

**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**



**MÉTODOS DE RESTAURACIÓN EN SUELOS ANDINOS DETERIORADOS
POR MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO APLICABLES EN EL
MUNICIPIO DE AMAGÁ (ANTIOQUIA-COLOMBIA).**

Diana Carolina Gil Mateus

Monografía

Profesor Asesor
Diego Armando Rincón Caballero

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
POSGRADO: PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE
RECURSOS NATURALES
BOGOTÁ
2017**

MÉTODOS DE RESTAURACIÓN EN SUELOS ANDINOS DETERIORADOS POR MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO APLICABLES EN EL MUNICIPIO DE AMAGÁ (ANTIOQUIA-COLOMBIA).

METHODS OF RESTORATION IN ANDEAN DETERIORATED SOILS BY OPEN-PIT COAL MINING APPLICABLE IN AMAGÁ (ANTIOQUIA-COLOMBIA).

Diana Carolina Gil Mateus
Bióloga
Facultad de Ingeniería Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia
dcgilm@unal.edu.co

RESUMEN

El artículo describe algunos de los métodos utilizados en la actualidad para restauración de suelos afectados por minería de carbón a cielo abierto, a partir de revisión de artículos publicados en revistas indexadas en Access DL, CrossRef, DOAJ, Open Access, Scielo, entre otras, en el periodo comprendido entre 2007 y 2017. Se construye una base de datos a partir del año en que fue publicado el artículo, el nombre de la revista, el país y el enfoque del método de restauración. Se evidencia un amplio conjunto de métodos aplicados en restauración de suelos aunque pocos abordan temáticas que involucren todos los componentes del suelo. Se plantean algunas propuestas de métodos que podrían ser aplicados en el municipio de Amagá y la importancia de formular nuevas alternativas desde la planeación pre-minería.

Palabras clave: Métodos de restauración, Minería del carbón, Minería a cielo abierto, Restauración del suelo.

ABSTRACT

Document describes some of the methods currently used for restoration of open coal mining soils, based on review of documents published in journals indexed in Access DL, CrossRef, DOAJ, Open Access, Scielo and others, between 2007 and 2017. A database is constructed from the year of publication, name of journal, country and the approach to the method of restoration. A set of methods applied in soil restoration is evidenced, although few involve all soil components. Some proposals

of methods that could be applied in Amagá and the importance of formulating new alternatives from the pre-mining planning are proposed.

Keywords: Restoration Methods, Coal Mining, Open pit Mining, Soil Restoration

INTRODUCCIÓN

Los suelos son componentes fundamentales del ambiente al proveer una amplia gama de servicios ecosistémicos que constituyen la base de subsistencia de la vida en la tierra; desempeñan roles indispensables en la estructura y el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos al distribuir, transportar, almacenar y transformar materiales y energía, al tiempo de tener un rol preponderante en el ciclo hídrico y la circulación de aire y nutrientes que son utilizados por todas las formas de vida existentes; se forman a partir de una compleja red de interacciones y procesos entre componentes como minerales, agua, materia orgánica, macro y microorganismos y a partir de estos procesos se determinan los órdenes de suelo que existen. Colombia presenta la mayoría de órdenes de suelo existentes de los cuales, los Andisoles representan el 7.5% del territorio nacional (8.5 millones de hectáreas) destacándose por ser los mejores suelos agrícolas [1].

Por otra parte, la minería de carbón es una de las actividades económicas más destacadas en Colombia, siendo el carbón uno de los cuatro minerales más explotados especialmente en aquellas zonas de heterogeneidad topográfica y morfológica que coincide con zonas de vocación agrícola de suelos fértiles (Andisoles). Lo anterior lleva a competir a la minería con la agricultura repercutiendo en la seguridad alimentaria al tiempo que involucra regiones naturales al ser estas concesionadas para la extracción de minerales [2].

La minería causa cambios drásticos en la estructura del suelo, produce compactación por uso de maquinaria, erosión acentuada por factores asociados con el clima generalmente viento y precipitación, degradación del paisaje, pérdida de cobertura vegetal, aumento de niveles de ruido y material particulado, sedimentación, hundimientos e inestabilidad del terreno por explosiones, contaminación hídrica y modificación de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas [3]. Por tanto, es conveniente establecer la forma en la cual pueden reducirse sus impactos asociados facilitando en el largo plazo su renovabilidad dadas las condiciones ambientales y la disponibilidad de materiales [2].

La Política Nacional de Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS), está dirigida a evitar que actividades mineras a cielo abierto y sus impactos afectan el potencial de producción agropecuaria de la cual depende el bienestar de la población; además busca disminuir la contaminación del suelo, aire y recurso hídrico o generar espacios que provean nuevos servicios ecosistémicos [1]. Para esto facilita la planificación del recurso garantizando las herramientas de seguimiento que permitan controlar factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados [4]. Una de las formas de planificar el

recurso es acotando jurídicamente los procesos de cierre minero considerándolos en la fase de exploración y explotación minera [5].

Los procesos de cierre minero deben contemplar tres aspectos fundamentales: restauración, rehabilitación y recuperación a mediano y largo plazo, como estrategias articuladas al conocimiento científico para gestionar los ecosistemas, ante las necesidades de restablecer los ambientes degradados y prevenir futuros daños [3]. Por lo anterior, el establecimiento de los planes de restauración se ha convertido en el eje central de planes de manejo ambiental, forestal, compensación y una estrategia para contrarrestar la pobreza de acuerdo con la Evaluación de Ecosistemas del Milenio – MEA [6].

Ante la afectación directa de suelos por minería de carbón a cielo abierto en el municipio de Amagá (Antioquia) y la importancia de estos en la subsistencia de la población, el presente documento pretende realizar una revisión documental sobre métodos de restauración de suelos degradados por minería de carbón, susceptibles de ser usadas en suelos del municipio de Amagá (Antioquia-Colombia) afectados por esta actividad, con el fin de retornar alguna funcionalidad en estos ecosistemas.

CONTEXTO ACTUAL

Amagá es un municipio localizado al sur del departamento de Antioquia con altitud entre 1.000 a 2.000 m.s.n.m con área de 84 km²; se encuentra en su mayor parte distribuido sobre la cordillera Central y Occidental en una topografía abrupta por la presencia del río Cauca que lo recorre de sur a norte; adicionalmente los movimientos de masa de aire que provienen de las cuencas hidrográficas del Pacífico permiten la formación de zonas muy secas hasta zonas muy húmedas y lluviosas en rangos de temperatura que van de los 21 °C a los 25 °C [7].

