

Caracterización y restauración ecológica de suelos en minería de carbón a cielo abierto: antecedentes, técnicas actuales y búsqueda de nuevas técnicas para su tratamiento

Dayanna Oliveros¹, Iván Molina², Kellys Rodríguez³, Luis Díaz⁴

Resumen

La remoción del suelo a causa de la minería de carbón a cielo abierto conlleva la pérdida de las propiedades del suelo y alteración drástica del paisaje, evidenciando la necesidad de caracterizar y la restaurar ecológicamente estos suelos. En este artículo se muestra el análisis realizado a diferentes artículos científicos relacionados con la caracterización y remediación de los suelos afectados por la minería. La restauración ecológica como ciencia moderna proviene del aporte segmentado de ciencias auxiliares que desde los años ochenta vienen aportando conocimiento tanto en el tema de caracterización, como en el porte de conocimiento a las técnicas empleadas.

Palabras clave: estériles, minería, remediación, suelo minero.

1 Estudiante de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar. Estudiante investigadora del grupo de investigación Energía, Ambiente y Biotecnología. Valledupar, Colombia. Correo: dayannaolb@gmail.com

2 Estudiante de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar. Estudiante investigador del grupo de investigación Energía, Ambiente y Biotecnología. Valledupar, Colombia. Correo: molcor17@hotmail.com

3 Ingeniera agroindustrial de la Universidad Popular del Cesar. Estudiante investigador del grupo de investigación Energía, Ambiente y Biotecnología. Valledupar, Colombia. Correo: kellysrodri-guez@unicesar.edu.co

4 Doctor en Ingeniería de la Fundación Universitaria del Área Andina. Docente investigador. Director del grupo de investigación Energía, Ambiente y Biotecnología. Valledupar, Colombia. Correo: ldiaz164@areandina.edu.co

Introducción

El suelo puede definirse como la capa superficial de la corteza terrestre que resulta de la descomposición de las rocas, en el que se mezclan minerales, materia orgánica, aire y agua; y es el medio natural para que se desarrollen las plantas y comunidades de microorganismos que se adaptan a condiciones específicas.

La minería y actividades asociadas generan una gran cantidad de residuos pétreos y lodos ricos en metales pesados que son depositados en la superficie del entorno minero. Así, el suelo original de la mina se degrada o se pierde irreversiblemente. (Becerril et al., 2007)

Esta revisión se realizó con el objetivo de indagar sobre los estudios que han aportado conocimiento sobre la caracterización de lugares afectados por la minería en el componente suelo y la restauración ecológica de áreas afectadas.

Box (1978) propuso la definición de área drásticamente alterada como “aquella superficie de terreno en la cual vegetación y comunidad animal han sido eliminadas y la mayor parte de los horizontes superiores del suelo se han perdido, alterado o enterrado”. En estas

zonas, los procesos normales de sucesión ecológica secundaria pueden requerir períodos de tiempo superiores a la escala de la vida humana para alcanzar la recuperación de la situación original.

Algunas discusiones se encuentran planteadas sobre la caracterización tanto de los suelos no alterados, como de aquellos en los cuales se ha perdido la capacidad de mantener plantas. Arranz (2004), en su estudio doctoral, plantea consideraciones importantes:

Al emplear el concepto de suelo minero, aceptó, como ya lo hicieron Smith y Sobek (1978) y Opeka y Morse (1979), una moderna definición de suelo: el colectivo de cuerpos naturales de la superficie terrestre, en lugares modificados o, incluso, creados por el hombre a partir de materiales terrosos, que contienen materia viva, y soportan o son capaces de soportar plantas en su superficie. (U. S. Soil Conservation Service, 1975)

“Este punto de vista puede aplicarse tanto a los suelos altamente alterados, o hasta los fabricados artificialmente, como a los suelos naturales afectados por cualquier grado menor de alteración” (Smith y Sobek, 1978).

