

# **Procedimiento para la rehabilitación minero-ambiental de yacimientos piríticos polimetálicos cubanos**

Estrella Milián-Milián  
Mayda Ulloa-Carcasés  
Antonio S. Jornada-Krebs  
Yiezenia Rosario-Ferrer

## **Resumen**

El propósito de esta investigación fue diseñar un procedimiento para rehabilitar las áreas afectadas por la minería en yacimientos piríticos polimetálicos cubanos, explotados a cielo abierto, que constituyen pasivos ambientales mineros y fuentes potenciales de degradación del medio. El flujograma del procedimiento se basó en un correcto estudio del medio físico, en la evaluación y caracterización de las áreas afectadas, en el inventario de las zonas de riesgos y en la trayectoria y extensión de la contaminación. Mediante el criterio de expertos se determinaron los principales factores geoecológicos y socioeconómicos que inciden en la rehabilitación de las áreas afectadas y se evaluó la efectividad del procedimiento propuesto, el que incluye, además, un sistema automatizado de ayuda a la toma de decisiones en aras de lograr una minería responsable.

## **Palabras clave**

Minería responsable; rehabilitación ambiental; pasivo ambiental minero; yacimientos piríticos polimetálicos.

## **Procedure for mining and environmental rehabilitation of cuban polymetal pyrite ore mines**

### **Abstract**

The objective of this investigation was to design a procedure to rehabilitate the areas in Cuba's polymetal pyrite ore deposits affected by opencast mining. These mines are identified as environmental liabilities and potential sources of environmental degradation. The procedure flowchart was based on a correct analysis of the physical environment, evaluation and characterization of the affected areas, the inventory of risk areas and the trajectory and extent of the contamination. This included the identification of major geo-ecological and socioeconomic impacts on the rehabilitation of the affected areas and an evaluation of the effectiveness of the proposed procedure which also includes an automated decision making system to allow conducting mining operations in a responsible way.

### **Keywords**

Responsible mining; environmental rehabilitation; mining environmental liability; polymetal pyrite ore mines.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para cumplir los postulados del desarrollo sostenible, las explotaciones mineras han de concebirse, desde el proceso de diseño, como una serie de fases integradas donde se conjuguen las labores extractivas con el respeto por el medio ambiente. Esto significa extracción de los recursos conforme al proyecto de explotación, enlazado con el plan de rehabilitación de los terrenos afectados, sin embargo, la rehabilitación ambiental de las zonas degradadas por la minería no será efectiva si no se consideran las características particulares específicas de cada tipo de explotación minera.

En los yacimientos piríticos polimetálicos del occidente de Cuba, los proyectos mineros anteriores a la entrada en vigor de la legislación ambiental cubana, no concebían medidas de remediación ambiental, y si bien cuentan en la actualidad con planes de rehabilitación aprobados, éstos no han podido compatibilizarse con las etapas de producción, ya que esta previsión no fue integrada al plan de minería para ser plenamente efectiva.

Los yacimientos polimetálicos de plomo y zinc Santa Lucía y Castellano, localizados al norte de la provincia de Pinar del Río, se explotaron a cielo abierto durante varios años; al cesar sus operaciones se convirtieron en pasivos ambientales mineros.

En el año 2006 reinician las labores mineras en Santa Lucía con el objetivo de extraer plata y oro del sombrero de hierro, operación que concluyó en el 2008. El incremento del área denudada y la ausencia de trabajos de recuperación minera aumentaron significativamente los problemas ambientales de la zona (Milián 2006), lo que repercutió de modo negativo sobre el entorno, ya que ni durante ni después de la explotación del yacimiento se realizaron trabajos de rehabilitación en el mismo.

Similar situación tiene lugar en el yacimiento Castellano; aunque en el proyecto minero se disponen medidas para la mitigación de los impactos negativos, en su mayoría no pudieron implementarse por dificultades técnicas y económicas, lo que dio lugar a que el problema de la rehabilitación de los espacios afectados por la minería no esté aún resuelto.

En ambos yacimientos se han realizado estudios para determinar la incidencia ambiental de la explotación minera (Milián 2006, 2011; Cañete 2009, 2011; Gallardo 2011; Delgado 2011). Estos estudios

reflejan en detalle los problemas de contaminación generados por las labores mineras e identifican como principales impactos negativos la contaminación del aire, de las aguas superficiales por acidez y metales pesados, alteraciones del relieve, pérdida y contaminación del suelo, pérdida y afectaciones en la vegetación, migraciones de la fauna, alteración de la calidad visual y contaminación indirecta del litoral por el drenaje ácido.

Los estudios antes citados han demostrado el carácter altamente contaminante de la explotación de los yacimientos, sin embargo, hasta la fecha, los proyectos de rehabilitación implementados han carecido de una sólida base científica.

La rehabilitación de áreas degradadas se ha implementado en diferentes países como un importante instrumento de política pública en el área ambiental. Los enfoques son variados, pero generalmente persiguen como objetivo común asegurar la corrección de los impactos ambientales considerados negativos e importantes (Yazbet 1997).

En Cuba, Urbino & Díaz (2011) consideran la tecnología como un proceso que tiene como fin principal mitigar los impactos negativos de la actividad minera y proponen para la región de Moa, de alto valor de endemismo, una tecnología de rehabilitación ecológica para áreas degradadas por la minería del níquel a cielo abierto.