Dado que se encuentra en una zona alta en la cual se deposita materia orgánica sobre ceniza de erupciones volcánicas, se forman suelos fértiles denominados andisoles [8]. Lo anterior favorece la biodiversidad que repercute en la oferta de servicios ambientales y por ende aumenta la funcionalidad del ecosistema [9]. La complejidad entre las interacciones de sus componentes aumenta la vulnerabilidad ante posibles perturbaciones de tipo antrópico o natural [8].

Antioquia, es uno de los departamentos con mayor producción de carbón después de Cundinamarca y Boyacá, ocupando el mismo lugar de la Guajira; este departamento se divide en 33 subzonas entre las que sobresalen Amagá-Sopetrán (centro-sur del departamento) y dentro de ella el sector Amagá-Venecia-La Albania pues en esta zona se han calculado 90 millones de toneladas de reservas carboníferas y actualmente se desarrolla allí minería en todas las escalas [10] con treinta y siete títulos otorgados al año 2010 de acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía [11].

Amagá presenta conflictos en el uso del suelo ya que zonas forestales protectoras según el POMCA, son destinadas en el EOT a la explotación minera, agropecuaria, agroforestal, silviagrícola, de expansión urbana y parcelaciones, siendo la minería uno de los principales renglones económicos del municipio [12]. Aunque se prohíbe

el uso del suelo para otra actividad diferente, queda abierta la posibilidad de ejercer minería en cualquier zona si ha de comprobarse allí la existencia yacimientos mineralógicos [13]. Conforme la Ley 1382 de 2010, la minería no debe realizarse en zonas excluibles [14] que son delimitadas geográficamente por la autoridad ambiental, basada en estudios técnicos, sociales y ambientales [4].

Particularmente las modalidades de minería a cielo abierto y subterránea son desarrolladas en el municipio [2] y a gran escala, incrementa las tasas de erosión por ríos y quebradas [15], alcanzando en algunos casos extremos, 2 cm/año en zonas de erosión intensa como el Piedemonte Llanero Colombiano [16].

La Minería a cielo abierto se ejecuta sobre la superficie de la tierra, haciéndose de forma progresiva por capas o terrazas en terrenos delimitados, dada la poca profundidad en la que se encuentran los minerales [17]. Por tanto, las capas del suelo son totalmente removidas junto con el material parental sobre el cual estas se forman, contribuyendo con el deterioro de comunidades de fauna y flora presentes allí. Adicionalmente, algunos elementos tóxicos son incorporados y la lixiviación producida por fragmentación de rocas que liberan especies químicas y que permanecen en zonas con aguas estancadas dificultando la recuperación natural [8].

Dado que cada subsector de la minería genera sus propios impactos, las empresas que desarrollan distintos proyectos mineros requieren medidas diferenciadas de prevención, mitigación, compensación y restauración que dependen en primer lugar del tipo de minería realizada, el material extraído y el ecosistema en el que se desarrolla el proyecto [2]. Por tanto y conforme el código de minas (Ley 685 de 2001) en su artículo 27 relacionado con la Responsabilidad social empresarial [5]:

“...Las empresas mineras promoverán y efectuarán actividades de responsabilidad social, en un marco de desarrollo humano sostenible, que propenda por la promoción de comportamientos voluntarios, socialmente responsables, a partir del diseño, desarrollo y ejecución de políticas, planes, programas y proyectos que permitan el logro de objetivos sociales de mejoramiento en la calidad de vida de la población y la prevención y reparación de los daños ambientales en las regiones, subregiones y zonas de su influencia.”

Según lo establece el Plan Nacional de Restauración (MAVDT, 2010a), una de las principales causas de transformación y degradación de los ecosistemas naturales de Colombia ha sido, entre otras, la minería a cielo abierto. Los procesos de restauración ecológica, contribuyen con la recuperación de la estructura, el retorno funcional y autosuficiencia, en algunos casos a niveles semejantes a los que mostraban originalmente los ecosistemas degradados [4].

En otros países, la minería está obligada a integrar en su cuenta de resultados los costes ambientales de la explotación [18]. En Colombia, la legislación relacionada con el cierre minero fue poco rigurosa en el pasado, por lo que se adquirieron pasivos ambientales y sociales por minería (PASM) que ahora son asumidos por la nación [19].

Actualmente, conforme los términos de referencia para los programas de trabajo y obras se establecen de manera explícita para la minería a cielo abierto lo siguiente:

“...Para la minería a cielo abierto, se buscará que el área explotada se recupere con miras a darle otro uso potencial a la zona, acorde con el medio ambiente circundante y los planes de ordenamiento territorial municipal, los cuales pueden ser, de tipo urbanístico o industrial, de recreación pasiva o intensiva, agrícola o forestal, conservación de la naturaleza, depósito de agua, vertedero de estéril y basuras, etc”.

Sin embargo, existen muy pocos casos exitosos de cierres mineros en el país y entre las excepciones se encuentran la mina de sal de Zipaquirá y dos canteras distritales en Bogotá, gestionadas con dineros estatales [19].

A saber, de acuerdo con la Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo existen tres formas específicas de proceder ante áreas degradadas: la Restauración ecológica (RE), Rehabilitación (REH) y Recuperación o Reclamación (REC)¹, que dependen del tipo de intervención, del nivel de degradación del área y del objetivo de restauración [3].

La Rehabilitación busca reparar productividad y servicios de un sistema en relación con los atributos funcionales o estructurales mientras que la Recuperación retorna utilidad del ecosistema para la prestación de servicios ambientales diferentes a los brindados antes de la afectación e integrados a la lógica paisajística y a su entorno. La restauración busca acelerar los procesos de restablecimiento de un área degradada en función de su estructura, composición y función [20].

La restauración se ha fortalecido desde los 90 mediante instrumentos normativos [21] y se ha redireccionado al mayor número de escenarios posibles de forma adaptativa bajo la premisa: “A disturbio más fuerte, mayor esfuerzo aplicado en restauración” [3], por lo que se hace necesario evaluar el potencial de restauración para una meta dada [22].