Más estrictamente, también se puede considerar que al finalizar los movimientos de tierras se encuentra en superficie un material que representa el momento cero en la edafogénesis, y las superficies mineras pueden ser consideradas nuevos suelos, que deberán atravesar el completo proceso de evolución y envejecimiento, incluso cuando los materiales expuestos en superficie sean capaces de sostener crecimiento vegetal antes de envejecer. (Lyle, 1978)

Las compañías mineras almacenan el suelo natural durante la fase de la minería del carbón y luego que se complete la minería, se retorna el suelo acopiado en la fase de restauración (Liu y Lal, 2014). Estos tipos de suelos de minas son muy degradados, contienen minerales levemente ácidos a neutro en pH y, por lo tanto, tienen relativamente buena calidad del suelo. La compactación del suelo o de la profundidad del suelo superficial es, a menudo, un problema para el establecimiento de una planta satisfactoriamente (especialmente árboles).

A finales de los noventa, muchas sociedades de las ciencias del suelo tenían definido los suelos en rehabilitación como Entisoles o Inceptisoles. Ejemplo de ello era la Clasificación Taxonómica Alemana (Ahrens y Engel, 1999).

La FAO (2006), a través de la sociedad World Reference Base for Soil Resources (WRB), aceptó el término technosol para referirse a aquellos suelos creados por técnicas utilizadas sobre materiales estériles para sostener plantas o pastos, pero diferenciada de los términos antrosoles e histosoles, y coincidiendo con los términos urban soil y mine soil. Meses después, la International Union of Soil Sciences (IUSS), aceptó el término.

Los estériles mineros y afectación del suelo por minería a cielo abierto

Las propiedades y características

La destrucción de la estructura del suelo previo al minado de los mantos de carbón y la ausencia de esta en el momento de rehabilitación o restauración ecológica de los suelos presenta una de las mayores limitantes. “La compactación reduce la macro-porosidad, aumenta la resistencia a las raíces, impide la infiltración y el drenaje, aireación y otros factores que son perjudiciales para la supervivencia de los árboles y el crecimiento” (Pond, 2005).

Los suelos afectados por extracción de carbón presentan problemas de acidez, comúnmente, de acuerdo con lo

planteado por Monterroso et al. (1999), la oxidación ocurrida es un proceso complejo en la que se produce la oxidación del hierro, los sulfatos, y causa la disolución de otros compuestos como el aluminio; a bajo pH, además de producir drenajes ácidos de mina, se produce la precipitación de minerales ricos en hierro como *ferrihidrita*, *jar osita* y *goetita* (Kim, 2015).

En estériles mineros, usualmente, los contenidos en elementos menores son adecuados para el desarrollo vegetal, y los elementos nutritivos que aparecen en concentraciones limitantes en estos suelos son el N y el P, a los que se une el Ca y Mg en suelos ácidos. (Sandoval, Bond, y Willis, 1973), (Smith, Redente y Hooper, 1987), (Daniels y Zipper, 1988), (Bhumbla et al., 1989).

El pH es un factor esencial, ya que condiciona fuertemente la adsorción de metales. En un estudio realizado por Tyler y Olsson (2001), sobre la movilidad de 60 elementos comprueba que 32 de ellos aumentan su movilidad al incrementar el pH. De los elementos objetos de estudio, arsénico, cromo, cobalto y mercurio presentan un aumento de la movilidad en función del pH,

mientras que para el caso del zinc ocurre lo contrario.

Existen varios ejemplos del uso de los datos de pH como principal discriminante en la calificación de las aptitudes de terrenos alterados por minería de carbón. (Tyner, Smith y Galpin, 1948; Smith et al., 1964).

La problemática de los suelos ácidos deriva en muchos casos de la toxicidad asociada al alto contenido en aluminio, que impide el buen desarrollo radicular. Se ha afirmado que, en suelos ácidos en los que el nivel de nutrientes es adecuado y las cantidades de Al y Mn son bajas, el desarrollo es normal. (Ammons, 1979)

“Las sales que suelen estar presentes en suelos mineros desarrollados sobre estériles de carbón son sulfatos de Na, Ca, Mg y K” (Daniels y Zipper, 1997). Las sales que suelen estar presentes en suelos mineros desarrollados sobre estériles de carbón son sulfatos de Na, Ca, Mg y K. (Daniels y Zipper, 1997).

La materia orgánica es considerada uno de los indicadores más útiles para la evaluación de la calidad y estabilidad del suelo.

