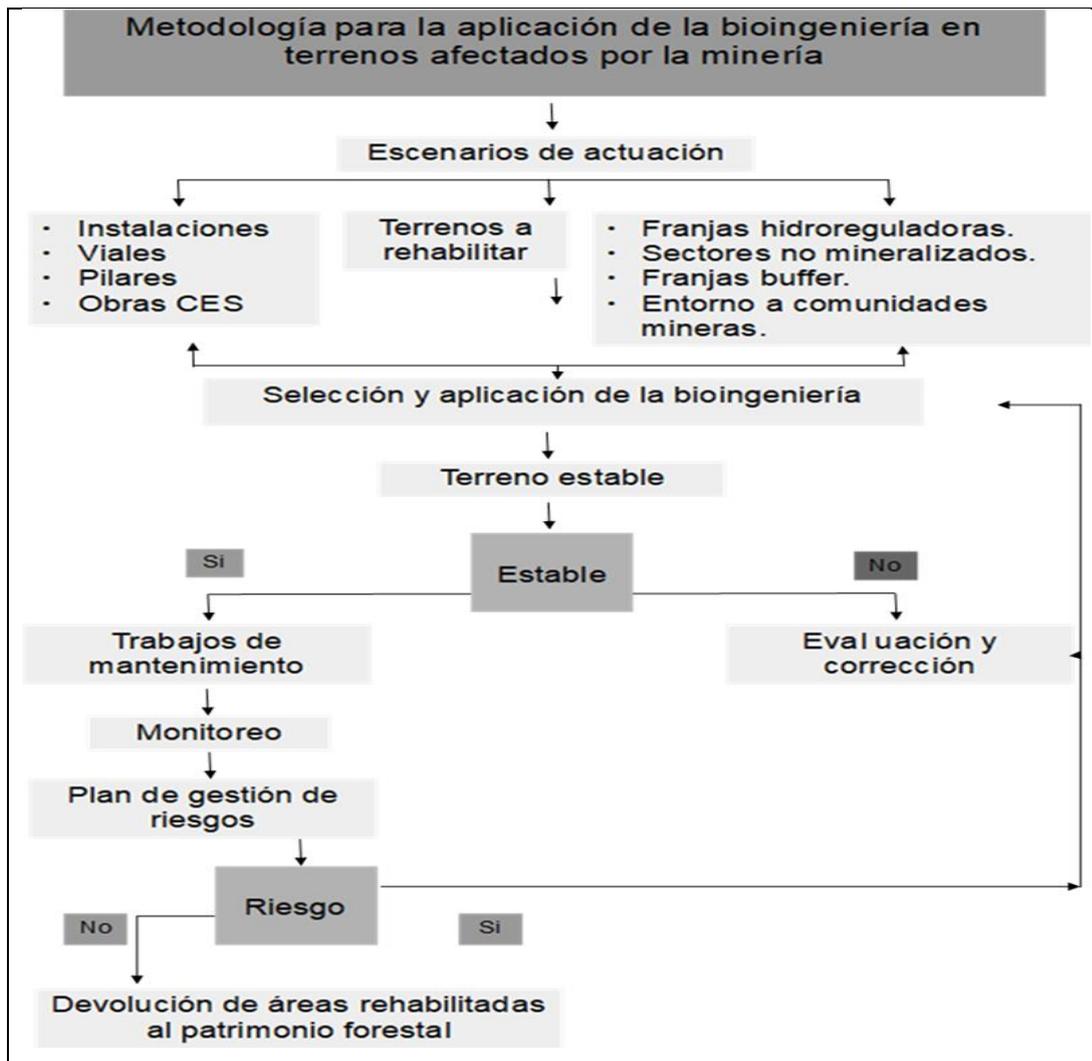


Figura 3.2 Organigrama de la investigación.

3.2 Fases de la propuesta metodológica:

Escenarios de actuación:

Esta fase está compuesta por tres escenarios posibles, los cuales son:

- Instalaciones: dentro de las instalaciones se encuentran los campamentos mineros, talleres, servicentros (suministro de combustibles), estaciones hidrometeorológicas.
- Viales: caminos mineros y vías de acceso comunes.
- Pilares: pilares de caminos mineros, líneas de suministro eléctrico y de comunicaciones, de instalaciones industriales.
- Obras de control de erosión y sedimentación: canales de desviación, sedimentadores, espejos de aguas, zanjas de infiltración, pozos colectores y otros.

- Terrenos a rehabilitar: escombreras, fondos conformados.
- Franjas hidrorreguladoras: constituyen sectores de vegetación a ambos lados de los cauces de los cursos de agua, las dimensiones de las mismas dependen de lo establecido en la NC: 29/94.
- Sectores no mineralizados: se corresponden con las áreas que no cumplen con los requerimientos de calidad (cu-tof) de la evaluación de las reservas geológicas a ser explotadas.
- Franjas Buffer: sector que limita áreas protegidas de determinada categoría de conservación con respecto a otros sectores con un uso diferente (minería, urbano, industrial, etc....)
- Entorno a comunidades mineras: corresponden a los terrenos colindantes con las comunidades cercanas a las concesiones mineras.