Las etapas de un Proyecto de Restauración se establecen dentro del marco de la Política Nacional de Gestión Integral de la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos y abarcan pasos como Planeación del proyecto, ejecución, mantenimiento, monitoreo y divulgación de modelos regionales este último articulado a las CAR, ONG y comunidades. La financiación de este tipo de proyectos está establecida en el manual de compensaciones y por el pago de Servicios Ambientales.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El tipo de metodología empleado para la elaboración del documento fue cualitativo. La ubicación de los documentos de investigación se hizo mediante consulta en motores de búsqueda académicos y redes de revistas electrónicas de acceso abierto como Access DL, CrossRef, DOAJ, Open Access, Scielo, entre otras.

El criterio de búsqueda de documentos se basó en palabras clave como metodologías, restauración, suelos, minería y carbón sin restricciones en el país de origen de los documentos. Para la selección de los documentos más pertinentes conforme con el objeto de estudio se consideraron temáticas como restauración de

¹ En la Política Nacional de Restauración se establecen categorías de manejo por departamento para lo cual Antioquia cuenta con 988.325.63 áreas destinadas a Recuperación, 896.990.59 destinadas a Rehabilitación y 602.199.76 para Restauración. Por lo cual es el departamento con el mayor número de áreas a ser manejadas en el territorio (11% del total de Hectáreas).

suelos, Minería a cielo abierto, Metodologías de Restauración de suelos y minería de carbón.

La base de datos formada por sesenta y ocho documentos, se clasificó de acuerdo con el alcance del tema de estudio; veinticuatro fueron citados en la definición del contexto del documento y el contenido de los cuarenta y cuatro documentos restantes era pertinente en la identificación específica de métodos usados para restauración en suelos. Este último grupo está conformado por dos tesis, dos publicaciones web, seis libros y treinta y cuatro artículos de revistas especializadas que comprenden en su mayoría publicaciones entre los años 2014 a 2017. La revista especializada que suministra más información del tema es International Journal of Environmental Quality y otras encaminadas en la línea de ciencias del suelo entre un conjunto bastante variable de revistas seleccionadas, que en su mayoría pertenecen a Estados Unidos, Colombia, Brasil y China en orden descendente según su frecuencia de aparición.

Los documentos relacionados con métodos de restauración de suelos abarcan en este contexto enfoques en los que priman instrumentos económicos y legales, biorremediación, minería de transferencia, adición de enmiendas orgánicas y macrofauna, reforestación, usos alternativos de minas posterior al cierre y planes integrales de restauración.



Fig. 1. Temas de estudio en métodos de restauración de suelos.

Fuente: El autor (2017).

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En lo que respecta a métodos que se emplean en restauración, los estudios sobre biorremediación con el fin de retener sustancias contaminantes del suelo son frecuentes [23-24-25-26-27-28-29]; otros estudios se enfocan en macrofauna del suelo para favorecer su estructura [30-31-32], en factores que estimulan la sucesión ecológica [33-34-35-36], en minería por transferencia para aprovechamiento de residuos de minería [37-38-39], Reforestación [40-41-42-43-44], instrumentos legales y jurídicos [45-46-47-48], incluso se proponen usos alternativos con nuevas

modalidades de servicios ambientales [49-50-51]. Otros establecen planes integrales de restauración que amplían el número de factores participantes en estos modelos incluyendo componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos aumentando la viabilidad de procesos de restauración en entornos complejos [52-53-54-39-55].

Los instrumentos económicos ligados al cumplimiento de leyes y requisitos ambientales condicionan las decisiones tomadas por empresarios y por ende pueden favorecer a modo general el desarrollo sostenible cuando regulan la planeación anticipada a la ejecución de actividades extractivas. Otra vía que puede emplearse son leyes y políticas apropiadas para optimizar la utilización del carbón y el compromiso de aplicación de normas de gestión ambiental en torno a actividades mineras [48]; como apoyo a esta idea se contempla el aumento en el pago de tasas por la explotación de recursos mineros como respuesta al aumento de su oferta [56]. De la misma manera la constitución de fondos de seguro para restauración ambiental puede actuar como garantía en un cierre minero [33].

Por otra parte, la propuesta de planeación científica de la minería desarrollada en países como Rajasthan, promueve el aprovechamiento de los residuos y la optimización de prácticas del suelo que reducen costos de la restauración [46].

En Colombia se contempla la creación de “fondos verdes” del sector minero que incluyen fondos de capital de riesgo para desarrollar actividades de compensación y mitigación de pasivos provocados por la actividad, como parte fundamental de la planificación y ejecución del negocio minero de la mano con la formulación e implementación de prácticas mineras voluntarias que comprometa a las empresas más allá de los mínimos exigidos por la ley [16]. Al adaptar la ley a las condiciones de una mina dado que estas son particulares, se propone un marco realista que permita una aplicación voluntaria de la ley por los empresarios [57].

Se encontraron métodos focalizados en un solo componente del suelo dentro del gran conjunto de sus componentes; entre estos, estrategias de biorremediación que involucran microorganismos. Se hallan propuestas enfocadas en realizar la caracterización de comunidades de bacterias y arqueas que se forman en ambientes impactados por efecto de la minería, pues permiten obtener información sobre los impactos causados en el entorno por su resistencia y aumento de diversidad en estas condiciones [43].

Ejemplo de lo anterior, es el uso de bioindicadores en lagunas de lixiviados mineros que facilita la comprensión de los impactos causados al suelo en relación con cambios de pH y la alcalinidad. En Canadá, el análisis de comunidades de algas como bioindicadores, al correlacionarse estas con el pH y materia orgánica presente en suelos con lixiviados, permite identificar los impactos por minería en los niveles tróficos de estos organismos y proponer iniciativas de remediación y monitoreo [58].

Por otra parte, consorcios bacterianos acidófilos que catalizan reacciones de oxidación de sulfuros metálicos insolubles presentes en lixiviados producto de la extracción del carbón dadas unas condiciones específicas de pH, OD y temperatura, es una alternativa biológica, simple y de baja contaminación en procesos de desulfurización del carbón [28]. Por la misma línea, se encuentra que

los altos niveles de conductividad del agua producto de explotación minera, pueden manejarse mediante sistemas de tratamiento biológico pasivo (PBT) de compuestos como SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , que reducen los costos del proceso y logran disminuciones de conductividad del 30% al 40% [59].

Otra estrategia planteada para el control de la acidificación y neutralización del agua es el método ABA (ácido-base), que permite predecir la calidad de agua luego de la extracción a partir de la comparación de la cantidad de roca productora de ácido con la roca neutralizadora presente en el área [60].

