

Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel

Teresa Hernández-Columbié
Rafael Guardado-Lacaba

Resumen

Este artículo 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. Se logró una supervivencia del 90 % de las especies plantadas y una estabilización superior al 95 % de control de la erosión superficial del suelo.

Palabras clave: bioingeniería; presas de colas; control de erosión; rehabilitación ambiental.

Erosion control in the tailings ponds of nickel industries using bioengineering techniques

Abstract

This article proposes the implementation of bioengineering techniques to provide economical and effective solutions to the environmental effects caused by the tailings ponds that are exposed to weathering agents. The plantation of tree species as *Casuarina equisetifolia*, *Vetiveria zizanioides*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum* and *Digitaria decumbens* which are highly available and adaptable to existing conditions was tested in order to build up a vegetal cover that prevents the erosion of the pond slopes. The results were: 90 % of the species survived and over 95 % stability in the control over the erosion of the soil surface.

Keywords: bioengineering; tailings pond; erosion control; environmental rehabilitation.

1. INTRODUCCIÓN

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 las reservas 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).

Las presas donde se acumulan las colas derivadas del proceso metalúrgico son fuentes contaminantes expuestas a la acción directa de los agentes del intemperismo. La rehabilitación de estas presas constituye un reto dentro de la minería de la industria del níquel, debido a las condiciones adversas que poseen estas obras para el desarrollo de una cobertura vegetal efectiva que asegure el control de la erosión de los suelos, lo que obliga a la búsqueda de soluciones ambientalmente más eficaces y de bajo costo. En este sentido, la bioingeniería es una vía para solucionar tal problemática (Hernández-Columbié 2010).

La bioingeniería es la disciplina constructiva que persigue objetivos técnicos, ecológicos, estéticos y económicos, utilizando sobre todo materiales vivos como semillas, plantas, partes de plantas y comunidades vegetales únicamente o en combinación con materiales inertes (rocas, tierra, geotextiles) y mallas metálicas como elementos constructivos. Estos objetivos se consiguen aprovechando los múltiples rendimientos de las plantas y utilizando técnicas constructivas de bajo impacto ambiental (Schiechteln 1998).

Las técnicas de bioingeniería son más sostenibles a largo plazo ya que la vegetación tiene la capacidad de auto-regenerarse y es capaz de responder de forma dinámica y natural a condiciones cambiantes sin perder sus propiedades ingenieriles (Rickson & Morgan 2004).

Rodríguez-Pacheco (2011) plantea que para evitar riesgos asociados a la construcción de estas presas debe prestarse especial atención a las etapas de diseño, construcción y operación, además de la planificación del proceso de rehabilitación para el cierre y poscierre.

En los últimos años se ha desarrollado una amplia gama de cubiertas con duración aproximada de 100, 200 a 500 años, pero en la mayoría de los casos, no se cuenta con datos de campo sobre la efectividad de estos diseños (Anduvires & Quinteros 2008).

En Cuba, se presta especial interés a la rehabilitación de las presas de colas y actualmente se desarrollan técnicas novedosas para la rehabilitación, que emplean la bioingeniería para formar coberturas vegetales en menor tiempo y a costos más bajos. La implementación de esta técnica es aún incipiente, y resultan escasas las publicaciones sobre la temática. La empresa encargada de la rehabilitación minera de la industria del níquel ha aplicado varias técnicas de bioingeniería de forma empírica, con resultados positivos, pero se requiere el desarrollo de tecnologías propias basadas en las condiciones particulares de cada región, y las características de las especies vegetales a utilizar en cada método de protección.

Los primeros trabajos de rehabilitación de presas de colas en la industria del níquel cubana datan de la década de los 80 del pasado siglo, cuando se realizaron trabajos investigativos (Herrero et al., com. esc. 1982), en las presas de colas de los procesos de lixiviación ácida y carbonato amoniacal. Con este fin se crearon varias parcelas experimentales. Estos trabajos tenían como objetivo definir la adaptabilidad de varias especies vegetales en dependencia de la variación de diferentes enmendantes edáficos.

