

---

# Biorremediación de suelos alterados por actividades mineras: soluciones geológico-ambientales y bioeconómicas

## Artículo de reflexión

Jenny García González<sup>1</sup>  
Juan Camilo Hernández Rodríguez<sup>2</sup>

### Resumen

Los procesos de biorremediación se realizan con compost. Específicamente, se usan materiales orgánicos que pasan por un lombricultivo, que finalmente genera un producto orgánico (tierra-abono) utilizado para la recuperación de suelos después de que son afectados por sustancias químicas, maquinaria e intervenciones antropogénicas. Con este material, llamado compostaje, se ha contribuido a la recuperación de zonas mineras durante su operación, en el Municipio de Lenguazaque, Cundinamarca, donde hay proyectos de minería subterránea de carbón coque. La utilización de este material ha permitido que suelos áridos y “contaminados” hayan sido recuperados y reforestados, devolviendo al entorno y al ecosistema del área del proyecto la sinergia entre la actividad desarrollada, la afectación del suelo y su reparación, para que así sea posible retomar su productividad con poca inversión.

**Palabras clave:** Suelo, Minería, Biorremediación, Compost, Lenguazaque.

---

<sup>1</sup> Geóloga, MSc. en Ciencias de la Tierra. Fundación Universitaria del Área Andina, Sede Valledupar. Docente del programa Ingeniería Geológica. Correo: ygarcia68@areandina.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero electrónico y administrador ambiental. Especialista en Desarrollo Sostenible. Grupo AGWA-EcoEstudios, Ingeniería Sostenibilidad. Manizales, Caldas. Correo: agwaecoestudiosingenieria@gmail.com; jcamilohrod@gmail.com

## Introducción

La ecominería y la ecoagricultura son procesos actuales que convocan a la compatibilidad entre la minería y la agricultura con la sostenibilidad del ecosistema ambiental, económico y social ampliado a la cadena de valor.

En la actualidad, el manejo y el conocimiento ambiental han resurgido de manera vertiginosa. Se trata de principios vitales de la conservación de los servicios ecosistémicos y de la preservación de la fauna y flora, así como de la supervivencia del ser humano en el planeta Tierra. Según la información registrada por las Naciones Unidas, la población mundial asciende a los 7.900 millones de personas en 2022, lo que indica que se ha triplicado en los últimos cincuenta años. Fruto de esa expansión humana será una mayor explotación de recursos naturales, de los que, de hecho, ya se ha superado el límite. Así mismo, está incrementando la deforestación y la destrucción de hábitats esenciales para el funcionamiento ecológico y la adaptación de nuevos asentamientos humanos. Además, se dan nuevas formas de búsqueda extractivista. Aumenta la demanda y el hiperconsumo de agua, energía, y minerales esenciales, y se magnifica la contaminación de la biota dejando

inservibles al suelo, a la atmosfera y al recurso hídrico para nuevas funciones (Naciones Unidas, 2022).

Es inevitable que las actividades extractivistas (carbón) no transformen los territorios; de ese fenómeno se desprende la modificación del paisaje, y la adaptación de una comunidad y su cultura. Es evidente, y así lo expone la FAO, que la explotación del subsuelo —la extracción de recursos con los que el ser humano ha transformado el mundo de hoy— también hace que aumenten de manera acelerada los impactos ambientales sobre los ecosistemas: se alteran las redes tróficas y, con ello, la forma de vida de todos los seres vivos. En adición, la superficie de la tierra es uno de los recursos que se ven altamente impactadas. Uno de estos impactos es el producido por la contaminación química, como es evidente en los esfuerzos de los gobiernos internacionales con la creación del Convenio de Minamata. Este convenio surge de la necesidad de salvaguardar la salud humana y, sobre todo, la preservación de los servicios ecosistémicos. El convenio prohíbe el uso de sustancias químicas peligrosas y la utilización de metales pesados en la extracción y la explotación minera. El uso de estas sustancias y metales impacta en los ecosistemas e influencia la degradación de las cuen-

cas donde se realizan proyectos mineros (PNUMA, 2021).