Según Jiménez (2006), los trabajos de restauración de minas superficiales se realizan principalmente en las áreas que ocupan los depósitos de residuos y las presas de rechazo.

En los manuales de restauración de minas a cielo abierto de los gobiernos de la Rioja (2006) y de la comunidad de Aragón (2006) se proponen procedimientos generales para la rehabilitación de canteras, Así mismo, en el *Manual de Restauración de Terrenos de ITGM* (1989) se ofrece una metodología general que se puede aplicar en distintas condiciones. Sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en que cada proyecto de rehabilitación debe ser abordado en su contexto particular, sin ideas preconcebidas, para optar por aquellas soluciones que permitan satisfacer todas las condiciones reales del entorno.

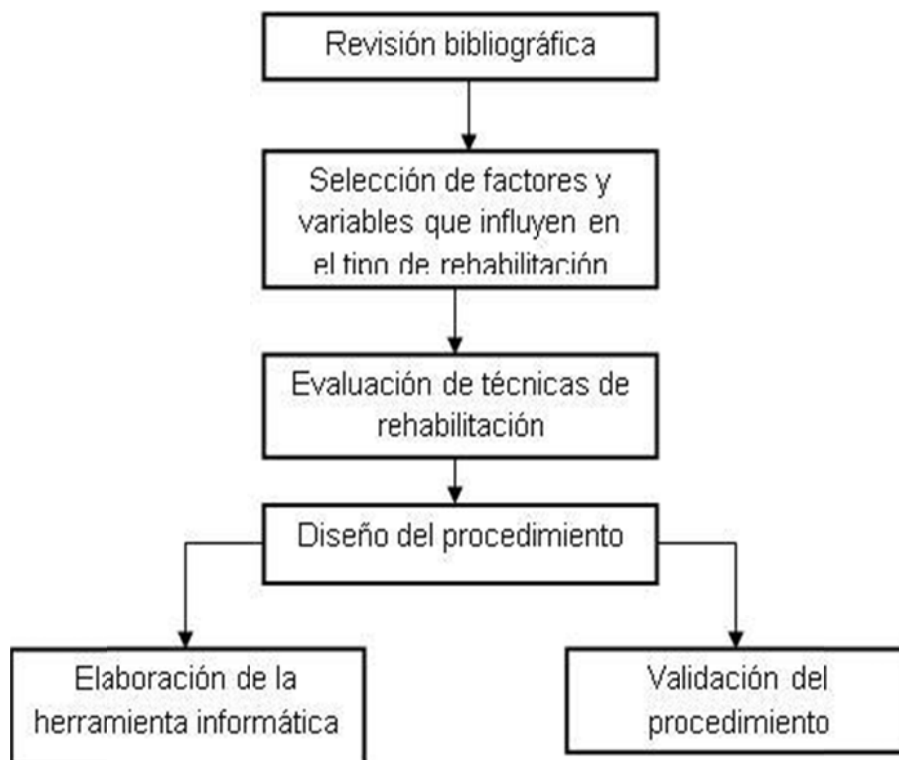
En el contexto de los yacimientos piríticos polimetálicos de Pinar del Río, las metodologías de rehabilitación analizadas no se adecuan completamente, debido a las características especiales del entorno, y a los consecuentes períodos de explotación que han sufrido los mismos.



## 2. MÉTODOS

Se realizó una caracterización minero-ambiental del área y un inventario de las principales fuentes contaminantes generadoras de la degradación. Se evaluó el impacto sufrido por las corrientes de aguas superficiales debido al drenaje ácido de las minas; para ello se tomaron muestras de agua y sedimentos de fondo y se analizaron químicamente en el Laboratorio Central de Minerales *Isaac del Corral*.