Materia orgánica reacciona con los metales formando complejos de

cambio y quelatos. Los metales, una vez que forman complejos, pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente algunos metales que pueden llegar a no ser disponibles por las plantas, como por ejemplo el Cu. La fortaleza de esta unión puede ocasionar carencias de ciertos elementos necesarios para el metabolismo vegetal en plantas que se desarrollan en suelos ricos en materia orgánica (Larson y Pierce, 1994).

Tabla 1. Datos analíticos en los suelos mineros

Perfil	1		2	3	4	5
horizonte	A	C	A	A	A	A
Profundidad (cm)	0-16	16-30	0-26	0-27	0-28	0-29
pH (H ₂ O)	2,8	5,3	3,7	3,1	3,2	3,8
pH (KCl)	2,5	5,1	3,2	2,8	2,8	3,3
C.E. (1:1)(dS/m)	6,9	7,9	6,4	3,0	5,0	2,9
CaCO ₃ (g/kg)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pb biodisponible (mg/kg)	320,0	1203,0	1153,0	187,0	192,0	692,0
Zn biodisponible (mg/kg)	115,1	517,2	414,3	31,7	75,0	154,4
Cu biodisponible (mg/kg)	2,7	3,4	4,1	1,1	1,8	4,1
C.O. (g/kg)	3,7	11,1	49,1	28,6	16,5	5,1
Textura	Franco Arenoso					

C. E.: conductividad eléctrica; **C. O.:** carbono orgánico.

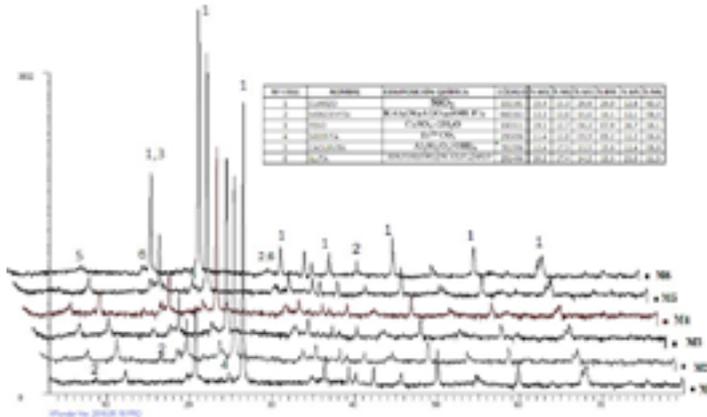
Para conocer la presencia de agregados minerales importantes en el suelo la técnica de difracción de rayos X, reporta los resultados en suelos mineros.

La identificación de una fase cristalina por este método se basa en el hecho de que cada sustancia en estado cristalino tiene un diagrama de rayos X que le es característico.

Estos diagramas están coleccionados en fichas, libros y bases de datos del Joint Committee on Powder Diffraction Standards y agrupados en índices de compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales. (Díaz, Arranz y Peñuela, 2013)

La figura 1 muestra los resultados efectuado a suelos cercanos a las pilas de acopio de carbón.

Figura 1. Difractograma que muestra los minerales identificados y semicuantificados por drx de las muestras: cuarzo (1), moscovia (2), yeso (3), siderita (4), caolinita (5), illita (6)



Fuente: tomado de Díaz, Arranz y Peñuela (2013).

La capacidad de cambio es función del contenido en arcilla y de la materia orgánica. En general, cuanto mayor sea la capacidad de cambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo para fijar metales. El poder sorcitivo para los distintos metales depende de su valencia y del radio iónico hidratado, de manera que a mayor tamaño y menor valencia la fuerza de retención es menor.

Microorganismos como indicadores en la restauración ecológica

Las comunidades microbianas son esenciales para la función del suelo (Mummey, Stahl y Buyer, 2002) y sensible a pequeños cambios que ocurren en el ambiente del suelo debido a la

tensión ecológica o procesos de restauración (Badiane, 2001; Ibekwe y Kennedy, 1998), por lo que son recomendados como indicadores del cambio de las condiciones del suelo o del cambio de la calidad del suelo. Ghose (2004) realizó un estudio en el que evalúa los efectos de la minería en la fertilidad del suelo, encontró que la población microbiana en los vertederos del suelo disminuyó drásticamente en comparación con el suelo sin explotar y además halló una disminución gradual de la población microbiana debido al aumento de la edad de los vertederos de suelo que van desde 1 a 10 años de edad, mostrando una disminución continua cada año y al final del sexto año, el número se redujo a un nivel mínimo. Por análisis estadístico, la

disminución del número de microbios fue significativa hasta el sexto año e insignificante en el año noveno y décimo, en comparación con el sexto año; adicionalmente en este estudio correlacionaron la cantidad de nutrientes encontrados (la cual fue baja a medida que aumentaba la edad de los vertederos) con la población microbiana, encontrando un alto grado de correlación, concluyendo así que la deficiencia de nutrientes fue probablemente causada por la reducción de población microbiana del suelo.