También existen alternativas de fitorremediación enfocadas en especies vegetales nativas originadas en escombreras, que de forma natural se adaptan a la contaminación, por tanto son tolerantes y bioacumulan elementos como Zn y Pb actuando como filtros biológicos o trampas de contaminantes, lo que facilita su manejo y estudio [23]. En estas, el potencial de incorporación en tejidos de contaminantes y su posterior degradación puede ser variable en función de la especie [27].

La fitorremediación es una estrategia bastante empleada en Antioquia ya que se ha evidenciado que algunas especies vegetales, estabilizan sustancias contaminantes en suelo o agua. El dilema del uso de este método radica en la disposición de los elementos bioacumulados, separación de contaminantes de la biomasa y su disposición final lo que incrementa los costos del proceso [16].

Dados los umbrales necesarios y suficientes para recuperación ecológica deben considerarse los limitantes internos (tolerancia fisiológica) y externos (dispersión de otros colonizadores) de los organismos en procesos de biorremediación [29].

Luego de que se disminuye la concentración de elementos contaminantes del suelo por biorremediación, puede considerarse la aplicación de métodos como el de minería por transferencia, basado en el uso de las capas de suelo retirado durante la excavación. Los suelos nativos y otros estratos más profundos retirados durante la remoción para excavación minera, poseen capacidad significativa para apoyar procesos de revegetalización, debido a que contienen los materiales requeridos² para el desarrollo de vegetación nativa y por tanto resulta ser una práctica bastante viable para el desarrollo de poblaciones forestales en el largo plazo [38].

En Brasil, la explotación de un yacimiento carbonífero por etapas en las que se subdivide el suelo, facilita el vertido del material estéril en vertederos internos de la cantera, lo que reduce el riesgo de movimiento de tierra, acción erosiva y la capacidad de sedimentación de ríos y lagunas, disminuye el área deforestada y reduce los costos del transporte incrementando las ganancias de la empresa. Este método además favorece la recuperación de áreas degradadas al procurar establecer las condiciones naturales del ecosistema (terreno, flora y fauna) quedando éstas muy próximas a las originales, permitiendo el aprovechamiento del espacio, lo cual le otorga carácter de sostenibilidad y aprovechamiento económico del área antes, durante y después de la vida útil de la mina [37]. Aun cuando la reutilización de material minero resulta eficaz para mejorar la estructura del suelo,

² Reserva de semillas, capa de hojarasca, desechos orgánicos (tocones, tallos, raíces) y minerales.

como fase previa a la restauración es importante considerar el uso de enmiendas orgánicas para aumentar su fertilidad [39].

De acuerdo con estudios realizados en un bosque en proceso de restauración en Minas de Gerais (Brasil), partiendo de análisis florístico y estructural se encontró que existen barreras que alteran el desarrollo de especies arbóreas en procesos de sucesión natural que deben abordarse de forma correctiva y asistirse en procesos de sucesión [36]. Para la estimulación de procesos de sucesión en ecosistemas tropicales, se requiere la biodisponibilidad de N y P y el manejo de valores altos de pH, textura del suelo, infiltración y drenaje, medidas que suelen ser bastante costosas [33].

La tasa de infiltración de un terreno está ligada con la cantidad de sedimentos presentes en el suelo lo que determina la densidad de este, que se relaciona a su vez con los procesos de sucesión de la vegetación. Adicionalmente, la presencia de nitrógeno total, fósforo, azufre y OM, representan un mejor hábitat para microbios del suelo que establecen el ciclo nutritivo entre el suelo y las plantas logrando el éxito en la revegetalización en un tiempo menor [34].

La regeneración natural de un área es muy lenta para especies arbustivas y arbóreas. Al favorecer las cualidades del sustrato de un área que ha sido afectada por minería las especies pueden presentar mayor supervivencia [61]. El biochar, es empleado en algunos procesos de restauración, ya que acondiciona el suelo, previene la erosión, mejora la conservación y calidad de agua y facilita la colonización de la vegetación; sin embargo, debe considerarse el contexto específico del área de aplicación de la enmienda para determinar los parámetros de aplicación [24-35].

Otra enmienda bastante utilizada son los lodos producto del tratamiento de aguas residuales que fortalecen notablemente las comunidades de microorganismos del suelo³ que participan en la transformación de nitrógeno intensificando procesos de mineralización [62].

El aprovechamiento de macroinvertebrados (arañas, avispas, escarabajos, mariposas) y vertebrados (aves, anfibios y murciélagos), colonizadores de sitios mineros abandonados en procesos de sucesión espontánea [16], facilita mucho más los procesos de reforestación ya que estos promueven la aparición de especies vegetales [63]. Se ha encontrado que el rol que juega la macrofauna del suelo (hormigas, termitas, lombrices) en el mejoramiento de sus propiedades físicas (formación de macroporos, bioturbación y agregados), es determinante en procesos como infiltración, escorrentía y erosión [32], al tiempo que permite el desarrollo radicular en especies forestales ligado a la agregación y humificación [40] y también disminuye el estrés hídrico estimulando el éxito en planes de reforestación en zonas mineras [64].

Otra propuesta para reducir la lixiviación y pérdidas por erosión es la adición de enmiendas orgánicas y la promoción de cultivos de cobertura de especies fijadoras de nitrógeno, con raíces poco profundas y de crecimiento rápido, ya que esto

³ En el estudio se observa el aumento de 2-3 veces el número de *Streptomyces* de la capa superficial del suelo.

permite crear un efecto amortiguador contra la lluvia en las primeras fases de sucesión natural [30].

Se ha encontrado que las condiciones propiciadas luego de aplicación de lodos de desagüe y la presencia de herbáceas favorecen el ambiente a la macrofauna del suelo, que al interactuar con este estimula la presencia vegetación de tipo arbustivo [31]. En Colombia, se estudia el aporte de materia orgánica y nutrientes que realiza la hojarasca y las variables que intervienen en su degradación como condiciones físicas del suelo antes de su deposición y de la especie vegetal que realiza el aporte.[26].

Una de las razones por la cual es importante aplicar este tipo de métodos de reforestación en minas, se fundamenta en la contribución que áreas reforestadas pueden dar a la resistencia al cambio climático ya que la acumulación de carbono en las minas recuperadas, es una función en primer lugar de la producción vegetal [40].

En este método se consideran variables de tipo climático y geomorfológico, que determinan las especies seleccionadas el reclutamiento de semillas, de plántulas y las enmiendas que serán aplicadas al suelo. Además se requieren evaluaciones y pruebas de factibilidad a nivel económico [41-42].