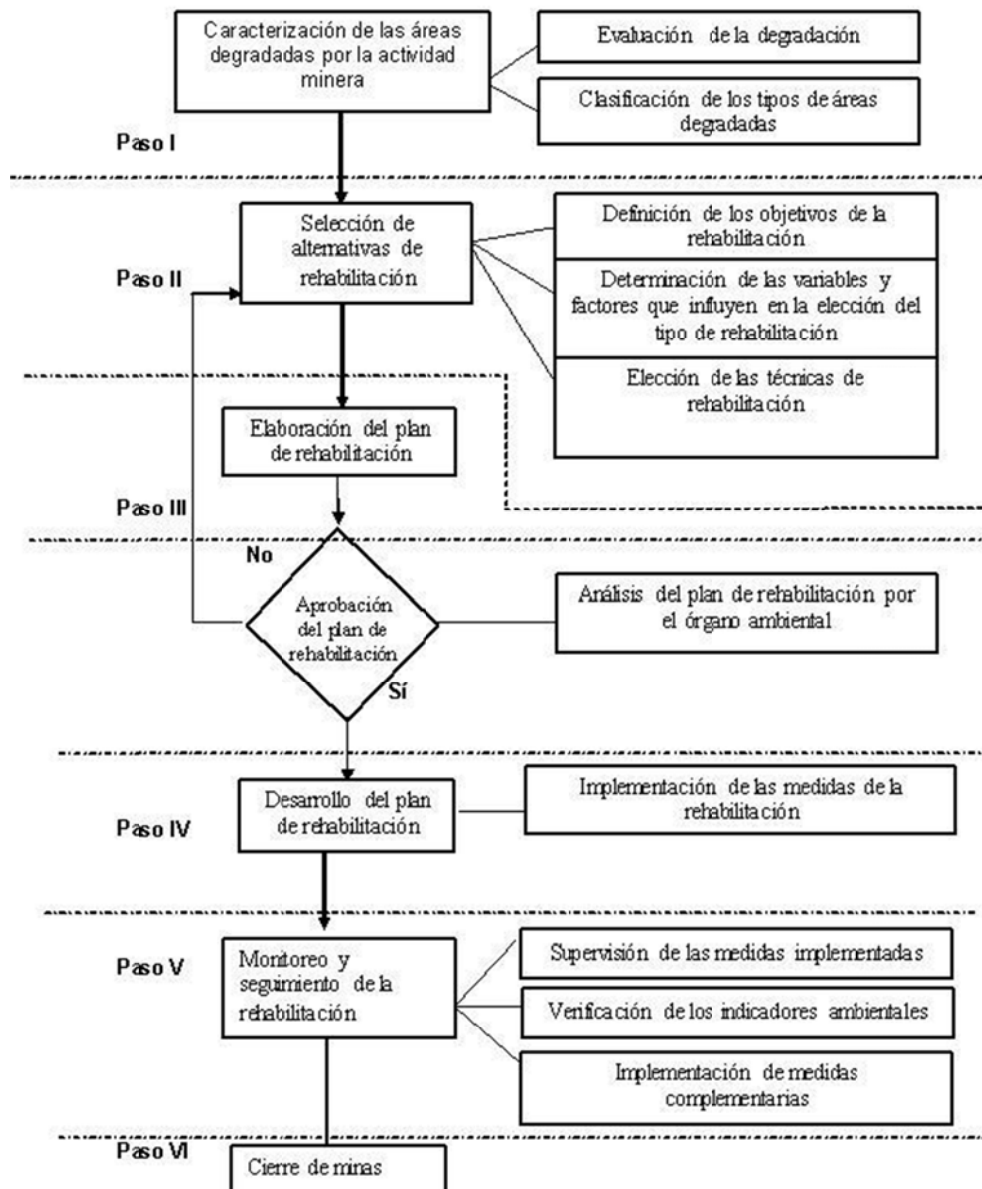
El estudio químico permitió determinar la presencia de metales pesados y la trayectoria y extensión de la contaminación. La Figura 2 expone las etapas de la investigación:



**Figura 2.** Flujograma de la investigación.

## 3. RESULTADOS

El algoritmo del procedimiento elaborado se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Procedimiento para la rehabilitación de las áreas afectadas por la minería

### 3.1. Descripción del algoritmo

*Paso I: Caracterización de las áreas degradadas por la actividad minera*

Se realiza un estudio de la información disponible sobre todos los aspectos que puedan condicionar la rehabilitación, incluyendo la cartografía (topografía, geología, usos del suelo, redes de

comunicación, vegetación, espacios protegidos, etc.) lo que permite la evaluación de la degradación, sobre la base de la información recopilada y la aplicación de métodos estadísticos. Lo anterior permite clasificar por tipos las áreas degradadas.

*Paso II: Selección de alternativas de rehabilitación*

Se realiza la definición de los objetivos de la rehabilitación y se determinan las variables y factores que influyen en la elección del tipo de rehabilitación a través del método Delphi. El criterio de experto permite determinar el peso de cada variable y factor en la elección del uso de rehabilitación.

*Paso III: Elaboración y aprobación del Plan de Rehabilitación*

Se incluyen los objetivos y se establecen los usos futuros de los terrenos recuperados. La autoridad ambiental aprueba el plan o se seleccionan otras alternativas.

*Paso IV: Desarrollo del Plan de Rehabilitación*

En esta etapa se ejecutan todas las medidas para la rehabilitación de las áreas afectadas por la actividad minera, que serán chequeadas por el responsable de este plan.

*Paso V: Monitoreo y seguimiento de la Rehabilitación*

Es la etapa en la que se supervisan las medidas implementadas y se verifica si los indicadores ambientales cumplen con los parámetros permitidos por las normas nacionales; es la etapa en que se ejecutan medidas complementarias en caso de que las soluciones no hayan cumplido las expectativas.

*Paso VI: Cierre total de minas*

El cumplimiento de las etapas anteriores permite la realización de pequeños trabajos de complemento para garantizar la total rehabilitación de las áreas y su entrega a la autoridad ambiental.

### **3.2. Desarrollo de los pasos del procedimiento**

*1. Caracterización de las áreas degradadas por la actividad minera*

Se desarrollan dos tareas importantes relacionadas con la caracterización de las áreas degradadas:

a) *Evaluación preliminar de la degradación.* Se caracterizan e inventarian todos los residuales líquidos y sólidos presentes. A partir del análisis de los resultados de laboratorio del muestreo a los drenajes superficiales y sedimentos de fondos procedentes de las minas, se analiza la extensión e intensidad de la contaminación en las



diferentes zonas afectadas, así como la cantidad de residuales sólidos y líquidos que constituyen un riesgo ambiental. Para realizar la evaluación de las áreas degradadas, se debe realizar el cálculo de los parámetros estadísticos (amplitud, media aritmética, desviación estándar y valores anómalos de primer y segundo orden, para cada especie química analizada en las muestras de aguas superficiales y sedimentos de fondo colectados. La caracterización permite evaluar las áreas en: zona de impactos intensos y zonas de impactos atenuados.