En la fábrica Rene Ramos Latour, en los años 90, se realizaron trabajos de rehabilitación basados en el recubrimiento de los suelos dañados con capas de 25–30 cm de tierra vegetal, lo que permitió obtener una cobertura vegetal estable que cambió el impacto visual de esta obra, y mejoró la biodiversidad de especies en esta zona. Estos trabajos no resultaron viables económicamente, además de producir daños ambientales considerables a las áreas de préstamo de donde se extrajeron miles de metros cúbicos de tierra fértil.

En Moa, se producen alrededor de 60 000 toneladas anuales de níquel más cobalto y los residuos sólidos de esta producción se envían a dos presas de colas en operación. Una tercera presa actualmente constituye un pasivo ambiental.

Los diques de contención de las presas de colas que se encuentran en operación actualmente en la región de Moa poseen un alto nivel de erosión, y las colas quedan expuestas a la acción directa del agua y el viento, con formación de cárcavas de grandes dimensiones que ponen en

riesgo la estabilidad de las presas (Figura 1). Es por ello que el objetivo de este trabajo fue la aplicación de técnicas de bioingeniería para la protección efectiva contra la erosión de los taludes de las presas de colas de la industria del níquel en Moa.



Figura 1. Cárcava en dique de la presa provocada por la erosión hídrica.

2. METODOLOGÍA

La rehabilitación de las presas de colas, utilizando técnicas de bioingeniería, se desarrolló según las siguientes etapas:

- Zonificación de los riesgos de la presa de colas;
- Trabajos de sellaje de las zonas inactivas;
- Monitoreo inicial de suelo, agua y aire;
- Selección de las especies vegetales a emplear y construcción de bancos de reproducción de plantas;
- Preparación técnica de los taludes;
- Selección de las técnicas de bioingeniería para el control de la erosión;
- Rehabilitación biológica;
- Monitoreo de suelos, agua y de las plantaciones.

La zonificación de los riesgos respondió a la necesidad de determinar las áreas más vulnerables de la presa de colas, por la no existencia de protección de los taludes. La evaluación de los riesgos permite definir las técnicas más adecuadas según el nivel de vulnerabilidad de cada dique de contención.

Los trabajos de sellaje de las colas expuestas se basaron en el recubrimiento de los depósitos de colas, con una capa de 50 cm de material laterítico, para confinar el material de las colas de la acción de los agentes erosivos, además de crear una barrera entre las colas y las especies vegetales que se emplean en la rehabilitación biológica.

El monitoreo inicial del suelo, agua y aire se basó en la ejecución de varios análisis, para definir el porcentaje de macroelementos primarios (N, P, K) y secundarios (Ca, Mg y S) en los suelos, así como los microelementos (Fe, Cu, Zn, Mn, B y Mo).

Las tomas de muestras de suelo se realizaron de forma aleatoria en los sectores que serían rehabilitados; las muestras de agua se tomaron de la red de pozos que existen distribuidos por todos los sectores de la presa; el aire se monitoreó a través de estaciones existentes en el área de estudio. Estos resultados permiten determinar el volumen de las mejoras edáficas requeridas y definir las especies idóneas según las condiciones existentes en las presas de colas.

El establecimiento de una cobertura vegetal exitosa requiere de una serie de criterios (Dickerson et al. 1998) entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Selección de las especies vegetales según los resultados de los análisis del monitoreo inicial y elección de las especies a emplear en la rehabilitación;
- identificación de las especies vegetales que crecen de forma espontánea en las zonas vecinas o en hábitat similares;
- tipos de reproducción de cada especie;
- marco de plantación y de siembra para cada especie;
- definir si la vegetación tiene los atributos deseados: raíces, follaje, tolerancia a condiciones extremas, hábitos de crecimiento;
- determinación de la disponibilidad de material vegetal en los sitios de préstamo, lo que definirá el volumen de plantas que se deben aviverar en los bancos de reproducción de plantas.

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.