Selección y aplicación de la bioingeniería como método para la estabilización de terrenos degradados:

Para la selección de los métodos y técnicas de bioingeniería se parte del conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de los diferentes escenarios de actuación, además de las condiciones climatológicas del área de estudio, los diferentes tipos de usos del suelo en el futuro.

El nivel de estabilidad del suelo alcanzado después de aplicadas las técnicas de bioingeniería, define la próxima etapa a seguir dentro del proceso, de no alcanzarse la estabilidad requerida debe evaluarse la técnica aplicada y volver a analizar otros métodos de estabilización o corregir los fallos ocurridos.

De existir una recuperación satisfactoria de la estabilidad de los terrenos se procede a desarrollar trabajos de mantenimientos que garanticen la estabilización total de los suelos.

Todo este proceso responde a un plan de Gestión de Riesgos con el objetivo de garantizar la devolución de los terrenos rehabilitados al patrimonio forestal.

Conclusiones parciales

1. La metodología propuesta para aplicar la bioingeniería a suelos degradados por la minería constituye un aporte a la recuperación de áreas minadas a través de métodos más económicos y que evitan daños al medio ambiente, la economía y la sociedad.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

4.0 Introducción

El objetivo del presente capítulo es mostrar los resultados de las técnicas de bioingeniería aplicadas en áreas minadas, analizar los niveles de intercepción de lluvias para diferentes tipos de especies vegetales, además de recomendar otras técnicas para la estabilización de suelos minados en la empresa Moa Nickel S: A.

4.1. Análisis de las técnicas de bioingeniería existentes en la mina Moa Nickel S.A:

A continuación, se describen los puntos de muestreo donde se encuentran los métodos que están funcionando en diferentes yacimientos de la mina Moa Nickel S.A.

Punto 1 Geoceldas.

Estas Geoceldas tienen como objetivo contener el material de la pendiente, evitan la erosión, permiten el drenaje y estabilización de los taludes para proporcionar una cubierta vegetal, las mostradas en este punto son geoceldas de 150 mm. Ver *Figura 4.1*



Figura 4.1 Método de reforzamiento de suelos aplicando Geoceldas.

Punto 2. Métodos de estabilización con bloques premoldeados de hormigón y vegetación en (viales).

Los márgenes y riberas de cursos naturales muchas veces son vulnerables a fenómenos erosivos, afectando estructuras, instalaciones o terrenos circundantes. En esta área a ambos lados del vial (puente) contamos con protección de dos tipos

de técnicas: con vegetación y bloques premoldeados de hormigón. Algunos datos nos muestran que recién inaugurado el puente, la base expuesta a la acción del agua se erosionó a lo cual con técnicas de revegetalización ayudaron a la estabilidad del vial. Ver *Figura 4.2*



Figura 4.2 Métodos de bloques premoldeados y geoceldas en protección de riberas.

Punto 3 Sistema para controlar la erosión (Hidrobloques).

En este punto se muestra un canal por donde escurren desde parte de la mina. Los bloques por lo que está compuesto el canal le caben 2.6 toneladas, ya sea de tierra, arena o grava (material pesado), tienen 2.20 m de largo por 1.10 m de ancho. El cellaje de los mismos es cocido. Se realizó el canal en forma de escalonada bajando el nivel según la pendiente del terreno. Se evidencia que producto a la velocidad con la que corre el agua en el canal se ha destruido parte del mismo. Entre la junta de los bloques se plantó especies vegetales para reforzar la unión de los bloques. En este mismo punto se observaron otras técnicas de bioingeniería con postes de madera para lograr la estabilización de la pendiente. A simple vista es notable el resultado de la aplicación de esas técnicas, a un lado de la misma pendiente la cual no tiene protección se evidencian los efectos erosivos de la actividad minera. Ver *Figura 4.3*



Figura 4.3. Método de Hidrobloques.

Punto 4 Áreas reforestadas a los lados del camino de la mina.

Aquí se muestran áreas reforestadas con pinos, y plantación de casuarina al 2x2 m en el medio del trebolillo. Como antecedente estos suelos estaban totalmente erosionados, se evidenciaban cárcavas y corría el sedimento ahora son suelos con alto contenido de material vegetal con el objetivo de formar suelo en estas áreas degradadas por la minería y protege contra la erosión. Esta capa vegetal provoca que infiltre el agua y el suelo no se erosione, es decir retiene la humedad por más tiempo. Ver *Figura 4.4*



Figura 4.4 Método de plantaciones en áreas minadas.