*b) Clasificación de los tipos de áreas degradadas.* Se pueden clasificar atendiendo a las manifestaciones presentes en estos yacimientos en: frentes de canteras, depósitos, escombreras de material estéril, excavaciones mineras existentes, canal de drenaje y caminos mineros.

## *II. Selección de alternativas de rehabilitación*

1. La elección del tipo de rehabilitación y uso final que se dará a una zona explotada es una decisión compleja en la que intervienen gran cantidad de variables como son, fundamentalmente:
2. El tipo de explotación y sus características específicas.
3. El entorno medioambiental y socioeconómico en el que se encuentra la explotación y el inmediatamente próximo. Dentro de estos, pueden distinguirse dos grupos de factores: geoecológicos y socioeconómicos.
4. Los tipos de usos del suelo definidos por las distintas reglamentaciones que confluyen en la ordenación del territorio de la zona, incluyendo los usos anteriores a la explotación.
5. Los intereses de las entidades locales y sus vecinos.
6. La sostenibilidad en el tiempo de la actuación de rehabilitación.
7. Los costos derivados de los aspectos anteriores.

En este paso se definen los objetivos de la rehabilitación y se determinan las variables y factores que influyen en la elección del tipo de rehabilitación, con ayuda del método Delphi. El criterio de experto permitió determinar el peso de cada variable y factor en la elección del tipo de rehabilitación.

### *a) Definición de los objetivos de la rehabilitación.*

El objetivo básico que debe seguir la rehabilitación es emprender acciones que permitan minimizar o eliminar la dinámica de los procesos de degradación, además de darle a las áreas afectadas un tratamiento tal que los terrenos rehabilitados tengan un uso social y

económicamente sostenible, partiendo de un análisis de las potencialidades reales de la zona, y considerarse otros usos, además del forestal, tomando medidas de estabilización físico-química del suelo.

Al planificar los trabajos de la rehabilitación deben definirse los objetivos, listando los mismos por orden de importancia a fin de obtener resultados satisfactorios:

- Objetivos a corto plazo: Control de la erosión, remodelación e impermeabilización de los depósitos de barita, control y tratamiento de las aguas superficiales contaminadas, implantación de la cobertura vegetal, conformación topográfica y mejoramiento de los frentes de canteras y áreas de escombreras, así como la corrección de los niveles de fertilidad.
- Objetivos a mediano plazo: Extinción de los procesos erosivos, aparición de la fauna local y la regeneración de la vegetación.
- Objetivos a largo plazo: Autosustentación de los procesos de rehabilitación, equilibrio entre plantas-suelo y animales.

b) Determinación de los factores que influyen en la elección del tipo de rehabilitación.

Se incluyen los factores geocológicos (clima, geología, litología, fauna, flora, hidrología, paisaje, etc.) y los socio-económicos (demografía, economía e historia). La evaluación de los factores, tanto geológicos como técnicos, económicos y geográficos, es fundamental para decidir el tipo de rehabilitación y uso final del terreno.

- Factor geográfico: Considera la topografía, la localización de carreteras así como las condiciones climáticas que en conjunto son importantes en el diseño y ubicación de caminos y taludes. Esto último determina la magnitud de los posibles impactos sobre la vegetación presente, la geomorfología, la erosión, entre otros.
- Factor demográfico: Considera la distribución de la población, cantidad de habitantes por kilómetros cuadrados, fuentes de empleos, actividades industriales y económicas que se desarrolla, nivel educacional, salud, etc.
- Factor geológico: Proporciona información sobre las estructuras geológicas, la hidrología, la forma, tamaño y profundidad de la

mena, el tipo de mineral así como su distribución. Estos datos apoyan a la ingeniería de minas para determinar el grado de pureza del mineral, el diseño óptimo de la explotación del yacimiento, la forma de la mina (profundidad, ángulos de taludes y límites finales) y la ubicación de los residuos producidos durante el destape.

Además de los factores ambientales y sociales de diseño y planeación, existen otros de carácter económico y de ingeniería que se circunscriben a estos. Los factores del diseño y planeación de minas son interdependientes, es decir, el cambio que se haga en uno afecta a los otros.

c) Determinación de las variables que influyen en la elección del tipo de rehabilitación.

Las variables geoecológicas y socio-económicas que inciden en la elección de tipo de rehabilitación fueron determinadas a partir del criterio de expertos con la aplicación del método Delphi. Este método permitió determinar el número de expertos, en dependencia del error estimado, el nivel de precisión y confianza deseada, además de admitir y elegir los expertos en función de su experiencia y competitividad.

Como resultado de la aplicación del método Delphi se obtuvo un número de 11 expertos; se escogieron 8 nacionales y 3 extranjeros con gran experiencia en el tema de la rehabilitación minera.

Se sometieron a consulta 58 criterios a través de tres rondas de consultas con cada experto. Con las evaluaciones realizadas por cada experto se determinó el grado de concordancia a través del coeficiente Kendall ( $K_{en}$ ) cuyo valor oscila entre 0 y 1; se considera que cuando  $K_{en} > 0,7$  existe elevada concordancia entre los expertos y cuando  $K_{en} < 0,4$  no existe concordancia. Se obtuvo un coeficiente Kendall:  $K_{en} = 0,69$ , confirmando que existe alto grado de concordancia entre los expertos.