La preparación de los terrenos consiste en trabajos de prevención de la erosión y adecuación de los terrenos para la actividad de siembra y plantación. El control de la erosión debe basarse en los resultados del diagnóstico de esta problemática en las presas de colas, donde se determinarán las causas, mecanismos de la erosión y los métodos de bioingeniería para la protección en cada caso en particular.

En las labores de prevención, corrección y mitigación de la acción de la erosión se realizan acciones tales como:

- Protección de taludes (bioestabilización de taludes de los diques en operación y construcción de obras de protección de los taludes inactivos):
 - La bioestabilización consiste en la protección química de los suelos a través de la aplicación de polímeros sellantes, los cuales garantizan el control efectivo de la erosión en los taludes, siendo esta protección temporal (Figura 2).



Figura 2. Aplicación de polímero sellante para el control de la erosión.

- Construcción de obras de protección de los taludes de la acción de la erosión, que consisten en la aplicación de técnicas de control de la erosión superficial, como canales, desviación y aliviaderos. Para determinar el método adecuado se debe definir si las estructuras serán permanentes o provisionales que se desintegren después de establecida la vegetación, además las técnicas deben proporcionar la protección necesaria y cuál es el sistema que provee mejor estabilidad a largo plazo. En estos tipos de

técnicas se emplean varios materiales como geosintéticos de polietileno de alta densidad (HDPE) o de polipropileno, rocas, madera, los cuales se combinan con especies vegetales diversas.

La preparación de las presas de colas consistió en la adecuación de los tipos de suelos de los taludes de los diques de contención. Para la preparación del sitio se tomaron en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Extendido de los taludes a una pendiente estable, de forma que se facilite el establecimiento de la vegetación. Las presas de colas poseen una pendiente 3H:1V, la cual favorece el establecimiento de la vegetación;
- Surcado de los terrenos, que permite la acumulación del agua. La profundidad será de 20-30 cm;
- Verificar la funcionalidad de las obras de drenaje existentes en los taludes;
- Construcción de accesos para mantenimientos cada 50 m.

La rehabilitación biológica requiere no solamente conocimientos de ingeniería, sino también información relativa a las propiedades de las plantas, su estructura, altura, grosor y rigidez de los tallos, profundidad, densidad y distribución de las raíces, actitud para el régimen climático del sitio, interacción con el agua y el suelo, resistencia a la tensión, etc. (Suárez-Díaz 2008).

Para el diseño de los componentes vegetativos se tuvo en cuenta los siguientes elementos: análisis del sitio, selección de las especies vegetales, preparación de los terrenos, manejo de los materiales vegetales, sistema de establecimiento y mantenimiento de las áreas rehabilitadas.

- En la rehabilitación biológica de los taludes de las presas de colas las especies seleccionadas tienen funciones específicas, las cuales son: Especies arbóreas de rápido crecimiento: Tienen el objetivo de proteger las plantaciones de las corrientes de aire. Se emplean especies de árboles de rápido crecimiento. El marco de plantación será de 1,5 m x 1,5 m a tres bolillos, lo que permitirá la creación de una cortina más densa, la cual se establecerá en los perímetros de las plataformas y en el pie de los taludes, que incrementará la estabilidad de los mismos. Especies arbustivas: Estas especies tienen la función de aportar importantes cantidades de nitrógeno al

suelo y materia orgánica, además de establecer una cadena de reproducción espontánea de su especie, y de favorecer la entrada de otras especies naturales de la zona dentro de las áreas rehabilitadas

- Pastos: Es el tipo de vegetación más comunmente utilizado para el control de la erosión y, en ocasiones, es el único tipo de protección. Existe una gran variedad de pastos y esto facilita su empleo. Entre los tipos de pastos más empleados en la rehabilitación de presas de colas se encuentran los siguientes: Vetiveria zizanioides, Cynodon dactylon, Panicum maximum y la Disitaria decumbens stent. Los pastos de porte alto serán empleados como barreras antierosivas, los pastos de porte bajo se usarán como recubrimiento de los taludes.