Es necesario, entonces, compensar los daños antrópicos causado por la extracción minera en los suelos, para su restauración y recuperación. En ese sentido, este trabajo plantea el uso de la técnica de biotecnología de biorremediación para la recuperación biológica y ecológica, el fomento del cuidado de los hábitats y ecosistemas para alcanzar de nuevo el equilibrio ambiental en las zonas impactadas por la minería. Así mismo, esta técnica permite establecer nue-

vas cadenas de mercado sostenibles. Es necesario estudiar e impulsar la investigación al unir a todos los actores para dar respuesta y solución a la restauración de espacios degradados. Este proceso solo es posible a través de la recuperación de ecosistemas por erosión y minería, y al establecer bases sólidas que parten de esa transformación en educación ambiental, cuidado y preservación. Así, se generan cadenas de pertenencia en las poblaciones para la misma conservación de estas áreas. En la figura 1 se muestra la localización de la zona de prueba.

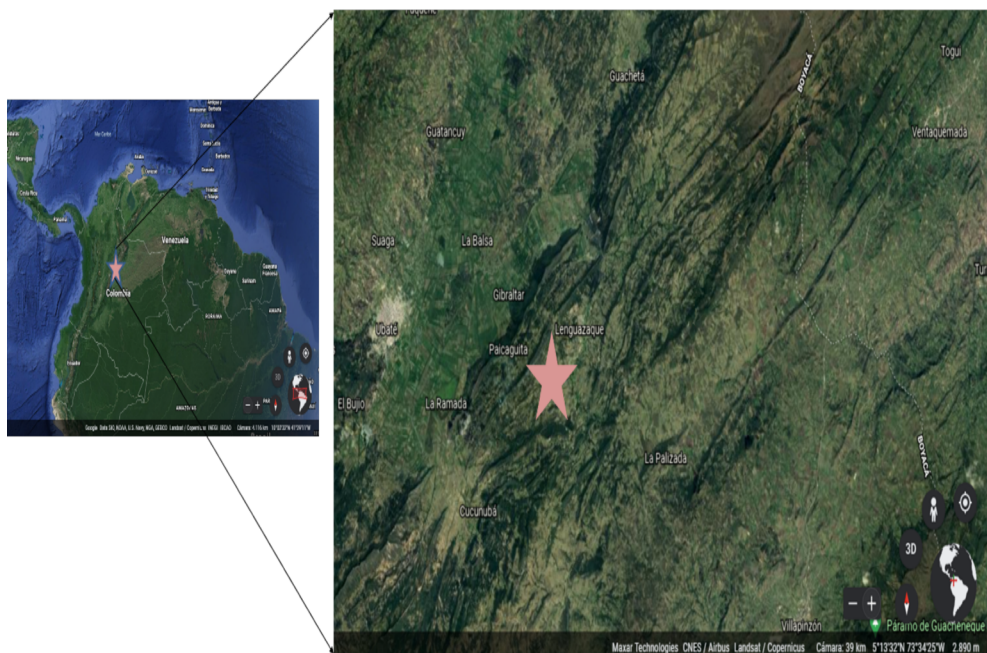


Figura 1. Localización zona de prueba piloto, biorremediación de suelos afectados por procesos mineros.

Fuente: Elaboración propia.

## ¿Qué identificamos?

El estudio fue realizado en el municipio de Lenguazaque, departamento de Cundinamarca. Se trata de una población minera y ganadera. Existe una concesión de explotación de carbón llamada Mina el Triunfo. Allí se identifica erosión y pérdida de nutrientes, pérdida de microbiología y minerales en el suelo aledaño. Se identifican impactos en el suelo y agua por el mal manejo de los residuos sólidos, como la mal disposición de inertes producidos por la extracción. Esto genera una progresiva degradación del suelo, volviéndolo improductivo, de aspecto inocuo y formación de un paisaje desértico y erosionado, lo que no contribuye a un desequilibrio ecológico y en pro de aumentar la contaminación del lugar.