La prueba de hipótesis se realizó con el objetivo de conocer la existencia de comunidad de interés entre los expertos.

Hipótesis Nula:  $H_0$ : No existe comunidad de intereses entre los expertos con relación a los criterios.

Hipótesis Alternativa:  $H_1$ : Existe comunidad de intereses entre los expertos con relación a los criterios.

Donde:

$$\chi^2_{\text{Calculada}} = 293,91$$

$$\chi^2_{\text{Tabulada}} = 9,71$$

Puesto que  $\chi^2_{\text{Calculada}} > \chi^2_{\text{tabulada}}$ , entonces hay concordancia entre los expertos, incumpléndose la Hipótesis Nula.

En el procesamiento de los resultados, se empleó la aplicación informática del Método Delphi, Versión 1.0 (Legrá 2012). Se seleccionaron por los expertos 28 variables calificadas como principales (Tabla 1).

**Tabla 1.** Factores y variables principales que inciden en la elección del tipo de rehabilitación

Factores	Variables	Indicadores medidos	Número del indicador
Geoecológicos	Clima	Periodo de lluvias	1
	Topografía	Tipo de relieve	2
		Calidad visual del paisaje	3
	Yacimiento	Tipo de yacimiento	4
		Método de explotación	5
		Cantidad de frentes de trabajo	6
		Ángulo y altura del talud	7
		Propiedades físico-mecánicas de las rocas	8
		Composición química y mineralógica del estéril y mineral	9
		Cantidad de depósitos y escombreras	10
		Cantidad y calidad de los drenajes de minas	11
		Calidad de las aguas	12
		Conductividad eléctrica	13
	pH	14	
Hidrología Subterránea	Tipo de acuíferos	15	
	Calidad del agua	16	
	Cantidad de pozos de agua	17	
Ecosistemas acuáticos	Presencia o no de vida acuática	18	
	Tipos de especies	19	
Ecosistemas terrestres	Cantidad de especies terrestres en riesgos	20	
	Especies de flora	21	
	Especies de fauna	22	
Socioeconómicos	Usos del suelo ( tipo, intensidad y valor del uso)	Didáctico	23
		Patrimonio geólogo-minero	24
	Características de la población	Distribución	25
		Empleos	26
		Nivel escolar	27
Economía	Costo de la rehabilitación	28	

## d) Elección de las técnicas de rehabilitación.

De acuerdo con la bibliografía consultada (Gray y Leiser 1982; Suárez 1998; Zipper & Jage 2001; Younger *et al.* 2002; Castaldi *et al.* 2005; Raicevic *et al.* 2006; Acero *et al.* 2006; Herrera *et al.* 2006; Ortiz *et al.* 2007; Cadorn *et al.* 2007; Moreiras *et al.* 2008) existen numerosas técnicas que son empleadas, de forma general, en la rehabilitación, pero que de forma independiente no son exitosas; incluso de algunas no se conocen totalmente sus daños o beneficios ambientales y desde el punto de vista económico, sus costos son elevados. Para seleccionar las técnicas de rehabilitación ambiental de los yacimientos piríticos polimetálicos se tuvieron en cuenta criterios técnicos, económicos y ambientales (Tabla 2).

**Tabla. 2.** Técnicas de rehabilitación propuestas para los yacimientos piríticos polimetálicos

Técnicas	Campo de acción	Variables minero ambientales	Ventajas	Desventajas
Enmienda orgánica	Suelos con baja fertilidad	Método de explotación Tipo de yacimiento Especies de fauna; Periodo de lluvias Cantidad de depósitos y escombreras Composición química mineralógica del estéril y el mineral Especies de flora Costo de la rehabilitación	Proporciona un cierto nivel de materia orgánica al suelo	Existen dudas sobre si estos mecanismos de rehabilitación son permanentes o reversibles en el tiempo
Neutralización con CaO <sub>(s)</sub>	Neutralización de aguas ácidas	Método de explotación Tipo de yacimiento Cantidad de drenajes de minas. Calidad de las aguas superficiales. pH; conductividad eléctrica Presencia o no de vida acuática. Composición mineralógica del estéril y mineral Calidad de las aguas subterráneas; tipos de acuíferos Cantidad de pozos de aguas Costo de la rehabilitación	Bajo costo de adquisición; Fácil manejo Alto nivel de eficiencia; Facilita la co-precipitación de metales	La reacción suele ser lenta
Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad ( <i>Successive</i> )	Neutralización de aguas ácidas y eliminación de metales	Método de explotación Tipo de yacimiento Cantidad y calidad de los drenajes de minas Calidad de las aguas	El agua a tratar mantiene contacto directo con la capa carbonatada	Necesidad de combinarse con otras técnicas para la eliminación