Los trabajos de sellaje de las zonas inactivas se realizan como parte de la construcción de la presa de colas, el material es dispuesto como una capa aislante encima de las colas depositadas.

El monitoreo inicial de suelo, agua y aire se realiza antes, durante y después de los trabajos de rehabilitación, los resultados demostraron el bajo porcentaje de todos los macroelementos y microelementos necesarios para el desarrollo de las especies vegetales. Los valores de materia orgánica son insuficientes para el establecimiento de la vegetación, los resultados del monitoreo permiten la planificación correcta de los volúmenes de los enmendantes edáficos requeridos para el establecimiento de la vegetación.

Para la selección de las especies vegetales se tuvo en cuenta las funciones específicas de cada una de ellas, tales como: regeneración espontánea de las especies en la presa de colas, alta adaptabilidad a las condiciones existentes, disposición de plantas en la zona y características propias de las plantas que respondan a los objetivos del proyecto de rehabilitación.

Debido a que las presas de colas de la industria cubana del níquel son obras que se encuentran en alturas superiores a los 40 m sobre el nivel del mar, situadas en las proximidades de la costa, donde los vientos predominantes son muy fuertes por lo que causa una disminución significativa de los niveles de humedad de los terrenos a rehabilitar, se empleó la Casuarina equisetifolia como especie de rápido crecimiento, en los perímetros de las plataformas y en el pie de los taludes, lo cual permitirá mantener la humedad de las plantaciones e incrementar la estabilidad de los taludes.

Como especies arbustivas el hicaco, marañón y cerezas, en un marco de 1 x 1 m a tres bolillos. Estas especies poseen un alto desarrollo en el crecimiento del follaje, además son grandes aportadoras de nitrógeno al suelo, poseen un alto grado de reproducción espontánea. Estas plantas desempeñan un papel fundamental como estrato vegetal intermedio de las cortinas rompevientos.

De los pastos se seleccionó la *Vetiveria zizanioides* para la construcción de las barreras antierosivas, que es una de las variedades de mayor utilización en el mundo para el objetivo específico de la protección contra la erosión. Esta planta crece en grandes macollas a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa, formando un sistema de hojas densamente tupido. La *Vetiveria zizanioides* forma macetones concentrados y no es invasiva, la planta puede permanecer en el sitio hasta 60 años (Greenway 1997). Las raíces son fibrosas y extraordinariamente profundas, alcanzan hasta 5 m de profundidad, formando un sistema extensivo de raíces con gran densidad. Desde el punto de vista de ingeniería este sistema de raíces presenta una gran resistencia a la tracción y prácticamente impide la erosión, resistiendo velocidades muy altas de corriente y grandes turbulencias.

Esta especie se adapta con facilidad a casi todos los tipos de condiciones, excepto la sombra, resiste períodos de inundación prolongados, crece en suelos de pH variable, tolera las sequías intensas, es capaz de crear barreras antierosivas, permitiendo un control efectivo de la erosión en un corto espacio de tiempo.

Además, se sembró el *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum* y la *Disitaria decumbens* stent; también presentan un alto grado de invasión, logrando crear verdaderos pastizales en tiempos relativamente cortos, son capaces de controlar el crecimiento de especies invasoras como el *Dichrostachys Cinerea* y *Acacia farnesiana*. Es de gran importancia la temporada de siembra de estas plantas; se debe realizar las plantaciones en las temporadas de lluvias o garantizar el riego de las mismas en la primera semana después de la plantación. Para el aseguramiento del abastecimiento de especies y su adaptación más rápida al medio se construyeron dos bancos de reproducción de plantas.

En la Figura 3 se remarcan las técnicas de bioingeniería que se emplearon en la rehabilitación de las presas de colas de la industria cubana del níquel.