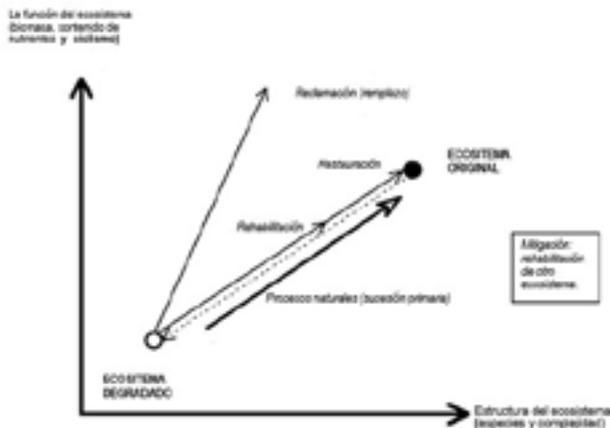
Rehabilitación y restauración

Bradshaw (1982) apuntaba que la minería a cielo abierto afectaba extensas áreas de Gran Bretaña que antes eran de uso agrícola para la extracción de lignito,

Las diferentes opciones para la mejora de un ecosistema degradado se expresan en función de las características de la estructura y función. La restauración se define como la vuelta del ecosistema a su estado original en ambos parámetros. No obstante, existen otras alternativas, que incluyen la rehabilitación, en la cual el ecosistema no se recupera totalmente o el remplazamiento del ecosistema original por otro diferente (usualmente llamado reclamación).

El espíritu inspirador de las prácticas para la corrección de los terrenos cubiertos de estériles mineros o en las áreas de suelos mineros es el mismo, en esencia, que aquel que llevó a acrecentar nuestros actuales conocimientos y al desarrollo de técnicas para la aplicación

Figura 2.



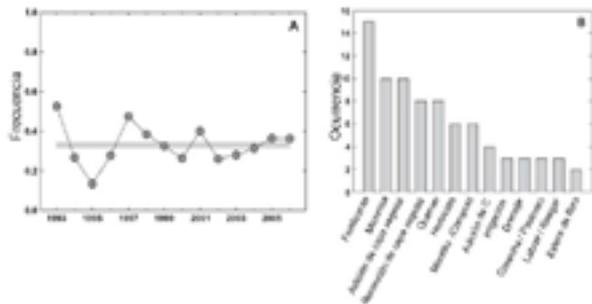
Fuente: Bradshaw (1982).

de enmiendas orgánicas, el encalado y el mulching, los cuales son realizados corrientemente sobre los suelos agrícolas. Shrestha y Lal (2006) resumen las características que deben cumplir las enmiendas orgánicas e inorgánicas en la restauración ecológica de suelos por actividad minera: mejorar las características físico-químicas de los suelos, la fertilidad para establecimiento de cultivos, la producción de biomasa, disminuir la densidad del suelo, la retención de agua como humedad, incrementar la agregación del suelo, permitir el incremento de microorganismos solubilizadores de fosfatos y fijadores de nitrógeno, y la capacidad de intercambio catiónico.

Sin embargo, el abanico de materiales que han sido reconocidos como útiles para la corrección de las carencias edáficas que se dan en estos terrenos se ha ampliado enormemente, y esto se debe en gran medida a los frutos de la investigación invertida en restauración en minería (Arranz, Almorox y García,): los fertilizantes, hidrosiembra, compost, biosólidos, residuos de cosechas, cenizas de incineración, aserrín, estiércol, etc., que retienen la humedad y el apoyo de organismos del suelo liberando

macro y micronutrientes gradualmente a través de la descomposición. La figura 3 evidencia el interés que ha tomado la temática sobre restauración ecológica y los materiales objeto de estudio.