Punto 5 Gaviones y técnicas de control erosión postes de madera y terrazas

Estas estructuras tienen el objetivo de controlar la erosión y sedimentación de las áreas dentro de la minería. Es un canal con otro tipo de técnica que va aliviando el agua hasta que llegue a un lugar determinado. A pocos metros de la estructura se muestra otro gavión que se colmató, se llenó de sedimentos (lo que indica que ya

no es eficiente). En toda la parte superior de esta área se han sembrado especies vegetales (pinos y helechos) para controlar la erosión. Ver *Figura 4.5*



Figura 4.5 Método de gaviones

En las cárcavas que se evidencian se han aplicado técnicas como diques de madera en fase de estabilización, muros de postes para estabilizar el talud y las cárcavas para así evitar socavación en la base de taludes, además de moderar el impacto lateral del flujo directo de los cursos de agua. Ver *Figura 4.6* y *Figura 4.7*



Figura 4.6 Técnicas de estabilización con el método de terrazas (siembra de pinos y helechos).



Figura 4.7 Muros de postes de madera para estabilizar el talud y las cárcavas.

Punto 6 Recuperación de suelos en áreas minadas.

Se muestra una pendiente donde se aplican técnicas de rehabilitación con siembra de plantas, los técnicos se encontraban sacando las plantas invasoras y reponiendo las que habían muerto, para que no se pierda la resistencia del terreno ante la acción del agua, del viento, o la ocurrencia de un sismo. Ver *Figura 4.8* y *Figura 4.9*



Figura 4.8 Recuperación de áreas minadas.



Figura 4.9 Recuperación de suelo en áreas minadas.

Punto 7 Muro de contención reforzado.

Las soluciones equivalentes que se han comparado para una estructura de contención de 8 m son un muro de estructuras metálicas que se encuentran estabilizando el talud su integración con el medio que los rodea es rápida y agradable; los huecos generados en la distribución de la piedra de relleno se llenan progresivamente con limos, arcillas y tierra vegetal, favoreciendo el crecimiento de la vegetación. Ver *Figura 4.10*



Figura 4.10 Muro reforzado

Punto 8. Hidrobloques para reforzamiento de obras hidráulicas.

Se creó una cobertura de suelo para la realización de un vial por donde escurren las aguas de parte del rio Moa. La técnica básica que se empleó para lograr la estabilidad de este talud fue la colocación de bolsas de tierra o grava encima de donde escurren las aguas del afluente, en la base de esta pendiente se muestran capas de sedimentos. Esta técnica protege del impacto de las gotas de lluvia y reduce la velocidad de la escorrentía, al tiempo que reduce la temperatura del suelo y conserva su humedad. Ver *Figura 4.11* y *Figura 4.12*



Figura 4.11 Hidrobloques



Figura 4.12 Capa de sedimentos.

Punto 9 Piscinas

Tienen la capacidad de retener el agua y actúan para enriquecer el manto freático, lo que favorece en nivel de la implantación de la vegetación dentro de las áreas minadas, o sea retiene el agua y se queda dentro de esta obra el sedimento, cuando llueve el agua supera la capacidad de embalse de esa piscina, ella genera

sedimentos los cuales quedan dentro de la obra, seguidamente se libera el agua limpia al medio. Estas obras se realizan teniendo en cuenta la topografía del área, es decir se realizan en las zonas que quedan fuera de la actividad minera o en el límite de la minería. Ver *Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17*



Figura 4.13 Son un conjunto de obras que se diseñan en dependencia del avance de la minería, con el objetivo de mantener un control efectivo de la erosión y sedimentación dentro de las áreas que van a hacer minadas.



Figura 4.14 Viviendas construidas en zonas de actividad minera.



Figura 4.15 Aliviadero

Aliviadero con el objetivo de dividir el caudal combinado de aguas lluvias a almacenamientos temporales, con el fin de disminuir el caudal.



Figura 4.16 Piscinas



Figura 4.17 Piscinas en la zona minera

A partir de estudio realizado en el sector de estudio, abarcando el Yacimiento Moa Oriental, Moa Occidental (Zona A) y Camarioca Norte se realizó un mapa temático que relaciona espacialmente según especies vegetales en la rehabilitación de áreas minadas.