En los procesos de reforestación propuestos en las investigaciones consultadas, se abordan temas como selección de especies vegetales nativas, apropiadas para siembra dada la fase sucesional, promoviendo además el retorno de la fauna nativa [47] y la perfección de técnicas de plantación según la intensidad de degradación de los ecosistemas [44]. Se ha establecido por algunos estudios que algunas especies de micorrizas son capaces de colonizar escombros de minería sin contaminación química y con bajo contenido de materia orgánica [25] fortaleciendo las interacciones de árboles con el suelo [33], por tanto se propone ampliar los estudios de biodiversidad de este tipo de organismos en áreas mineras en el sector de Amagá para encontrar una posible potencialidad en reforestación [33].

Si bien procurar plantar especies nativas en un área de reforestación es primordial, el proceso debe asumirse desde el momento en el que se elabora una línea base considerando el tipo de hábitat, las condiciones del paisaje y el terreno y de forma detallada los mapas geo botánicos, ya que esto permite asistir y encaminar la restauración a las condiciones más similares a las iniciales [65].

Acacia mangium, es una especie arbórea introducida de Asia que se usa para reforestación de áreas mineras en Colombia, ya que no requiere de tantos nutrientes ni disposición abundante de agua en el suelo para su crecimiento; sin embargo este último factor si es determinante en la tasa de descomposición de su hojarasca [26]. Dado que *Acacia mangium* es una especie introducida que se proyecta para ser usada en la restauración de suelos afectados con minería se hace necesario plantear más estudios relacionados con la evaluación de especies nativas tolerantes a condiciones adversas en este mismo aspecto [66-26]

En Colombia, se realizan investigaciones que promueven la conservación mediante el fortalecimiento de elementos del paisaje (corredor, parche y fragmento), con la

idea básica de mantener la densidad arbórea de ecosistemas prístinos circundantes que en el largo plazo fortalecería las áreas afectadas [16].

Otras alternativas de aprovechamiento económico de canteras plantean actividades agrícolas, construcción de viviendas, parques industriales o energéticos, piscicultura, depósitos de agua para consumo animal o diferentes usos recreativos que usualmente son mejor aceptados por comunidades locales fomentando mejores condiciones de vida [51] y reduciendo daños ambientales causados por la minería de forma indirecta [37]. En algunas ciudades europeas, los lagos mineros son usados para fines recreativos y la gestión sostenible de estos es un importante factor ecológico y socioeconómico porque cumplen funciones ecológicas, socioeconómicas y paisajísticas, como sistemas dinámicos con alto grado de heterogeneidad [50]. Usos alternativos contrarios a la línea de conservación ecológica también resultan funcionales y facilitan la interacción de alta calidad entre las personas y su entorno. En un análisis costo-beneficio, estas prácticas pueden apoyar las decisiones tomadas por empresas mineras ampliando la perspectiva sobre elementos socioeconómicos [26].

Otros usos de minas abandonadas que se contemplan, se relacionan con la adaptación de estos espacios a la construcción de celdas fotovoltaicas que disminuyen la concentración de gases efecto invernadero en 471,21 tCO₂ / año que corresponde al doble del conseguido por restauración forestal en una mina abandonada [49].

Las estrategias de mitigación de los impactos mineros deben contemplar parámetros de tipo social, medioambiental, viabilidad técnica y económica [39-52, 53-54-55]. En Moa, se aplican ecotecnologías que contemplan fases que aprovechan los recursos existentes, protegen la biodiversidad nativa y promueven la recuperación progresiva de ecosistemas para lograr un funcionamiento similar al inicial. Para esto conservan fragmentos de bosques que albergan fauna y flora dentro del área minada y crea corredores que los conectan favoreciendo la dispersión. Las fases se desarrollan en la participación comunitaria lo cual permite que se refuerce la sostenibilidad social, ambiental y financiera de la propuesta promoviendo la educación ambiental y la participación en el proyecto [52].

Levelle, propone para rehabilitación de suelos y ecosistemas intervenidos por la minería a cielo abierto, crear un depósito de suelo para la conservación del banco de semillas dentro del marco de minería por transferencia a minas ya abandonadas, citando como modelo el proyecto realizado por Mineros SA en el municipio de Bagre, Antioquía donde se promueven prácticas mineras sin uso sustancias tóxicas y que además integra factores determinantes ambientales (fauna, flora, geomorfología, hidráulica, comunidades humanas), una evaluación potencial de restauración para saber la viabilidad y un modelo conceptual de restauración ecológica ($[RE=f(Ge, Hi, Pe, FS, TCH+MA)]^4$). La aplicación de este modelo de recuperación de sitios alterados lleva al aumento del potencial de restauración [53].

⁴ Geomorfología (Ge), la hidráulica (Hi), la fauna silvestre (FS), los peces (Pe) y el tipo de comunidades humanas (TCH).

Dado que los procesos de minería en el municipio de Amagá son diversos, deben utilizarse diferentes formas de abordar los procesos de restauración. Los instrumentos jurídicos y económicos pueden implementarse en primera medida con el fin de promover la planificación de los procesos de restauración en fases previas a la explotación minera, ya que esto permite aprovechar el material disponible considerado como escombros y además favorece el entorno adecuado para el establecimiento de especies nativas y por tanto aumenta la probabilidad de similitud con las condiciones iniciales de un ecosistema dado.

Los procesos de cierre minero fueron reglamentados en los términos de referencia para la elaboración de EIA en proyectos de explotación minera, en la resolución 2206 de 27 de diciembre de 2016. Anteriormente los procesos de cierre minero se encontraban débilmente acotados y los procesos ineficientes de cierre minero y abandono de minas conformaron el amplio conjunto de pasivos ambientales cuyos costos son asumidos por el estado en la actualidad.

Para minas que no consideraron el cierre efectivo en Amagá, es conveniente emplear métodos de biorremediación, aprovechando que las condiciones climáticas y geomorfológicas de la región favorecen la biodiversidad de microorganismos y macrofauna del suelo. Por lo es apropiado promover estudios de biodiversidad para estos grupos en ecosistemas alterados y su potencial de aplicación en biorremediación.

El fortalecimiento en la práctica de la minería por transferencia en el municipio, además de permitir el aprovechamiento del material producto de la explotación y la reducción de sus costos asociados, impulsa la recuperación de ambientes degradados resultado de la minería no planificada y de los cierres escasamente acotados anteriormente. Adicionalmente, los procesos de restauración y de retorno funcional en ecosistemas degradados son objeto de prebendas y estímulos tributarios a empresas que los practiquen, lo cual es una forma de estimular buenas prácticas ambientales.