<i>Alkalinity Producing Systems, SAP)</i>	pesados.	superficiales Tipos de acuíferos Calidad de las aguas subterráneas Cantidad de pozos de agua Presencia o no de vida acuática pH Conductividad eléctrica Composición química mineralógica del estéril y el mineral Costo de la rehabilitación	como con la capa orgánica, permitiendo la eliminación de metales pesados	total de metales pesados
Sistema de tratamiento con Cobertura Seca (Barrera capilar)	Aislamiento del material sulfuroso del oxígeno	Método de explotación Tipo de yacimiento Composición química mineralógica del estéril y el mineral Cantidad de depósitos y escombrera Periodo de lluvias Calidad visual del paisaje Costo de la rehabilitación Tipo de relieve	Interrumpe el transporte de material soluble ya oxidado, evita la generación de aguas ácidas	El volumen del material de suelo a emplear aumenta con la extensión superficial del área a impermeabilizar
Minería de transferencia	Minería a cielo abierto.	Método de explotación Tipo de yacimiento Composición química mineralógica del estéril y el mineral Propiedades físico mecánicas de las rocas Altura y ángulo del talud Cantidad de frentes de canteras Distribución de la población Empleos Uso del suelo didáctico Uso del suelo geólogo minero Costo de la rehabilitación Tipo de relieve	Reducción de la distancia de transportación; Disminución del impacto ambiental. Ejecución de la rehabilitación de los terrenos afectados simultáneamente con la explotación	Limitada profundidad de los yacimientos hasta doscientos metros; Las capas deben ser horizontales o sub-horizontales. Pocas capas potentes, uno o dos niveles
Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial)	Disminuir la infiltración de agua en las áreas arriba del talud.	Método de explotación Tipo de yacimiento Composición química mineralógica del estéril y el mineral Propiedades físico mecánicas de las rocas Altura y ángulo del talud Cantidad de frentes de canteras Calidad del agua superficial Periodo de lluvias Cantidad de frentes de canteras Costo de la rehabilitación	Intercepta y conduce adecuadamente las aguas lluvias, evitando su paso por el talud.	Con el tiempo se producen movimientos en el terreno que causan grietas en el impermeabilizante y por lo tanto infiltraciones que conllevan a una disminución de la resistencia del suelo y por ende a su falla

Canales colectores en espina de pescado	Disminuir la infiltración de agua en las áreas arriba del talud.	Método de explotación Tipo de yacimiento Composición química mineralógica del estéril y el mineral Propiedades físico mecánicas de las rocas Altura y ángulo del talud Cantidad de frentes de cantera Calidad visual Costo de la rehabilitación	Disminuye la infiltración de agua en las áreas arriba del talud	El material impermeabilizante debe ser revisado periódicamente para evitar infiltraciones.
Tanques Reactivos ( <i>Limestone Diversion Wells</i> )	Neutralización de aguas ácidas y eliminación de metales pesados	Método de explotación Tipo de yacimiento Composición química mineralógica del estéril y el mineral Cantidad y calidad de los drenajes de minas Calidad de las aguas superficiales Tipos de acuíferos Calidad de las aguas subterráneas Cantidad de pozos de agua Presencia o no de vida acuática Tipos de especies pH Conductividad eléctrica Costo de la rehabilitación	El agua contaminada crea una turbulencia que favorece su contacto y reacción con los granos de carbonato produce una neutralización del agua, lo que favorece la precipitación de metales.	El relleno ha de ser remplazado periódicamente para asegurar un tratamiento efectivo.
Tecnologías de bioingeniería (Estacas vivas y fajinas vivas)	Estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación	Método de explotación Tipo de yacimientos Calidad visual del paisaje Especies de flora Especie terrestres en peligro de riesgos Periodo de lluvias Ángulo y altura del talud Propiedades físico mecánicas de las rocas Empleos Tipo de relieve Costo de la rehabilitación	Protección integral contra la erosión Procedimiento simple, rápido y económico	Influencia directa del tipo de clima predominante

### III. Elaboración y aprobación del plan de rehabilitación

En la elaboración de este plan se incluyen los objetivos y el establecimiento de los usos futuros de los terrenos rehabilitados. Deben estar recogidos los siguientes aspectos: estudio del medio físico, caracterización del sitio, localización geográfica, uso y ocupación del suelo, legislación vigente, geología local, hidrogeología, clima,

estado actual de los laboreos mineros, tipo de vegetación a implantar, características generales del área, medidas para restablecer el escurrimiento pluvial perturbado, inclinación y tipo de cobertura de los taludes, diseño y configuración final del área, cronograma de ejecución de los trabajos y costos de la rehabilitación, equipamiento a utilizar en la rehabilitación, responsable de los tareas de rehabilitación; la definición del medio socioeconómico, que incluya la situación geográfica, relación de usos y aprovechamientos preexistentes, propiedades, obras de infraestructura, espacios de interés arqueológico e histórico, espacios de interés paleontológico y ecológico, demografía, empleos generados por la actividad minera, instalaciones y regímenes jurídicos especiales, en su caso, aplicables a la zona, así como la descripción resumida de las características del aprovechamiento minero previsto, y de sus servicios e instalaciones; la aceptación del sistema de rehabilitación elegido.

El Plan de Rehabilitación se entrega a la autoridad ambiental para su aprobación, en caso de que este no sea aprobado, se retrocede a la segunda etapa para seleccionar nuevas alternativas. Una vez aprobado el plan por la autoridad ambiental competente y concedida la Licencia ambiental, se procede a la próxima etapa.

Este plan va acompañado del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, realizado en las áreas afectadas por la actividad minera.

#### *IV. Desarrollo del plan de rehabilitación*

Una vez aprobado el plan por la autoridad competente y otorgada la licencia ambiental se pasa a la ejecución del mismo, según el cronograma establecido en el mismo.