Figura 4.18

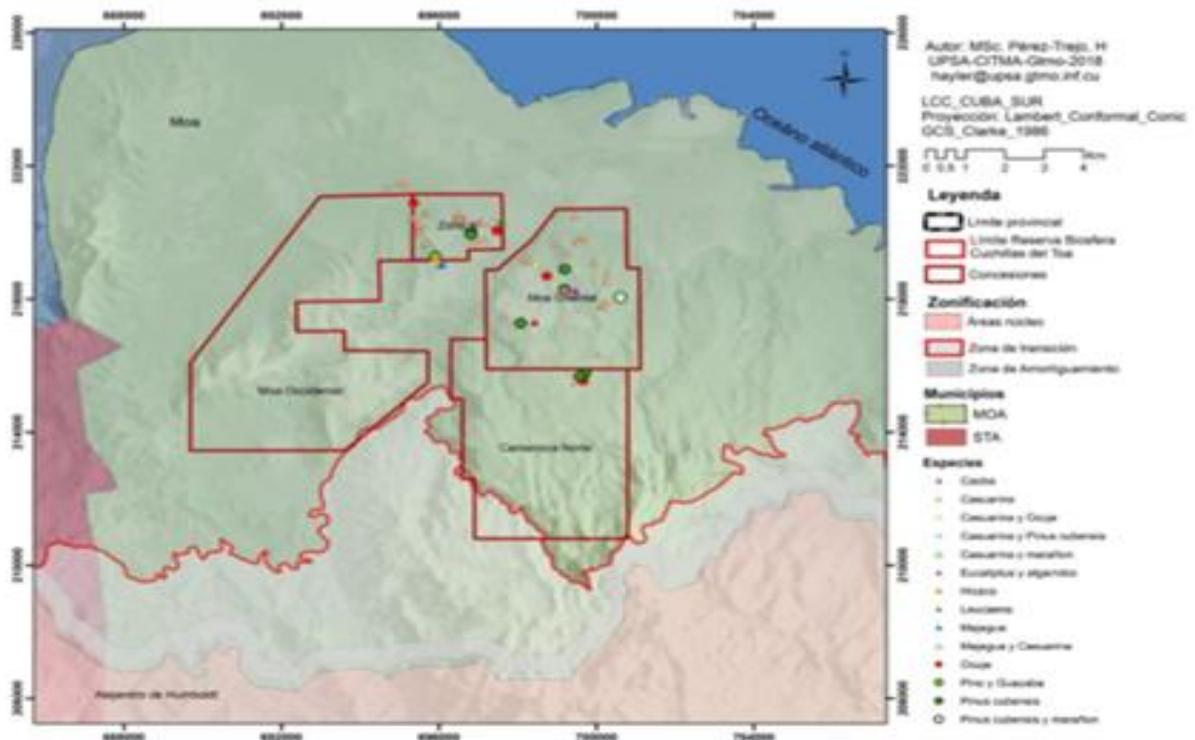


Figura 4.18 Mapa temático que relaciona espacialmente según especies vegetales en la rehabilitación de áreas minadas.

4.2 Cálculo de la interceptación de la lluvia según los diferentes tipos de especies vegetales.

Para la región que se estudió se tomaron valores de precipitación promedio de 67mm en el periodo de mayor índice de precipitación (septiembre – enero). Se evaluaron la afectividad de tres especies de plantas estabilizadoras. Tomamos una 1ha (10 000 m²) de cubierta vegetal para un año de plantación. Ver Tabla 2.

Tipo de vegetación	% Cubierta vegetal
Pastos	100
Casuarina	30
Pino	5

Tabla 2 .Tipos de vegetación con porcentaje de cubierta vegetal

Pastos

$$P_i = P_t * C$$

$$P_t = 0.0067mm \quad C = 100 \%$$

$$P_i = 0.0067 * 10000$$

$$P_i = 67mm/m^2$$

Casuarina equisetifolia

$$P_t = 0.0067\text{mm} \quad C = 30\%$$

$$P_i = P_t * C$$

$$P_i = 0.0067 * 3000$$

$$P_i = 20.1\text{mm}/\text{m}^2$$

Pino cubensis

$$P_i = P_t * C$$

$$P_t = 0.0067\text{mm} \quad C = 5\%$$

$$P_i = 0.0067 * 500$$

$$P_i = 3.35\text{mm}/\text{m}^2$$

Interpretación

Pastos. Para un volumen de precipitación promedio de 0.0067mm en la región de estudio en una hectárea de cubierta vegetal con promedio de un año de plantación se logró interceptar el 67% del agua lluvia, es decir cada milímetro de agua equivale a un litro de agua por m^2 . Ver *Figura 4.19* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Figura 4.19 Técnicas de bioingeniería intercalando con pastos y estaquillados de madera para estabilizar taludes en la minería.

Casuarina equisetifolia. Para un volumen de precipitación promedio de 0.0067mm en la región de estudio en una hectárea de 30% de cubierta vegetal con promedio de un año de plantación se logró interceptar el 20.1% del agua lluvia. Ver *Figura 4.20*



Figura 4.20 Cubierta vegetal con *Casuarina equisetifolia*.

Pino cubensis. Para un volumen de precipitación promedio de $0.0067mm$ en la región de estudio en una hectárea de 5% de cubierta vegetal con promedio de un año de plantación se logró interceptar el 3.35 % del agua lluvia.