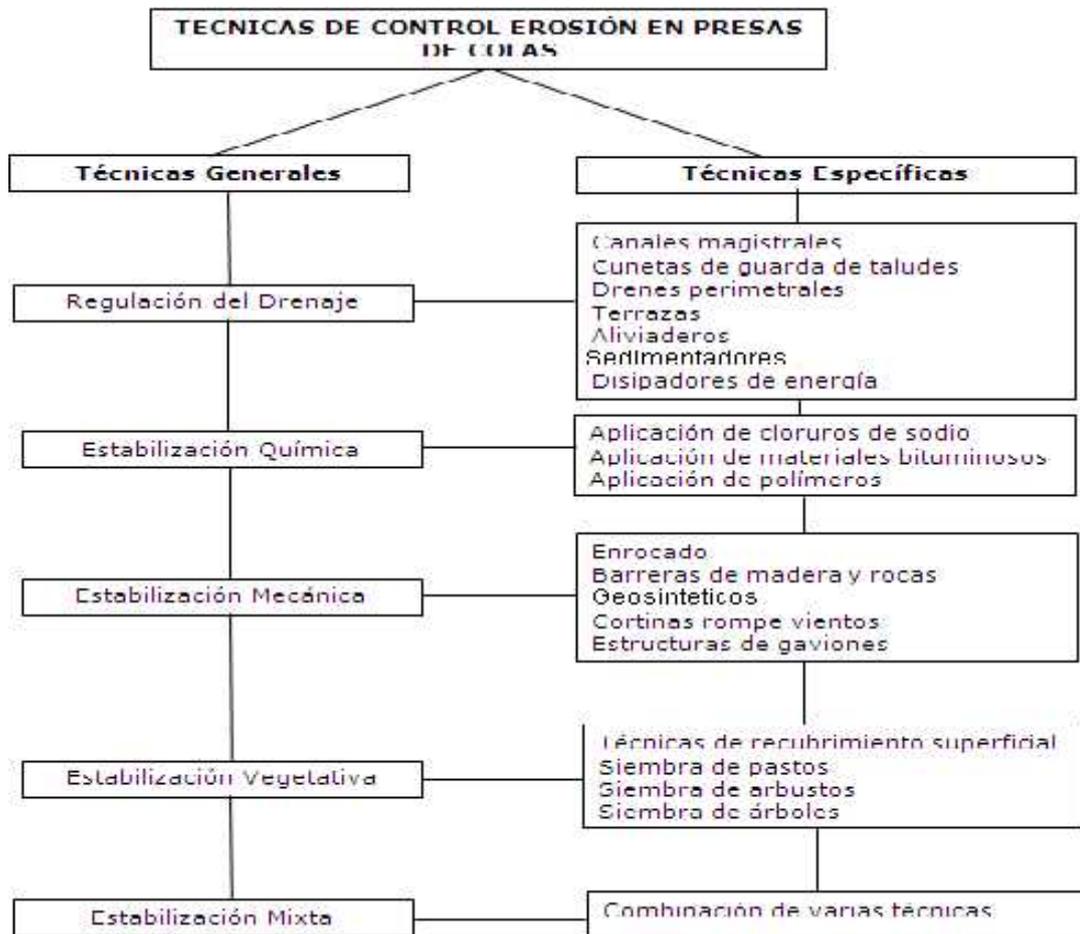


Figura 3. Técnicas de bioingeniería para el control de la erosión en las presas de colas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de la rehabilitación de las presas de colas, con la aplicación de técnicas de bioingeniería, para el control de la erosión superficial, se logró demostrar la idoneidad de la metodología empleada, identificando las técnicas para la rehabilitación de las presas de colas de la industria del níquel, remarcando la importancia de la correcta selección de las especies vegetales y métodos a emplear en la rehabilitación para la estabilización de taludes (Figura 4).



Figura 4. Proceso de estabilización de talud aplicando la bioingeniería.

En muchos países la aplicación de las técnicas de bioingeniería en la rehabilitación de las presas de colas no logra resultados positivos (Dickerson et al. 1998) por la falta de mantenimiento durante el período de estabilización de los terrenos. En las presas de colas de la industria cubana del níquel se han logrado resultados alentadores debido a los trabajos de mantenimiento y monitoreo de los factores ambientales del sitio.