Figura 3. Registro estadístico del seguimiento de trabajos investigativos sobre restauración ecológica entre 1993 y 2006

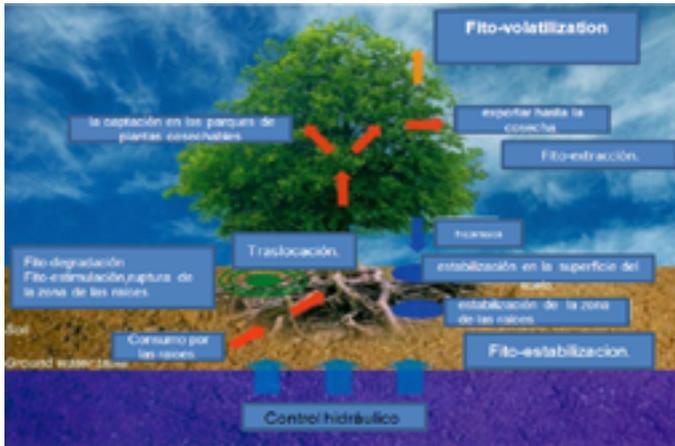


Fuente: tomado de Arranz, J. Almorox y R. de Antonio García ().

Como consecuencia de estas actividades industriales, grandes cantidades de desechos se han generado. Estos desechos contienen metales pesados, tales como cobre, zinc, cadmio, plomo, mercurio, así como el arsénico en niveles que exceden las normas europeas (Arranz, J. Almorox y R. de Antonio García,). Más de 10 km² de tierras son afectadas severamente por estas actividades y ya están contaminadas, las cuales causan alteraciones importantes en la

vegetación, suelo, agua, en la atmósfera y afecta a las personas. Junto con la contaminación química por causa de las emisiones, la disposición de residuos y vertederos de las fábricas sirven como fuentes de distribuciones (Méndez y Maier, 2008)

Figura 4. Diferentes conceptos de remediación de suelos contaminados usando plantas



Fuente: Méndez y Maier (2008).

Uso de microorganismos en la restauración ecológica de los suelos

Durante una perturbación, la pérdida de cobertura vegetal generalmente viene acompañada de la pérdida de muchas de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos, las cuales determinan el establecimiento y productividad de las plantas. Dentro de la afectación biológica de los suelos destaca la reducción del potencial de los simbiontes microbianos mutualistas que son factores ecológicos claves en el ciclo de nutrientes y en el sostenimiento de la

cobertura vegetal en los ecosistemas naturales. (Fajardo et al, 2011)

Estos microorganismos cumplen múltiples funciones dentro del ecosistema, ya que mejoran el crecimiento y salud de las plantas facilitando la absorción de agua y nutrientes, tienen impacto positivo sobre la estabilidad de los agregados del suelo y la infiltración del agua, incrementan la tolerancia al stress hídrico (Barea et al., 1991)

Además, “influyen sobre la diversidad, productividad, estructura de la comunidad de plantas y procesos

del ecosistema” (Van der Heijden et al., 1998).

Adicionalmente, “se ha señalado que la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) podría acelerar la tasa de sucesión de un ecosistema degradado” (Janos, 1980; Allen, 1991; Cuenca et al., 2002). Debido a lo anterior, se considera que estos hongos son un elemento relevante para la recuperación y restauración de los ecosistemas degradados.

Biochar, una alternativa como enmienda para la restauración ecológica

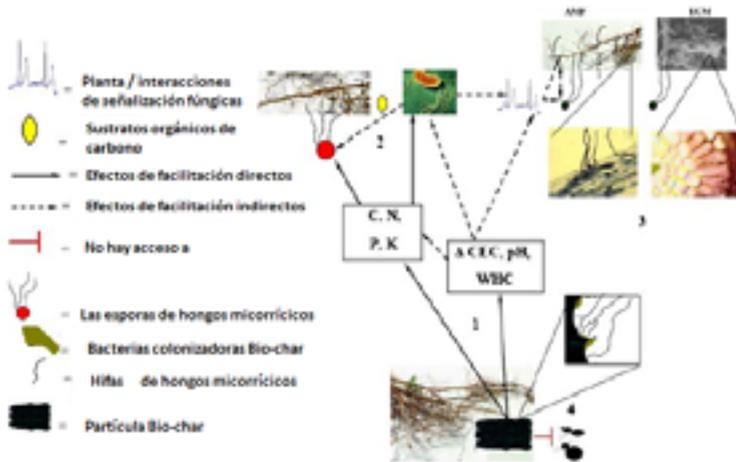
Novedosos estudios evidencian las bondades del biochar en suelos agrícolas improductivos (Major et al., 2010; Lehmann et al., 2007), con diferentes

biomasas estudiadas en su obtención (Lehmann, Rondon y Gaunt, 2006). Los mecanismos que intervienen en la relación del biochar con el suelo y las plantas no están del todo entendidos; y no se conocen aportes en restauración ecológica de suelos mineros.