Lo antes expuesto nos demuestra que la especie vegetal que posibilita la mayor interceptación del agua lluvia son los pastos. Ver *Figura 4.21*

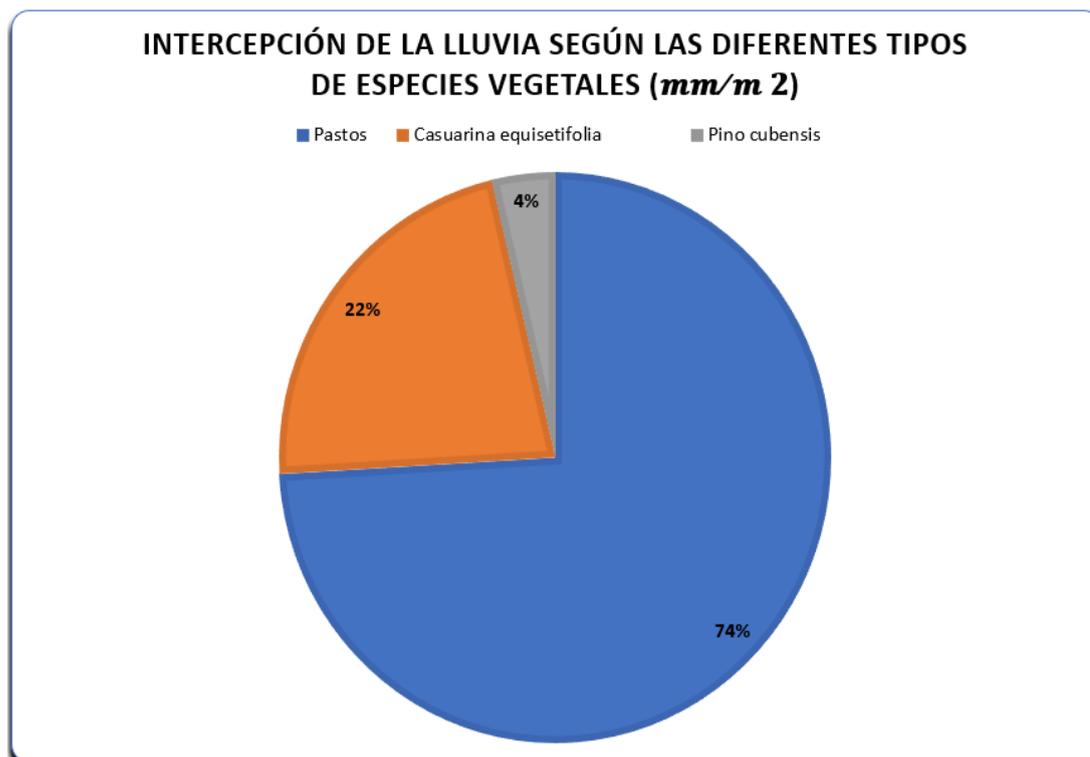


Figura 4.21 Intercepción de agua lluvia según especies vegetales presentes en los tres yacimientos de estudio.

4.3 Análisis económico de las técnicas de bioingeniería según el porcentaje de retención de lluvias.

Yacimiento	Tipo de vegetación	Retención %	Volumen de precipitación por la vegetación (mm/m^2)	Técnicas de bioingeniería	Costo por hectárea (ha). Bioingeniería	Costo por hectárea (ha). Tradicional	Dif. %
Zona A	Pastos	100	67	<ul style="list-style-type: none"> • Canal de desviación o difusión de aguas • Canal longitudinal de sacos de tierra • Zanja de infiltración • Tratamiento lineal con fajas de ramas • Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra • Tratamiento lineal con postes de madera. • Malla de sombra tipo raschel 	26,823.61	45,783.55	52
Moa Oriental	Casuarina equisetifolia	30	20,1	<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras de postes de madera • Geoceldas • Hydroblock • Terrazas (o bermas) 	16,575.98	21,088.09	78.6
Camarioca Norte	Pino cubensis	5	3,35	<ul style="list-style-type: none"> • Terraza forestal • Tratamiento lineal con fajas de ramas • Terrazas (o bermas) 	18,321.45	21,088.09	86.88

Tabla 3. Análisis económico y costo por hectárea según por ciento de retención aplicando cada técnica de bioingeniería en los 3 yacimientos de estudio.

4.4 El impacto económico de las diferentes técnicas de bioingeniería se basa en:

Técnica	Ventajas
Hidrobloques	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: mayor rapidez de montaje, menor costo de compra y mayor durabilidad. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio, control efectivo de la erosión hídrica con una mejor calidad visual del paisaje. • <u>Social</u>: protección de comunidades cercanas y desviación de los flujos hacia sectores no poblados.
Terrazas forestales	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: utiliza materiales locales como vegetación y rocas; no depende de insumos importados ni de gastos en divisas. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio con gran calidad visual. Disminuye los flujos de agua y la erosión del suelo • <u>Social</u>: protección de comunidades cercanas.
Estacas vivas o estaquillado (Live staking).	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: rapidez en su montaje y fácil mantenimiento, económico y gran durabilidad. • <u>Ambiental</u>: no contamina el medio, estabilizarán el suelo, reforzándolo y cohesionándolo, incrementando significativamente la resistencia al deslizamiento. • <u>Social</u>: protección a la población cercana en estas áreas.
Microcuencas	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: no depende de insumos importados ni de gastos en divisas, es lo suficientemente económico. • <u>Ambiental</u>: modifica el perfil del terreno manteniendo las características del suelo. • <u>Social</u>: protege a la población más cercana de inundaciones y de corrida de sedimentos
Diques de estructura gavionada	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: depende de insumos importados y de gastos en divisas, es caro. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio, control efectivo de la erosión hídrica, estabiliza el suelo, reforzándolo y cohesionándolo, incrementando significativamente la resistencia al