##### *a) Implementación de las medidas de rehabilitación*

Muchas de las medidas descritas en los proyectos de rehabilitación están basadas en métodos convencionales, no se tiene en cuenta la innovación o avances científicos, tampoco existe una adecuación con base en la normalización técnica, sea nacional como internacional, a la serie de norma de calidad ambiental ISO 14 000. En este plan de rehabilitación se implementarán todas las medidas que solucionen la degradación de las áreas afectadas por la actividad minera, de acuerdo a las normas establecidas, a saber:

- Implementación de barreras vegetales.
- Remodelación topográfica.



- Mejoramiento de los taludes y revegetación de las áreas afectadas por la actividad minera.
- Revegetación de depósitos y escombreras y reperfilado de taludes.
- Traslado y utilización de capas orgánicas en los suelos.
- Traslado de capa arcillosa de suelos en la impermeabilización del material pirítico.
- Instalación de sistemas de drenajes en las escombreras y depósitos así como disipadores de energía.
- Construcción de embalse de sedimentación.

#### *V. Monitoreo y seguimiento de la rehabilitación*

Debe realizarse el monitoreo de la calidad ambiental de la rehabilitación y dar seguimiento a la efectividad de esta última realizando estudios de supervivencia de flora y fauna, así como la toma de muestras de las aguas expuestas a tratamiento para conocer si cumplen con los parámetros ambientales de vertimiento establecidos. A partir de los resultados obtenidos se verificarán el comportamiento de los indicadores ambientales. Se chequearán los parámetros pH, conductividad eléctrica, metales pesados disueltos y presencia de vida acuática en los efluentes rehabilitados; respecto al suelo se analizará la supervivencia de las especies plantadas, cantidad y calidad de vida; del relieve se analizará su integración al paisaje luego de la aplicación de las medidas rehabilitadoras.

De ser necesario, se implementarán medidas complementarias cuando alguna de las propuestas en el plan de rehabilitación no responda a los resultados esperados.

#### *VI. Cierre de minas*

La realización de las etapas anteriores permitirá la realización de pequeños trabajos complementarios para garantizar la total rehabilitación de las áreas y la entrega a la autoridad ambiental.

### **3.3. Herramienta informática**

Debido a la necesidad de capacitar a los responsables de la rehabilitación se elaboró una página web que explica el procedimiento, las variables que influyen en la elección del tipo de rehabilitación y las técnicas que pueden ser usadas en la rehabilitación de los yacimientos piríticos y polimetálicos cubanos (Figura 4).



Figura 4. Ventana principal de la página web.

### 3.4. Validación del procedimiento elaborado

Para la validación del procedimiento se aplicó el método Delphi y se consultaron los mismos expertos que para la selección de los factores y variables. Se empleó para el procesamiento de los datos la aplicación informática del Método Delphi, Versión 1.0 (Legrá 2012). Se sometieron a consulta siete aspectos básicos para validar el procedimiento a través de tres rondas de consultas con cada experto (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la validación del procedimiento por expertos

Aspectos básicos consultados	Evaluación
1. El procedimiento está científicamente sustentado	E
2. Adecuado para la rehabilitación minero ambiental de los yacimientos piriticos polimetálicos.	MB
3. Sencillo y comprensible	E
4. Flexible y dinámico	MB
5. Reproducible	MB
6. Congruente con las normativas ambientales	MB
7. Nivel de aprobación del procedimiento objeto de análisis	E

Con las evaluaciones realizadas por cada experto se determinó el grado de concordancia a través del coeficiente Kendall:  $Ken = 0,70$ , confirmando que existe alto grado de concordancia entre los expertos.

La prueba de hipótesis se realizó con el objetivo de conocer la existencia de comunidad de interés entre los expertos.

Hipótesis Nula:  $H_0$ : No hay comunidad de intereses entre los expertos con relación a los criterios.

Hipótesis Alternativa:  $H_1$ : Los expertos están de acuerdo con los criterios, o sea, hay comunidad de intereses.

Donde:

$\chi^2$ Calculada = 46,23

$\chi^2$ tabulada = 12,59

Puesto que  $\chi^2$  Calculada >  $\chi^2$  Tabulada entonces hay concordancia entre los expertos, por lo que no se cumple la Hipótesis Nula.

#### 4. CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió elaborar un procedimiento basado en el análisis de 28 indicadores de las variables ambientales, seleccionados por los expertos y que determinan la elección del tipo de rehabilitación aplicable en áreas degradadas por la actividad minera en yacimientos piriticos polimetálicos explotados a cielo abierto.

Se creó una herramienta informática para ayudar a la toma de decisiones de los responsables de la rehabilitación minero-ambiental de yacimientos piriticos polimetálicos explotados a cielo abierto.