Si bien los métodos de restauración apoyados en reforestación contribuyen positivamente con la reducción del efecto invernadero, debe optarse en lo posible por la utilización de especies nativas hasta no tener muy claro todo el rol ecológico desempeñado por especies como *Acacia mangium*, pues usualmente se tienen serios impactos producto de la introducción de especies exóticas.

En su apartado 10.1.4.1 los términos de referencia para la elaboración de EIA en proyectos de explotación minera, determinan que dentro de la planificación del cierre minero que incluye todas las etapas específicas de cierre, desmantelamiento, recuperación, restauración y rehabilitación deben contemplarse aspectos socioecológicos en función de la biodiversidad y servicios ecosistémicos, socioeconómicos y biofísicos de forma amplia [67- 68].

Si bien contempla todos los componentes ambientales, no establece una forma particular para alcanzar el objetivo de restauración, por lo que la empresa que desee acceder a la licencia debe plantear la forma más conveniente de alcanzar un plan de cierre efectivo y en este aspecto deben reconocerse por más complejo que sea todos los componentes del suelo y sus interacciones.

CONCLUSIONES

Existe un amplio espectro de métodos de restauración de suelos degradados por minería, que al aplicarse en forma articulada aumentan la probabilidad de éxito en procesos de restauración en el municipio de Amagá (Antioquia).

En Colombia, los métodos de restauración de suelos enfocados en minería de oro y de material para construcción son diversos y planteados de forma integral; sin embargo, no se encontró mucha información relacionada con métodos completos de restauración en suelos con minería de carbón encontrando en su mayoría medidas de restauración en estos espacios.

La planeación de los procesos de restauración en fases pre minería puede aumentar el éxito en los procesos de recuperación de suelo, uso de tierras y disminución de costos en las empresas. No debe ser una reflexión tardía.

Deben incentivarse estudios de biodiversidad de microorganismos en áreas degradadas por minería a cielo abierto, con el fin de encontrar posibles potencialidades de su aplicación en biorremediación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013) *Política de gestión integral ambiental de suelos*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/Consulta_Publica/Politica-de-gestion-integral-del-suelo.pdf.

[2] Quijano, P., Pardo, M.P. (2010). *Elementos diagnósticos para una caracterización de la minería en Colombia*. Recuperado de <https://www.mesadialogopermanente.org/wp-content/uploads/2013/05/ELEMENTOS-DIAGNOSTICO-MINERIA-COLOMBIA-GAE-AVINA.pdf>

[3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015) *Plan Nacional de Restauración*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/plan_nacional_restauracion/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACION_2015.pdf

[4] Constitución política de Colombia [Const.] (1991). Artículo 58 [Titulo II]. De <http://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-2/articulo-58>.

[5] Congreso de Colombia. (9 de febrero de 2010) Por la cual se modifica la Ley 685 de 2001 CÓDIGO DE MINAS. [Ley 1382 de 2010]. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38863>

[6] (Evaluación de Ecosistemas del Milenio). (2005) *Ecosystems and human wellbeing: synthesis*. Island Press, Washington, DC. Recuperado de <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>

[7] Amagá (2017). *Información del municipio*. Recuperado de <http://www.amaga-antioquia.gov.co/Paginas/default.aspx>. Fecha de consulta 10 de marzo de 2017.

[8] Salamanca, L. J. G., Rico, S. M., & y Becerra, L. A. P. (2014). *Minería en Colombia: daños ecológicos y socioeconómicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo*. Recuperado de https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2014/08/libro-mineria_vol-iii_serie-final.pdf

[9] Fierro, J., & López, R. (2014). Aportes a la conceptualización del daño ambiental y del pasivo ambiental por minería. *Minería En Colombia III: Daños Ecológicos Y Socioeconómicos Y Consideraciones Sobre Un Modelo Minero Alternativo*. Recuperado de https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2014/08/libro-mineria_vol-iii_serie-final.pdf

[10] Guía ambiental minería de carbón a cielo abierto (2002). *Análisis ambiental de la minería de carbón a cielo abierto* Recuperado de: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_cab/contenid/analisis.htm. Consulta 09 de Marzo de 2017.

[11] Posada, V. V., & Sepúlveda, G. F. (2013). Diagnóstico minero y económico del departamento de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, volumen(33), 125-134. ISSN 0120-3630. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169528792009>.

[12] Corporación Autónoma Regional de Antioquia. (2009) *Plan de Ordenación y Manejo Cuenca Hidrográfica del Río Amagá*. Recuperado de http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/SiteAssets/Images/MenuSuperiorArchivos/Proyectos_POM_Amaga.pdf

[13] Corporación Autónoma Regional de Antioquia. (1999) *Diagnóstico esquema de ordenamiento territorial municipio de Amagá acuerdo No. 021*. Recuperado de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/amagaantioquiaeot1998.pdf>

[14] Congreso de Colombia. (15 de agosto de 2001) Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. [Ley 685 de 2001]. Recuperado de <http://www.simco.gov.co/Portals/0/ley685.pdf>

[15] Giraldo, G. E. N., Morales, J. E. L., & Vahos, J. G. G. (2009). *Las políticas públicas territoriales como redes de política pública y gobernanza local: la experiencia de diseño y formulación de las políticas públicas sobre desplazamiento forzado en el departamento de Antioquia y la ciudad de Medellín*. Medellín, Colombia: Estudios Políticos, (35), 81-105, pp. 116.