	<p>deslizamiento. <u>Social</u>: protección de comunidades cercanas y desviación de los flujos hacia sectores no poblados.</p>
Disipador	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: mayor rapidez de montaje menores costo de compra y mayor durabilidad. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio, evita el socavamiento en cauces y base de taludes, al recibir los flujos hídricos en bruscos cambios de pendiente. <p><u>Social</u>: protección de comunidades cercanas y desviación de los flujos hacia sectores no poblados.</p>
Muro de postes de madera.	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: mayor rapidez de montaje menores costo de compra y mayor durabilidad. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio, estabiliza áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua <p><u>Social</u>: protección de comunidades cercanas y desviación de los flujos hacia sectores no poblados.</p>
Geomallas	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Económico</u>: mayor rapidez de montaje menores costo de compra y mayor durabilidad. • <u>Ambiental</u>: menor contaminación del medio, reforzamiento de riberas de arroyos y ríos, puentes, viales, suelos pantanosos, diques y otros. • <u>Social</u>: protección de comunidades cercanas. Además de proporcionar empleos.

Tabla 4. Evaluación económica de las técnicas de bioingeniería.

4.5 Trabajos de mantenimientos y monitoreo

- La empresa garantiza los trabajos de mantenimientos a las plantaciones y obras de ingeniería existentes. Ver *Figura 4.22, Figura 4.23 , Figura 4.24 y Figura 4.25 .*



Figura 4.22 Trabajos de mantenimiento en obras de bioingeniería para la estabilización de suelos minados en la empresa Moa Nickel S: A.



Figura 4.23 Mantenimiento en piscinas.



Figura 4.24 Mantenimiento a las geoceldas colocadas en diferentes áreas del sector de estudio.



Figura 4.25 Mantenimiento a obras de bioingeniería que regulan el flujo hídrico en la minería.

- Métodos y técnicas de control fitosanitario para las especies vegetales. Ver *Figura 4.26*



Figura 4.26 Control fitosanitario.

- Se verifica de manera regular si las actividades se están llevando a cabo, cómo se realizan y qué resultados se están obteniendo. Ver *Figura 4.27*



Figura 4.27 Verificación de la aplicación de las técnicas de bioingeniería en áreas afectadas por la minería .

4.6 Propuestas de otras técnicas de bioingeniería

1. Hidrosiembra.
2. Control químico de la erosión hídrica.
3. Control químico de la erosión eólica.
4. Fajinas vivas (fascines).
5. Zanjas de infiltración.
6. Tratamientos de cubiertas superficiales.

Conclusiones parciales

1. Los resultados de las técnicas de bioingeniería aplicadas en áreas minadas en la empresa Moa Nickel S: A demuestran el alto impacto de estos trabajos en la economía, la sociedad y el medio ambiente.
2. El análisis de los niveles de intercepción de agua lluvia por hectárea, según la cubierta vegetal y el tipo de especie demostró que la cobertura de los pastos es la de mejores resultados.
3. Se recomiendan nuevas técnicas para la estabilización de suelos minados en el área objeto de estudio.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Existencia de una gran cantidad de información a nivel internacional, en Cuba la información de la aplicación de la bioingeniería en terrenos minados es escasa y muy ambigua.
2. El sistema de selección de métodos propuesto para la aplicación de la bioingeniería a suelos minados, garantiza la prevención, mitigación o corrección de impactos sobre el medio ambiente, la sociedad y la economía.
3. La evaluación de los métodos de bioingeniería demostró que los mayores niveles de efectividad están en el yacimiento Zona A, al alcanzar un 100% de retención de la lluvia y un 52% de costo menor, correspondiente a la cobertura de pastos, con mayor impacto positivo sobre el medio ambiente, la sociedad y la economía.