## Propuesta

La idea central es usar la técnica de biorremediación y fitorremediación con el fin de restaurar espacios degradados, donde la recuperación de ecosistemas, hábitats, y cuidado de los servicios ecosistémicos por erosión y minería sean restablecidos y se formen conexiones de nuevo complejas entre las diferentes especies de fauna y flora con el fin de producir de nuevo los nutrientes y microbiota en los suelos degradados.

Por consiguiente, el objetivo principal del proyecto es la recuperación de suelos con base en los parámetros del desarrollo sostenible y educación ambiental. Según la Agencia Nacional de Minería, el 70% de la minería en Colombia es a pequeña escala, y recientemente se busca la formalización y la protección de los ecosistemas (Universidad de los Andes, 2022). De esta manera se plantea a los pequeños mineros y a las comunidades relacionadas con los proyectos mineros, en este caso en el municipio de Lenguazaque, Cundinamarca, lo siguiente:

- Diagnóstico ambiental y social inicial del área de explotación. Mina el Triunfo.
- Planes para la descontaminación y remediación de aguas y suelos por medio de biorremediación y fitorremediación.
- Investigación, desarrollo e innovación al fomentar las relaciones entre entidades públicas y privadas con el objetivo de construir una adaptación al cambio climático.
- Capacitación a población basada en economía minera.
- Capacitación ambiental y recuperación económica para comunidad vulnerable.

- Construcción social sostenible.

En ese proceso se relacionan aspectos geológicos, ambientales y sociales, y son estos últimos los más importantes para generar sinergia entre las actividades, el entorno y el cuidado. Solo es posible así recuperar las áreas de desarrollo de minería subterránea de carbón con efectos visibles en superficie.

## Resultados

En la mina El Triunfo se fueron implementando las actividades señaladas para aplicar la propuesta de biorreme-

diación de los suelos afectados por la actividad extractivista subterránea de carbón. El objetivo era llegar a obtener la recuperación por medio de una técnica sencilla, de bajo costo de inversión, de aplicaciones y resultados sostenibles y que diera resultados en un plazo de seis meses. Esta técnica está acompañada de la utilización del vermicompost, producto del compostaje obtenido en un lombricultivo. El compost se usaría en un área determinada erosiva de esta mina y por medio de la biorremediación se lograría equilibrar y recuperar superficies.



Figura 2. Paisaje asociado a zona de proyectos de pequeña minería de carbón en Lenguazaque, Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se muestra el paisaje en el que se aplicó la técnica.

La minería a cielo abierto o subterránea genera modificaciones en el paisaje, cambios fisicoquímicos del suelo que pueden afectar las fuentes hídricas. Sin embargo, si detectamos a tiempo los puntos críticos, tenemos la certeza de que es posible mitigar estas modificaciones del paisaje, claramente en consonancia con la legislación ambiental y con base en las técnicas biotecnológicas. Por ello, el primer paso es la organización y la segregación de los residuos contaminantes al suelo. Como se observa en la figura 3, se organizó toda la producción de chatarra en un área determinada. La degradación desorganizada y a la intemperie de esta chatarra genera lixiviados tóxicos para el suelo, y de igual forma sucede con los demás compuestos residuales de otras



Figura 3. Visibilización de modificaciones al paisaje natural y afectación de suelos por actividad minera

Fuente: Elaboración propia.

sustancias. El primer paso es iniciar el proceso de reciclaje y beneficio con los recuperadores ambientales de la zona.