“Entre las materias primas para la obtención de biochar se destacan las pruebas con residuos de madera, estiércol, hojas, residuos de cultivos, entre otros” (Brick, 2010; Lehmann y Joseph, 2009); “camas de pollo, algas, cascarilla de arroz, nueces y lodos residuales, por lo que el aprovechamiento de residuos del cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), comienza a tomar interés de estudio” (Steiner, 2010).

Figura 5. Representación esquemática del

biochar con efectos directos e indirectos sobre el suelo



Fuente: Warnock, Lehmann y Kuyper (2007).

Algunos de los tipos de suelos donde se ha estudiado la aplicación de biochar incluyen Aridisoles (Lentz y Ippolito, 2012), Luvisoles en Alemania (Kammann et al., 2012), Andosoles en Colombia (Major et al., 2010), Oxisoles de Brasil en el centro de Amazonía (Smyth, y Cravo, 1992), Mollisol, Alfisol y Entisol (Kolb, Fermanich, y Dornbush, 2009), Ferrasoles (Steiner et al., 2008). Los resultados en tecnosoles mineros pueden ser provechosos utilizando materiales edáficos removidos por la minería de carbón en el Departamento del Cesar (Colombia) y biochar obtenido de residuos del cultivo de palma de aceite (figura 6). (Díaz, Arranz y Peñuela, 2013)

La aplicación de biochar tuvo potencial influencia en la agregación del material edáfico utilizado (arreglo SCIB2F Suelo arcilloso + semillas+ 10 t/Ha biochar + 10 t/Ha fertilizante; y SCB2F Suelo arenoso+ semillas+ 10 t/Ha biochar + 10 t/Ha fertilizante).

Conclusión

La restauración ecológica como ciencia moderna proviene del aporte segmentado de ciencias auxiliares que, desde los años ochenta, vienen aportando conocimiento tanto en el tema de ca-

racterización, como en el porte de conocimiento a las técnicas empleadas.

Referencias

- Ahrens, R. y Engel, R. (1999). "Soil Taxonomy and Anthropogenic Soils". En J.M. Kimble, R.J. Ahrens, R.B. Bryant (Eds.), *Classification, Correlation and Management of Anthropogenic Soils: Proceedings-Nevada and California*, Lincoln, N.E. USA-NRCS, NSSS.
- Allen, M. (1991). *The Ecology of Mycorrhizae*. Cambridge, RU: Cambridge University Press.
- Ammons, J. (1979). *Minesoil Properties, Root Growth and Land Use Implications*. (Tesis doctoral), West Virginia University. West Virginia University. Morgantown, Virginia Occidental.
- Arranz, J., Almorox, J. y García, R. () *Análisis crítico de modelos de predicción de la erosión hídrica en minería y obra civil*. *Boletín Geológico y Minero*, 104(4), 422-430.
- Arranz, J. (2004). *Propiedades, clasificación y evaluación de suelos mineros: implicaciones sobre la ordenación y gestión de los terrenos alterados por la minería*. (Tesis doctoral), Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Badiane, N., Chotte, J., Pate, E., Masse, D. y Rouland, C. (2001). Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical region. *Applied Soil Ecology*, 18, 229-238.
- Barea, J., Azcón-Aguilar, C., Ocampo, J. y Azcón, R. (1991). "Morfología, anatomía y citología de las micorrizas vesículo-ar-