RECOMENDACIONES

1. Entregar la presente investigación a la dirección del Grupo Empresarial de Cubaníquel.
2. Realizar investigaciones más detalladas sobre la influencia de los métodos de bioingeniería en la prevención de la pérdida de suelos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Almaguer Carmenates, Y; Guardado Lacaba, R. (2003) .Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentínico del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín- Cuba. En: V Congreso de Geología y Minería. Ingeniería Geológica e Hidrogeología. Publicación científica. La Habana, Cuba; 24 - 28 de marzo del 2003 .P 14-15.
2. Andrés, P y Rodríguez, R (Eds.) 2008. Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica .Capítulo IV Erosión: Evaluación del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo P 125- 145.
3. Augusto Muachissaco, Custodio. (2017). Evaluación de la estabilidad de los taludes en la cantera de calizas "Urbano Noris". Rafael Noa Monje (Tutor).Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa .70p
4. Beitra Chaviano, A; Cervantes Guerra, Y; Pierra Conde, A. Algunas consideraciones de rehabilitación minera en la minería del níquel: Municipio de Moa, Cuba .Revista (DELOS) Desarrollo Local Sostenible .Vol. 4, No 10; p 2-10.
5. Capítulo 8 Vegetación y Bioingeniería. 275- 282
6. Colindres .Manual para obras de Ingeniería Civil y Bioingeniería, de pequeña escala .Proyectos: Paisajes Productivos Resilientes al Cambio climático y redes socioeconómicas fortalecida en Guatemala. 124p
7. Compilado de varios autores por: Miriam Dows/ Corporación Suiza. Manual de Bioingeniería. Proyecto: Fortalecimiento de la gestión de riesgos en el municipio de Dulce Nombre de Culmí, Olancho. P3-7, 8-26.https://www.unisdr.org/files/globalplatform/591d932973b10CRS-CRH_Manual_de_Bioingenieria_-_2013.pdf
8. Downs, S. (2010) Manual de Bioingeniería. Reduciendo riesgos y adaptándonos al Cambio climático .77p
9. Efectividad de la bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa en laderas. Universidad de Manizales maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente Manizales caldas Colombia 2014. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/1282/Florez_Florez_Gloria_del%20Socorro_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

10. Estabilización de taludes. Capítulo 6. (13p).
11. Fernández Fis, Y. (2015). Riesgos ambientales por contaminación en las aguas superficiales del río Moa. Moraima Fernández (Tutora). Tesis de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
12. Fernández, J.; Souto Cruz, C; Pérez, H. Líneas de investigación sobre especies para la bioingeniería en ámbito mediterráneo. Universidad de Évora, Portugal.
13. Informe sobre el proceso de monitoreo ecológico realizado a concesiones mineras explotadas y rehabilitadas, pertenecientes a la Empresa Minera Mixta Pedro Sotto Alba, Moa Níckel S.A., Moa, Holguín, Cuba. Empresa de Ciencia, Tecnología y Medioambiente. Unidad de Servicios ambientales Alejandro de Humboldt (UPSA) Delegación Territorial de CITMA en Guantánamo.
14. Métodos de estabilización para un talud ubicado en el sector Portal de la Martinica, Ibaqué - Tolima. Humberto González Mosquera (Tutor). Trabajo de Diploma. Universidad Cooperativa de Colombia Campus Ibaqué Espinal. Facultad de Ingeniería Civil. 83p
15. Goldman, S. J., Jackson, K., Bursztynsky, T. A. (1986). Erosion and sediment control handbook. McGraw-Hill, Nueva York.
16. Guardado Lacaba, R; Almaguer Carmenate, Y; Hernández Aguilera, Y; Tamayo Ricardo, J.R.; Guy Yoel, P. (2001) Estabilidad de taludes en suelos lateríticos del yacimiento Punta Gorda aplicando criterios de rotura. En Geo.br (2001).P30-41.
17. Guardado Lacaba, R; Almaguer Carmenate, Y. (2003) Rocas y suelos como indicadores ingeniero geológicas y ambientales de estabilidad y sostenibilidad de taludes y laderas .En: V Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología .Publicación científica. La Habana, Cuba ,24 - 28 de marzo 2003.
18. Guerra López, E. (2006) .Diseño de la explotación del Área 11 del yacimiento Moa Oriental. Trabajo de Diploma.
19. Hernández Columbié, T.; Guardado Lacaba, R (2014). Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. Revista Minería y Geología. Vol. 30, No.4; octubre - diciembre 2014 .p55- 69
20. Ley 76- 94 Ley de Minas .Edición Ordinaria (1995).Asamblea Nacional del Poder Popular.

21. Ley No 81 de Medio ambiente.
22. Lezcano Rodríguez, C.R. (2017- 2018). Análisis de la vulnerabilidad Global en la Presa de colas inactiva de Moa. Tereza Hernández Columbié (Tutora). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 71p
23. Magas García, A.R; Hernández Santana, J.R; Díaz-Díaz, J.L; Hernández Guerrero. (2006) Formación y consolidación de las morfo estructuras septentrionales de la región central del archipiélago cubano y su geodinámica reciente. Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, No.61 pp7-23.
24. Manual de Obras de Bioingeniería en zonas de laderas con procesos de remoción de masa para altitudes superiores a 3.000 M.S.N.M., junio 2016. Bogotá D.C, Colombia. P 5-6 ,19-21, 25.
25. Manual de técnicas de estabilización biotécnicas en taludes de infraestructura de obra civil .Proyectos de I+D+i (2013 - 2014). Universidad de Córdoba, Instituto de Agricultura Sostenible, 56p.
26. Marín Sánchez, R.J; Osorio, P.(2017).Efectos de la Vegetación en la estabilidad de ladera .Revista Politécnica, No.24 pp 113 - 126
27. Métodos y técnicas de control fitosanitario para los cultivos. <https://www.trichodex.bio/metodos-y-tecnicas-de-control-fitosanitario-para-los-cultivos/>
28. Moscoso Guerrero, Francisco J. (2003) Principios y fundamentos para aplicación de Bioingeniería de suelos en taludes de corte; 27-30, 49-80. Detwyler, T.R. (ed.). 1971. Man's Impact on Environment. McGraw-Hill, New York, USA. Trabajo de Diploma .Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Geográfica.
29. Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos. Proyecto DE I+D+i .141p
30. Pacheco Rodríguez; Lorenzo, R. (2002). Estudio experimental de flujo y transpiración de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
31. Paradelo, R. 2013. Utilización de materiales comportados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. Boletín Geológico y Minero, ISSN: 0366-0176, 124 (3): 405-419.
32. Reyes -Suárez, Y.R. (2019). Análisis de estabilidad de taludes aplicando