- [16] Dávila, E. Á., & Pérez, A. (2012) *Bosques y Minería Responsable en Antioquia*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/301747277_Bosques_y_Mineria_Responsable_en_Antioquia
- [17] Cárdenas, M., & Reina, M. (2008) *La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal*. Recuperado de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-miner%C3%ADa-en-Colombia-Informe-de-Fedesarrollo-2008.pdf>
- [18] Gobierno de la Rioja. (2006) *Manual de restauración de explotaciones mineras a cielo abierto de Aragón*, pp 19. Recuperado de <http://www.larioja.org/territorio/es/minas/jornadas-estudios-publicaciones-tecnicas/manual-restauracion-minas-cielo-abierto>.
- [19] Barrera, J.I., Contreras, S., Ochoa, A. (2009). *Restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto en Colombia*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, ISBN: 978-958-716-243-1, pp. 165-168.
- [20] Vargas, O. (2009). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Bogotá, Colombia: UN Editorial, pp. 17-20. Recuperado de http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_46/file/Guia%20Metodologica.pdf
- [21] Murcia, C.; Guariguata, M.R. (2014) *La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades*. Center for International Forestry Research (CIFOR), volumen (107), pp. 13-16. DOI: 10.17528/cifor/004519
- [22] Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems?. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558-1563. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112710003750>.
- [23] Becerril, J. M., Barrutia, O., Plazaola, J. G., Hernández, A., Olano, J. M., & Garbisu, C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Revista Ecosistemas*, 16(2). Recuperado de <http://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/128>
- [24] Peltz, C. D., & Harley, A. (2016). Biochar Application for Abandoned Mine Land Reclamation. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, (sssaspepub63), 325-340. DOI:10.2136/sssaspepub63.2014.0047.5
- [25] Kałucka, I. L., Jagodziński, A. M., & Nowiński, M. (2016) Biodiversity of ectomycorrhizal fungi in surface mine spoil restoration stands in Poland—first time recorded, rare, and red-listed species. *Acta Mycologica*, 51(2). DOI: <https://doi.org/10.5586/am.1080>
- [26] Castellanos, J, & León, J.D. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de acacia mangium (mimosaceae) establecidas en suelos degradados de colombia. *Revista De Biología Tropical*, 59(1), 113-128. Recuperado de <https://doaj.org/article/39b37e62bcf442519046c5b894ae9ba8>

- [27] Favas, P. J. C., & Pratas, J. (2013). *Heavy metals biogeochemistry in abandoned mining areas*. E3S Web of Conferences, 1, 19006. DOI:10.1051/e3sconf/20130119006
- [28] Caicedo, G.A. & Márquez, M.A (2010). Mecanismo de selección de consorcios bacterianos compatibles con A. ferrooxidans y A. thiooxidans en procesos de biodesulfurización de carbón. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (52), 88-94. Recuperado de <https://doaj.org/article/5941ac77c40c4e50a8a20281a7732acc>
- [29] Mebane, C., Eakins, R., Fraser, B. & Adams, W.J. (2015). Recovery of a mining-damaged stream ecosystem. *Elementa: Science of the Anthropocene* 2015;3:42. DOI:10.12952/journal.elementa.000042
- [30] Chatterjee, A., & Clay, D., (2016). Cover Crops Impacts on Nitrogen Scavenging, Nitrous Oxide Emissions, Nitrogen Fertilizer Replacement, Erosion, and Soil Health. *Soil Fertility Management in Agroecosystems*, 2016;1, pp. 76-89. DOI: 10.2134/soilfertility.2016.0012
- [31] Corrêa, R.S. & Borges, M.A. (2010). Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no distrito federal. *Revista Brasileira De Ciência do Solo*, 34(4), 1435-1443. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400039>.
- [32] S Arnold, & E R Williams. (2016). Quantification of the inevitable: The influence of soil macrofauna on soil water movement in rehabilitated open-cut mined lands. *Soil*, 2(1), 41-48. DOI:10.5194/soil-2-41-2016
- [33] Zipper, C. E., Burger, J. A., McGrath, J. M., Rodrigue, J. A., & Holtzman, G. I. (2011). Forest restoration potentials of coal-mined lands in the eastern United States. *Journal of environmental quality*, 40(5), 1567-1577. DOI: 10.2134/jeq2011.0040
- [34] Corlett, R. T. (2014). Global ecology and conservation. *Global Ecology and Conservation*, (1), 1. DOI:10.1016/j.gecco.2014.08.008
- [35] Aumond, J. J., Regensburger, B., & Comin, J. J. (2008). Integração de técnicas de solo, plantas e animais para recuperar áreas degradadas. *Ciencia Rural*, 38(6), 1773-1776. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2719471>
- [36] Campos, H.W., & Martins, V.S. (2016). Forest restoration potentials of coal-mined lands in the eastern United States. *International journal of environmental quality*, 1.40(2), 189-196. DOI:10.1590/0100-67622016000200001
- [37] Macêdo, G. I., Alfonso, P. & Souza, J.C. (2011). The extraction by transference method as a sustainable alternative to the exploitation of gypsum in pólo gesso do araripe, Brazil. *Holos*, 27(5), 86. Recuperado de <http://search.proquest.com/docview/1115565414>

- [38] Zipper, C. E., Burger, J. A., Barton, C. D., & Skousen, J. G. (2013). Rebuilding soils on mined land for native forests in appalachia. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 337. DOI:10.2136/sssaj2012.0335
- [39] Nieman, T. J., & Merkin, Z. R. (2000). Reclamation of drastically disturbed lands. *Agronomy Monograph*, volumen(41), pp.667-686. doi:10.2134/agronmonogr41.c26. Recuperado de <http://catalog.hathitrust.org/Record/009532806>.
- [40] Ingram, L. J., Stahl, P. D., Wick, A. F., & Anderson, J. D. (2009). *Organic Carbon Accumulation in Reclaimed Mine Soils of the Western United States*. Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect, (soilcarbonseque), 311-319. Recuperado de <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssaspecialpubl/soilcarbonseque/311?access=0&view=pdf>
- [41] Zhang, P., Cui, Y., Zhang, Y., Jia, J., Wang, X., & Zhang, X. (2016). Changes in Soil Physical and Chemical Properties following Surface Mining and Reclamation. *Soil Science Society of America Journal*, 80(6), 1476-1485. DOI: 10.2136/sssaj2016.06.0167
- [42] Erickson, T. E., Martini, D. C., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Climate and soil factors influencing seedling recruitment of plant species used for dryland restoration. *Soil*, 2(2), 287. DOI:10.5194/soil-2-287-2016
- [43] Basiliko, N., Henry, K., Gupta, V., Moore, T. R., Driscoll, B. T., & Dunfield, P. F. (2013). Controls on bacterial and archaeal community structure and greenhouse gas production in natural, mined, and restored Canadian peatlands. *Front Microbiology*, 31;4:215. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00215
- [44] Pereira, I. M., Gonzaga, A. P. D., Machado, E. L. M., Oliveira, M. L. R., & Marques, I. C. (2015). Estrutura da vegetação colonizadora em ambiente degradado por extração de cascalho em Diamantina, MG. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(82), 77-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.769>
- [45] Risman, T., Arie, M., Saleng, A., & M. Wahid. Y., (2015). The imposition environmental cost-loading of companies investing in coal mining. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4(8), 51-55. Recuperado de <https://doaj.org/article/c60bc3b065884b9bad31cf45bba7389c>
- [46] Arif, M., Saxena, N., & Yadav, R. K. (2016). A REIA Study of Marble Mining Activities in District-Nagaur (Rajasthan). *EQA-International Journal of Environmental Quality*, 20, 49-55. Recuperado de <https://eqa.unibo.it/article/view/6040>
- [47] Guimarães, J.C., Barros, D.A., Pereira, J.A Silva, R.A., Oliveira, A.D., Borges, L.A. (2013). Cost analysis and ecological benefits of environmental recovery methodologies in bauxite mining. *Cerne*, volumen.19, pp. 1. DOI:10.1590/S0104-77602013000100002