El empleo de especies naturales de la región permite controlar la erosión para el establecimiento de una cobertura vegetal adecuada, cumpliendo así los objetivos del proyecto. Los niveles de supervivencia de las especies superaron el 95 % en todas las especies utilizadas.

El éxito de la rehabilitación de las presas de colas, aplicando las técnicas de bioingeniería, depende en gran medida del grado de conocimiento que se tenga de las áreas de trabajo, donde el estudio de los regímenes de las precipitaciones (Figura 5) y la identificación de los riesgos existentes constituyen elementos decisivos en la toma de decisiones para la selección de las técnicas de rehabilitación a ejecutar.

Para determinar los parámetros de las precipitaciones se utilizó el nuevo mapa isoyético, confeccionado por especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), y los datos de los equipos pluviométricos ubicados en las cercanías de la presa de colas.

La Figura 5 muestra el comportamiento de los eventos lluviosos durante el período de las últimas cuatro décadas. El período húmedo o lluvioso se

prolonga desde mayo hasta noviembre y el período seco o poco lluvioso desde diciembre hasta abril, en ambos períodos se encuentran meses con bajos y altos acumulados. Se muestra claramente que para una probabilidad media de ocurrencia en el período húmedo precipita el 63 % de las lluvias anuales, siendo el mes de noviembre el de mayor acumulado, con 14 % del total anual; mientras que el periodo seco se encuentra el 36,9 % y su mes más seco es marzo, con solo 6,1 % del total anual.

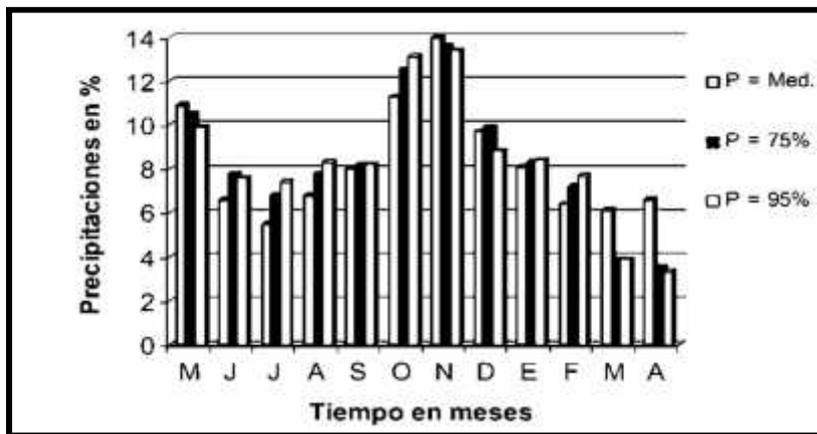


Figura 5. Distribución típica de las lluvias. INRH 2010.

En la evaluación de los riesgos del área de estudio se definen los niveles de amenazas y el grado de vulnerabilidad de las presas de colas; se realiza una sectorización por cada tipo de riesgo, lo que permite una valoración particular de cada sector, determinando para cada cual las prácticas de bioingeniería necesarias para mitigar los riesgos existentes (Figura 6).

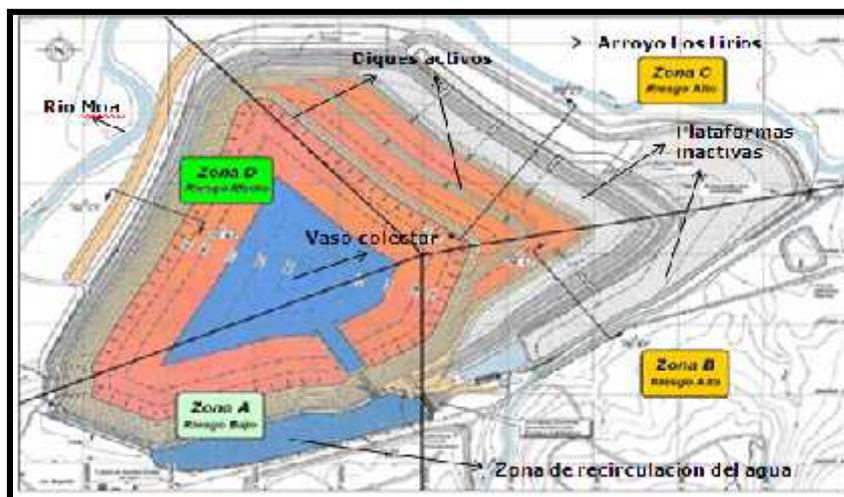


Figura 6. Sectorización de los riesgos sobre la presa de colas.