- diferentes técnicas de revegetalización. Cáceres Cárdenas, L. A (Tutor). Trabajo de grado. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Posgrados, Tunja. 141p.
33. Rivera Posada, J.H. (2003) Manejo y estabilización de taludes en zonas de ladera mediante tratamientos de bioingeniería. Avances técnicos 291. Cenicafé. Colombia.
34. Rivera P. J. H. Y Sinisterra R, J. A (2.006). Uso social de la Bioingeniería para el control de la erosión severa. CIPAV: Cali. P. 110.
35. RIVERA P., J.H. 2006. La Bioingeniería en el Control de Erosión y Movimientos Masales en Zonas de Ladera Tropicales. IN: Agenda Ciudadana del Medio Ambiente Caldas. Publicación de la Agenda Ciudadana del Medio Ambiente Manizales - Caldas. Contraloría General de la República Gerencia Departamental de Caldas Centro de Participación y Control Ciudadano. Manizales Caldas Colombia
36. Rodríguez Escalona, G.I. (2018) Intervención y conducción de la casuarina equisetifolia como planta exótica en la Provincia Las Tunas, Cuba .Revista: Caribeña de Ciencias Sociales. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/09/casuarina-equisetifolia-cuba.html>
37. Rodríguez Infante, A.(2008) .Estudios Morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica (Resumen de tesis Doctoral 1998) .Revista Minería y Geología. Vol.21 No.3
38. Sangalli y Valenzuela. (2016). Bioingeniería o Ingeniería Biológica Introducción a la Bioingeniería o Ingeniería Biológica. Obtenido de <http://www.caminospaisvasco.com/Actividades/bioingenieria/introduccionbioingenieria> Sangalli, P. (2016). Que es la Ingeniería Biológica o "Bioingeniería". Obtenido de <http://www.horticom.com/pd/imagenes/61/269/61269.pdf>
39. Sidi Mohamed, H. (2004) .Evaluación de la estabilidad y propuestas de medidas correctoras en taludes y laderas inestables en el camino minero Punta Gorda-La Melba ,Parque Nacional Alejandro y de Humboldt. Madaya Cartaya Pire (Tutora). Tesis de diploma .Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
40. Suárez. (1989). Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. En J. S. DIAZ, Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. (pág. 556). Bucaramanga:

Universidad Industrial de Santander. Investigaciones Sobre Erosión y Deslizamientos.

41. Suárez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de investigación sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander Bucaramanga - Colombia.
42. Técnicas de bioingeniería para control de taludes y erosión de suelos .In document. Revisión panorámica del uso del pasto vetiver (Chrysopogon zaizanioides) en restauración del taludes como técnica de bioingeniería del suelo (página 47-53) <https://1library.co/article/t%C3%A9cnicas-bioingenier%C3%ADa-control-taludes-erosi%C3%B3n-suelos.zggj2v2z>
43. Torres Batista, J .Hern Escobar, A; Luz Reinaldo, C; Arguelles (2019). Aproximación teórica a un modelo de gestión económico- ambiental para la Rehabilitación Minera .Revista Luna Azul .No 48: p 109- 117.
44. Urbino Rodríguez, J; Díaz Martínez, B; Sigarreta- Vilches, S. (2016). Rehabilitación ambiental minera. Capítulo IV Gestión, normativas y legislación ambiental vinculada a la Rehabilitación ecológica. Holguín. Capítulo V Procesamientos de la Rehabilitación ambiental minera. P 178- 211
45. Vargas Rodrigo; Tokugawa Koichi; Makita Masatoshi. Manual de Control de Erosión. Santiago de Chile, (diciembre de 1998) ,10-71.
46. Voss Freitas, M.M .(2019). Estabilidad de taludes en zonas tropicales: Antecedentes, métodos de análisis y la aplicación de la bioingeniería para el control de inestabilidad. Guillermo Rodríguez Cayllaltua (Tutor). Trabajo de Diploma .Centro Geotécnico Internacional, el Callao, Venezuela.

ANEXO

Evento:


CITMA
DELEGACIÓN HOLGUÍN

Reconocimiento

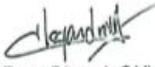
KATIA RIVERA HARDY

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