## Discusión

Como se ha indicado anteriormente, se buscó una solución a corto plazo y de baja inversión. Se buscó una técnica sostenible y aprobada por las Naciones Unidas, y que también fuera benéfica para agilizar economías emergentes: la implementación de lombricultivos. Se trata de una técnica de fácil tratamiento, que usa la especie *Eisenia foetida*, y la producción de vermicompost —abono 100% natural y facilitador— para la recuperación de tierras, por su alto valor en nutrientes y microorganismos benéficos. En la figura 4 se muestra una caneca con material orgánico.



Figura 4. Canecas con material orgánico tipo cáscaras de frutas y cartón.

Fuente: Elaboración propia.

Usaríamos el compostaje como principal técnica, un método recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021). Esta biotécnica de compostaje es la conexión de varios procesos complejos ecológicos que se dan en condiciones específicas (humedad, temperatura y pH), y controlados de forma anaeróbica. Se utilizaron microorganismos de la especie *Eisenia foetida* para la biodegradación de residuos orgánicos. El resultado del proceso de descomposición es un conjunto de lixiviados con alto porcentaje en urea y otros compuestos y nutrientes, como también el abono vermicompost, tierra con alto grado de minerales que beneficia al crecimiento y la adaptación al terreno donde se utilice; esta última para la utilización de fitorremediación. En concordancia con lo anterior, y de acuerdo con los pasos que enuncia el texto “Métodos de compostaje por la FAO” (FAO, 2003), se exponen las diferentes maneras de recuperar suelos mediante este uso de biotécnicas, y la economía sostenible alrededor de ellas, sobre todo por la producción de esta lombriz para su uso cárnico.

Para este proyecto se utilizan cinco camas con residuos orgánicos alimenticios, sustrato de café, papel picado y cartón. Se comienza con 50 g de lom-

brices en cada cama (canasta), como se observa en la figura 4. Estas camas tienen capas de distintos materiales: tierra, excremento de vaca, tierra, lombrices, residuos sólidos y una capa de cartón o papel (figura 6). Esta variedad de capas tiene el fin de conseguir un lugar ideal para la alimentación y la reproducción con una óptima relación de carbono y nitrógeno —C:N (25:1)—, y el control de temperaturas y humedad, al igual de un pH controlado entre 6 y 8.

A partir del producto dejado por las lombrices —resultado de la digestión de los residuos—, se obtiene el vermicompost, que se utiliza en los suelos impactados por la minería, en este caso de carbón. Se trata de suelos con características específicas de elementos benignos que se redimen y se mitigan con la adición y la aplicación de este abono y su lixiviado. Luego, se evidencia una recuperación de estas superficies, ya que este subproducto del lombricultivo tiene micronutrientes como Ba, Ca, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, Na y Zn, además de microbiota. Estos nutrientes ayudan al equilibrio del suelo y a obtener nutrientes para que las plantas puedan desarrollarse de nuevo en estos lugares.

Este resultado es importante para nuestra investigación: al pasar dos me-

ses, ya se cuenta con una producción de lombrices de 150 g por cama y 80 kg de abono (ver figura 6). Estos resultados demuestran que nuestra técnica es de fácil aplicabilidad, que es económica y, sobre todo, que podría ayudar a la construcción de sustento económico sostenible para familias vulnerables y crear pertenencia en la sociedad para la protección y el cuidado del ambiente. También fue importante llevar a cabo el proceso de capacitación ambiental. Se realizaron trabajos dos veces cada mes (figura 5). En estas sesiones se establecen lazos de confianza y de

trabajo consciente por el cuidado de los servicios ecosistémicos, por la protección de los recursos aledaños de la mina, la conservación de la pequeña quebrada y la reforestación para amenizar el paisaje. Se trabaja para que la región vuelva a ser un lugar tranquilo, limpio y de buen ambiente para respirar después de una larga jornada de trabajo bajo tierra.