#### 5. REFERENCIAS

- ACERO, P. & RODRÍGUEZ, R. 2006: *Los residuos mineros metalúrgicos en el medio ambiente*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, p. 357-363.
- ALONSO, J. A.; CABRERA, I.; PINTO, A.; COZZI, G.; DELGADO, B.; GALLARDO, D.; VALDIVIA, G.; CASANOVA, A.; DÍAZ, A.; DÍAZ, N.; ÁGUILA, A.; CANEL, L.; TRUEBA, R. & RODRÍGUEZ, J. C. 2011: Principales asociaciones mineralógicas de elementos potencialmente tóxicos y geodisponibles en el pasivo minero Santa Lucía. En: IV Congreso cubano de minería "Minería 2011". Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales [Memorias en CD-ROM]
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS DE FABRICANTES DE ÁRIDOS (ANEFA) 2006: Manual de restauración de minas a cielo abierto del Gobierno de Rioja, España.
- CADORIN, L.; CARISSIMI, E. & RUBIO, J. 2007: Avances en el tratamiento de las aguas ácidas de minas. *Revista Scientia et Technica* XIII (36), septiembre.
- CAÑETE, C.; KREBS, A.; MARMOS, J.; PONCE, N.; MILIÁN, E. & BARRIOS, E. 2009. Principales resultados del Proyecto de Colaboración Cuba-Brasil. "Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de Santa Lucía en el occidente de Cuba. En: VIII Congreso Cubano de Geología. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009.
- CAÑETE, C.; KREBS, A.; MARMOS, J.; PONCE, N.; MILIÁN, E. & BARRIOS, E. 2011: Riesgos ambientales provocados por el pasivo ambiental minero Santa Lucía, Pinar del Río. En: IV Congreso Cubano de Minería. Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011. CD ROM.

- CASTALDI, P.; SANTONA, L. & MELIS, P. 2005. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth. *Chemosphere* 60(3): 365-371.
- CUBA. Ley 76 de Minas: Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición ordinaria, La Habana, 23 de enero de 1995, Año XCIII Número 3, p. 33.
- DELGADO, B.; LUBIAN, M.; CORTÉS, N. & MILIÁN, E. 2011. Metodología para inventariar pasivos mineros ambientales zona Santa Lucía. En: IV Congreso Cubano de Minería GEOCIENCIAS 2011, Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales.
- GRAY, D. H. & LEISER, A. T. 1982: *Biotechnical slope protection and erosional control*. Van Nostrand Reinhold, New York, 271 p.
- HERRERA, J. & PLA, F. 2006. Métodos de minería a cielo abierto. Capítulo 5. Pág 73–74. Universidad Politécnica de Madrid.
- JIMÉNEZ, C.; HUANTE, P. & RINCÓN, E. 2006. Restauración de minas superficiales en México. Instituto de Ecología UNAM. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales: Octubre 2006.
- LEGRÁ, A. 2012. Aplicación informática del Método Delphi, Versión 1.0. Moa, Cuba. Octubre 2012.
- MILIÁN, E. 2006: *Metodología de evaluación de impacto ambiental en yacimientos piríticos polimetálicos de Pinar del Río*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 100 p.
- MILIÁN, E.; ULLOA, M.; KREBS, A. & OTAÑO, J. 2011: Procedimiento para la rehabilitación de los yacimientos piríticos polimetálicos de Pinar del Río. En: Convención Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo. Palacio de Convenciones, La Habana, 4-6 julio de 2011. [Memorias en CD-ROM].
- MOREIRAS, P.; COSTA, M. & VALENTE, M., 2008: Carvão Brasileiro. Tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro, p. 199-207, CETEM/MCT.
- ORTIZ, I.; SANZ, J.; DORADO, M. & VILLAR, S. 2007: Técnicas de Recuperación de Suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica. Círculo de innovación en tecnologías medioambientales y energía. Universidad de Alcalá, p. 37. Consulta: 5 julio 2011. Disponible en: <http://www.madridmasd.org>.
- RAICEVIC, S.; WRIGHT, J. V.; VELJKOVIC, V. & CONCA, J. L. 2006: Theoretical stability assessment of uranium phosphates and apatites: Selection of amendments for in situ remediation of uranium. *The Science of The Total Environment* 355(1-3): 13-24.
- SÁNCHEZ, S. 2009: La rehabilitación de las minas en la regulación ambiental. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009.
- SUÁREZ, J. 1998: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Universidad Industrial de Santander. p. 548.
- URBINO, J. & DÍAZ, B. 2011: Rehabilitación ambiental minera, una opción holística. En: IV Congreso Cubano de Minería. Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011.
- YAZBEK, O. 1997: *Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na Região Metropolitana de São Paulo*. Tese (Doutoramento). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 185 p.

YOUNGER, P.; BANWART, S. & HEDIN, R. 2002: Mine water. Hydrology, Pollution, Remediation Series: Environmental Pollution, 5. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 464 p.

ZIPPER, C. & JAPE, C. 2001: Passive Treatment of Acid- Mine Drainage with Vertical- Flow Systems En: Reclamation Guidelines For Surface Mined Land Southwest Virginia. Virginia Co. p 133-460.

**Estrella Milián-Milián**

Máster en Minería. Empresa Geominera de Pinar del Río.  
Minas de Matahambre, Pinar del Río, Cuba.

[estrella@geopinar.gms.minbas](mailto:estrella@geopinar.gms.minbas)

**Mayda Ulloa-Carcassés**

Profesora Titular. Doctora en Ciencias Económicas.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

[mulloac@ismm.edu.cu](mailto:mulloac@ismm.edu.cu)

**Antonio S. Jornada-Krebs**

Doctor en Geografía. Servicio Geológico de Brasil.  
Rio de Janeiro, Brasil.

[krebs@pa.cprm.gov.br](mailto:krebs@pa.cprm.gov.br)

**Yiezenia Rosario-Ferrer**

Profesora Auxiliar. Doctora en Ciencias Informáticas.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

[yiezenia@ismm.edu.cu](mailto:yiezenia@ismm.edu.cu)