[48] Irawan, I. (2016). Legal Analysis of Coal Mining in Efforts to Maintain The Environmental Sustainability. *Humaniora*, volumen 7(3), 381-387. Recuperado de <http://journal.binus.ac.id/index.php/Humaniora/article/view/3592/2972>

[49] Song, J., & Choi, Y. (2016). Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea. *Energies*, volumen 9(2), 102. DOI:10.3390/en9020102

[50] Macicasan, V., Vlad, S.N., Muntean, L. & Rosian, G. (2012). Mining lakes of the aghires area: Genesis, evolution and morphometric aspects. *Aerul Si Apa*, 2012, 413-420. Recuperado de <http://search.proquest.com/docview/1321129955>

[51] Oracion, E. G. (2015). Mining or Tourism: The Development Preference of Settlers Along Pagatban River in Negros Oriental, Philippines. *Social Science Diliman*, volumen 11(1). Recuperado de <http://journals.upd.edu.ph/index.php/socialsciencediliman/article/view/4593>

[52] Torres, Y., Rodríguez, M. E., Oviedo, R., & Herrera, R. A. (2002). *Ecotecnologías para la rehabilitación de áreas afectadas por la minería en Moa*. Recuperado de <http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/665/1/Ecotecnol%C3%B3gias%20para%20rehabilitaci%C3%B3n%20de%20%C3%A1reas%20afectadas%20en%20Moa.pdf>.

[53] Villa, V., & Alexander, H. (2014). *Modelo de restauración de áreas degradadas por minería en El Bagre–Antioquia*. (Tesis Doctoral). Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/39657/1/15513921.2014.pdf>

[54] Ambientales, I. D., Pacífico, D., De Ambiente, M. Desarrollo, Y., Convenio, S., Klinger Brahan, W., . . . Ortiz, S. (2012). *Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino en el chocó biogeográfico*. Recuperado de http://siatpc.iiap.org.co/docs/avances/protocolo_de_restauracion_ecologico.pdf

[55] Lavelle, P. (2014). *Rehabilitación de suelos y ecosistemas intervenidos por la minería*. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/rehabilitacion_suelos_ecosistemas_intervenidos_mineria.pdf

[56] Garay, L., & Jorge, L. (2013). Minería en Colombia. *Fundamentos para superar el modelo extractivista*, pp.139. Bogotá: Contraloría General de la Nación. Recuperado de <http://censat.org/es/publicaciones/mineria-en-colombia-fundamentos-para-superar-el-modelo-extractivista>.

[57] Chuman, T. (2015). Restoration practices used on post mining sites and industrial deposits in the czech republic with an example of natural restoration of granodiorite quarries and spoil heaps. *Journal of Landscape Ecology*, 8(2), 29-46. DOI:10.1515/jlecol-2015-0007

[58] Hamilton, P.B., Lavoie, I., Alpay, S., & Ponader, K. (2015). Using diatom assemblages and sulphur in sediments to uncover the effects of historical mining on lake arnoux (quebec, canada): A retrospective of economic benefits versus environmental debt. *Frontiers in Ecology and Evolution*, volumen,3 DOI:10.3389/fevo.2015.00099

[59] Smyntek, P. M., Wagner, R. C., Krometis, L. A., Sanchez, S. C., Wynn Thompson, T., & Strosnider, W. H. (2017). Passive Biological Treatment of Mine Water to Reduce Conductivity: Potential Designs, Challenges, and Research Needs. *Journal of Environmental Quality*, volumen 46(1), pp. 1-9. DOI:10.2134/jeq2016.06.0216.

[60] Skousen, J., Simmons, J., McDonald, L. M., & Ziemkiewicz, P. (2002). Acid–base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines. *Journal of Environmental Quality*, 31(6), 2034-2044. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12469854>

[61] Silva, L.C. & Corrêa, R. S. (2008). Sobrevivência e crescimento de seis espécies arbóreas submetidas a quatro tratamentos em área minerada no cerrado. *Revista Árvore*, volumen 32(4), 731-740. Recuperado de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622008000400015

[62] Syschykova, A. (2014). El impacto de los paisajes artificiales y el funcionamiento de las comunidades de microorganismos del suelo que participan en la transformación de compuestos de nitrógeno. *Diario biológico*, NGPU. 2014;1. ISSN 2226-9010. UDC 631461: 579873.

[63] Jongepierová, I., Pešout, P., Jongepier, J.W. & Prach, K. (2012). Ecological restoration in the Czech Republic. Praga, Republica Checa: *Nature Conservation Agency of the Czech Republic*, ISBN 978-80-87457-32-0, pp 87-93. Recuperado de <http://chapter.ser.org/europe/files/2012/12/Ecological-Restoration-in-the-Czech-Republic1.pdf>

[64] Guittonny, M., Bussière, B., & Pednault, C. (2016). Tree-substrate water relations and root development in tree plantations used for mine tailings reclamation. *Journal of Environmental Quality*, volumen 45(3), 1036. DOI:10.2134/jeq2015.09.0477

[65] Ivakina E. V., Osipov S. V., Reforestación natural y artificial de los paisajes mineros del Lejano Oriente de Rusia de Siberia. *Diario de Ciencias Forestales*, volumen 2. 2016, pp 6-21. DOI: 10.15372/SJFS20160201

[66] Castellanos, J. y, & León, J. D. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de Acacia mangium (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, volumen 59(1), pp. 113-128. Recuperado de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442011000100009

[67] Agencia Nacional de Minería. (2016). *Términos de referencia para la elaboración de EIA en proyectos de explotación minera*. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/normativas/term_ref_explotacion-mineria_0.pdf

[68] Ministerio de medio ambiente y desarrollo. (27 de Diciembre de 2016) Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones. [Resolución 2206 de 27 de diciembre de 2016]. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/res%202206%202016-fe.pdf>