El lombricultivo se construyó con base en los parámetros investigados en la bibliografía para buscar un óptimo rendimiento. Se usaron los siguientes materiales:



Figura 5. Capacitación y educación ambiental.  
Fuente: Elaboración propia.



- Canastas adecuadas para la recuperación de lixiviados y su recolección.
- Residuos sólidos, segregación en el casino.
- Picadillo de los residuos-
- Alimentación estrictamente tres veces a la semana.
- Fuente de energía para los microorganismos: C/N.
- Valores óptimos C/N: 25 – 30.
- Parámetro fijo de humedad y temperatura
- Parámetro estable de pH neutro.

Luego de un periodo de tres meses, se comienza a obtener un buen compostaje o vermicompost. Este se comienza a utilizar en una zona determinada de 4 x 4 metros; se limpia el lugar y se descompacta el suelo afectado, luego se homogeniza el compost con agua y se aplica. En cuatro semanas, ya es evidente la recepción positiva del suelo (figura 7), y se comienzan a ver brotes de pasto. Se realiza un recuadro donde se siembra cilantro, y en un periodo de tres semanas esta hierba aromática crece. Solo en este periodo de tiempo ya es evidente el potencial de la recuperación del suelo por medio de la biorremediación. Una conclusión parcial es que se puede realizar minería sostenible y de forma responsable con el medio ambiente y la sociedad.

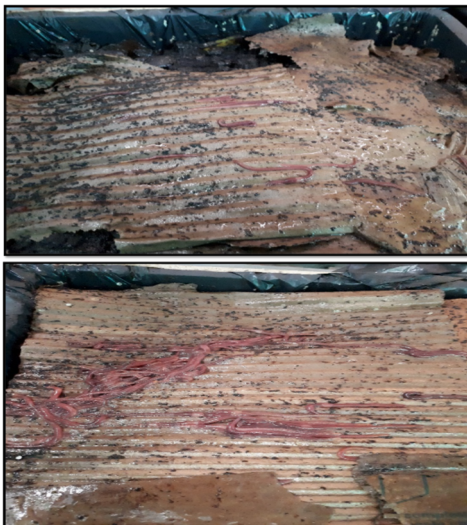


Figura 6. Avance del proceso de lombricultivo.  
Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar el proceso con el compostaje, y la ayuda de la población del lugar que se comprometió con esta actividad, se han implementado siembras de árboles autóctonos del área de explotación, y se han agregado a este abono homogenizado semillas de pasto para rellenar los lugares áridos y erosionados. El resultado es un lugar verde, agradable a la vista y que produce oxígeno. El lugar, además, descontamina la atmosfera del polvo del carbón y otros materiales particulados. Es conveniente destacar que la recuperación de suelos beneficia no solo



Figura 7. Resultados de la aplicación de abono en suelos del predio minero, revegetalización.  
Fuente: Elaboración propia.

al ecosistema, sino que protege la conservación de los servicios ecosistémicos de aguas abajo de la cuenca y preserva los recursos para toda la comunidad.

## Conclusión

- Este proceso permitió encontrar la simbiosis, la relación suelo-micronutrientes necesaria para la reactivación de la microbiota del suelo. Este suelo luego puede ser usado para actividades económicas diferentes a la minería, o simplemente para la producción de oxígeno y la reforestación.

Así, es posible condicionar este lugar como sostenible, en línea con los lineamientos del desarrollo sostenible.

- La aplicación de vermicompost tuvo resultados positivos en los suelos del predio del proyecto minero: se recuperaron los fitonutrientes, y se ha dado un proceso de biorremediación y revegetalización del área. Los servicios ecosistémicos obtenidos son de regulación, sostenimiento, aprovisionamiento y culturales.



Figura 8. Panorámica del proyecto minero luego de nueve meses de aplicación del abono generado por compostaje para la recuperación de sus fitonutrientes, y de la revegetalización.  
Fuente: Elaboración propia.