En el mapa anterior se evidencia que las zonas norte y este de la presa de colas constituyen las zonas con riesgos más altos, requiriendo técnicas de bioingeniería más complejas que mitiguen los riesgos de estas áreas.

El estudio de riesgos realizado por Geocuba (2009) concluye que los factores externos que crean condiciones de elevada susceptibilidad al deslizamiento son los altos niveles de precipitaciones y el escurrimiento superficial, la sismicidad de la región y la deforestación circundante, provocada por las actividades mineras, que junto con los factores internos de la presa de colas, la falta de revestimiento y la altura de los taludes, exigen de un programa de rehabilitación detallado.

La aplicación de la bioingeniería en los trabajos de rehabilitación de las presas de colas muestra resultados positivos, tales como:

- Funcionamiento adecuado de las obras de drenaje;
- Control efectivo de la erosión superficial de los taludes superior a un 95 %, con la aplicación de polímeros sellantes;
- Establecimiento de una cobertura superficial para el control de la erosión.

4. CONCLUSIONES

Mediante el uso de las técnicas de bioingeniería se logra una estabilización efectiva, superior a un 95 % de control de la erosión superficial en los taludes de la presa de colas.

Las especies vegetales seleccionadas demuestran un alto grado de adaptabilidad, lográndose un grado de supervivencia de un 90 %, lo que satisface los objetivos planteados al lograrse una cobertura altamente efectiva.

5. REFERENCIAS

- ADUVIRE, O. & QUINTEROS, J. 2008: Mejores técnicas disponibles en la estabilidad física y química en planes de cierre de minas. II Parte. *El Ingeniero de Minas*(58), 20-24.
- DICKERSON, J. A; MILLER, C. F.; BURGDORF, D. W.; VAN DER GRINTEN, M.; 1997: A critical analysis of plant materials needed for soil bioengineering. En: *Proceedings of Conference-International Erosion Control Association*; 28; 291-300.
- GREENWAY, D. R. 1997: *Vegetation and slope stability*. John Wiley and Sons. Ltd.
- HERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T. 2010: Evaluación de impacto ambiental de las presas de colas de la industria del níquel. Simposio Internacional de restauración ecológica. *Memorias [CD-ROM]*, Santa Clara, Cuba, 8-13 de septiembre.

- RODRÍGUEZ-PACHECO, R. 2002: Estudio experimental de flujo y transportación de cromo y manganeso en los residuos de la zona minera de Moa (Cuba). Influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Calaña.
- RODRÍGUEZ-PACHECO, R. 2011: Los desafíos a que se enfrenta el cierre de minas en el siglo XXI. IV Convención Internacional Cubana Ciencias de la Tierra. Memorias [CD-ROM], La Habana, Cuba, 4-8 de abril.
- RICKSON, R. J. & MORGAN, R. P. C. 2004: Water erosion control. Slope stabilization and erosion control. E/FN SPON, London, 133-190.
- SCHIECHTELN, H. M. 1998: Materiales de refuerzo mecánico empleados en la bioestabilización de terrenos. Asociación de Restauración de Redes Fluviales, Alberta, Canadá.
- SUÁREZ-DÍAZ, J. 2008: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Ediciones UIS, Bucaramanga, Colombia.

Teresa Hernández-Columbié thdez@moanickel.com.cu
Máster en Ciencias Ambientales. Especialista de Proyectos.
Mina Pedro Sotto Alba, Moa, Holguín, Cuba.

Rafael Guardado Lacaba rguardado@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.
Departamento de Geología, Instituto Superior Minero de Moa, Cuba.