- Se está acordando con y capacitando, no solo la comunidad minera beneficiaria del proyecto, sino a toda la sociedad involucrada y enmarcada en el área de la mina con prácticas productivas, responsables y transparentes.
  - Se induce a la comunidad a realizar actividades sostenibles y a participar en actividades de bioeconomía. En estas actividades es central la aplicación de elementos naturales para el mismo proceso de recuperación del suelo.
  - La minería sostenible se puede realizar, como se demuestra en este estudio, pero solo si la extracción minera se desarrolla en un entorno natural equilibrado y con un ecosistema en sinergia con su comunidad y fuente de ingresos.
- Con todo lo anteriormente expuesto, y pensando en un escenario en el que esta aplicación fuera más usada y aprovechada en diferentes proyectos de minería pequeña, mediana y a gran escala: ¿Piensas que podemos ser un país

extractivista sostenible con capacidad de desarrollar la ecominería sustentable; construir un país verde y ser ejemplo a nivel mundial?

## Referencias

- FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- FAO. (2003). *On-farm Composting Methods*. Rome. <https://www.fao.org/3/y5104e/y5104e02.htm>
- FAO. (2011). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Sistemas al límite*. <https://www.fao.org/3/cb7654es/cb7654es.pdf>
- FAO. (2012). *FAO-Adapt. Programa marco de la FAO sobre adaptación al cambio climático*. Office of Assistant director-General. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/daf76e5d-d191-5a48-af8e-50efd0773665/>
- FAO. (2015). *Inocuidad y calidad de los alimentos en relación con la agricultura orgánica*. XXII Conferencia Regional de la FAO para Europa; 2000; Oporto. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/38414788-aa61-5974-9bc6-4caf2b239a54/>
- FAO. (2020). *Organic Agriculture. FAOTERM*. <https://www.fao.org/faoterm/viewEntry/es/?entryId=99719>
- MADS. (2021). *Proyecto eliminará el mercurio en la minería pequeña y subsistencia*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4365-proyecto-eliminar-el-mercurio-en-la-mineria-pequena-y-de-subsistencia>
- Naciones Unidas [UN]. (2022). *Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano*. Población Mundial.
- Naciones Unidas [UN]. (2002). *Evaluación mundial sobre el mercurio. Productos químicos*. PNUMA. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12297/final-assessment-report-Nov05-Spanish.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Naciones Unidas [UN]. (2021). *COP26: Juntos por el planeta. Conferencia de las naciones unidas sobre el cambio climático*. <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- PNUMA. (2021). *El convenio de Minamata sobre el Mercurio, tres años de protección de la salud humana y el medio ambiente*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-convenio-de-minamata-sobre-el-mercurio-tres-anos-de-proteccion>
- Sentencia T 455 (2019). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnostico-actividad-minera-y-explotacion-ilicita-expertos.pdf>
- Sepúlveda, J. y Casallas, M. (2018). *Contaminación y remediación de suelos colombiano. Aplicación a la minería de Oro*. Universidad EAN. <https://editorial.universidadean.edu.co/media/acceso-abierto/contaminacion-y-remediacion-de-suelos-en-colombia.pdf>
- Trujillo, Castrillón, V. y Aguirre, Navarro, L. (2016). *Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala)*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional

Abierta y a Distancia UNAD. Ingeniería Ambiental. Manizales, Caldas]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12281/1053803323.Pdf?sequence=1&isAllowed=y>

U. Andes. (2022). *Estrategias para la formalizar la minería a pequeña escala. Facultad de economía. Ambiente y Sostenibilidad*. Universidad de los andes. Bogotá, Colombia. <https://uniandes.edu.co/es/noticias/gobierno-y-politica/estrategias-para-formalizar-la-mineria-artesanal#:~:text=70%20%25%20de%20la%20miner%C3%ADa%20en,contaminaci%C3%B3n%20de%20r%C3%ADos%2C%20entre%20otros>.