- busculares”. En J. Olivares y J. M. Barea (Eds.), Fijación y movilización biológica de nutrientes (pp. 149-173). España: CSIC.
- Becerril, J., Barrutia, O., García, J., Hernández, A., Olano, J. y Garbisu, C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*, 16(2), 1-6.
- Bhumbla, D., Singh, R., Keefer, R. y Burnell, J. (1989). Influence of Sawdust/ Fly ash Mixed with Mine Spoil on Corn Growth and Nutrient Availability, Especialy Biron. *Agron. Abstr.*, 1, 1-32.
- Box, T. (1978). “The Significance and Responsibility of Rehabilitating Drastically Disturbed Land”. En F. W. Schaller y P. Sutton (Eds), *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* (pp. 1-10). Madison, wi: American Society of Agronomy.
- Bradshaw, A. (1982). *The Landscape Reborn*. *Rev. New Scientist*, 30, 901-90.
- Brick, S. (2010). *Biochar: Assessing the Promise and Risks To Guide U.S. Policy*, Madison, Wisconsin: The Natural Resources Defense Council (NRDC).
- Callaham, M., Rhoades, C. y Heneghan, L. (2008). A Striking Profile: Soil Ecological Knowledge in Restoration Management and Science. *Restoration Ecology*, 16, 604-607.
- Cuenca, G., De Andrade, Z., Lovera, M., Fajardo, L., Meneses, E., Márquez, E. y Machuca, R. (2002). El uso de arbustos nativos micorrizados para la rehabilitación de áreas degradadas de la Gran Sabana, Estado Bolívar, Venezuela. *Interciencia*, 27, 65-172.
- Daniels, W. y Zipper, C. (1988). “Improving coal surface mine reclamation in the Central Appalachian region”. En J. Cairns (Ed)., *Rehabilitating damaged ecosystems* (pp. 139-162). Boca Ratón, FL: CRC Press.
- Daniels, W. y Zipper, C. (1997). “Creation and Management of Productive Mine Soils. Reclamation Guidelines”. Virginia: Virginia Cooperative Extension, pp. 121-460. [-confuso. Señor autor, no se entiende qué tipo de document se está citando; favor hacer los ajustes directamente en el texto-]
- Díaz, L., Arranz, J. y Peñuela, G. (2013). Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en la zona carbonífera del Cesar, Colombia. *Interciencia*, 38(1), 42-47.
- Fajardo, L., Cuenca, G., Arrindell, P., Capote, R. y Hasmy, Z. (2011). El uso de hongos micorrizicos arbusculares en las prácticas de restauración ecológica, *Interciencia*, 36, 931-936.
- Faz, A. y Conesa, H. (2004). Soils affected by mining and industrial activities in Cartagena (SE Spain): classification problems. *European Soil Bureau Research. Rep. n.o 7*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2006). “World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication”. FAO, Roma, *World Soil Resours. Rep.* 103.
- Ghose, M. (2004). Effect of opencast mining on soil fertility. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63, 1006-1009.
- Ibekwe, A. y Kennedy, A. (1998). Phospholipid fatty acid profiles and carbon utilization patterns for analysis of microbial community struture under field and greenhouse

- conditions. *FEMS Microbiology Ecology*, 26, 151-163.
- Janos, D. (1980). Mycorrhizae influence tropical succession. *Biotropica*, 12, 56-64.
- Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C. y Müller, C. (2012). Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, methane) fluxes from soils. *J. Environ. Qua*, 41, 1052-1066.
- Kim, Y. (2015). Mineral phases and mobility of trace metals in white aluminum precipitates found in acid mine drainage. *Chemosphere*, 119, 803-811.
- Kolb, S., Fermanich, F. y Dornbush, M. (2009). Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 1173-1181.
- Larson, W. y Pierce, F. (1994). "The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management". En J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek y B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 37-51). Madison, WI: SSSA Special Publication.
- Lehmann, J. y Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management: science and technology*. Londres: Sterling, VA.
- Lehmann, J., Rondon, M. y Gaunt, J. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems. A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403-427.
- Lehmann, J., Warnock, D., Kuyper, T. y Rillig, M. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil. Concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9-20.
- Lentz, R. y Ippolito, J. (2012). Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *J. Environ. Qual*, 41, 1033-1043.
- Liu, R. y Lal, R. (2014). Quality Change of Mine Soils From Different Sources in Response to Amendments. A Laboratory Study. *Environment and Natural Resources Research*, 4, 20-38.
- Lyle, E. (1978). *Surface Mine Reclamation Manual*. Nueva York: Elsevier Science Publishing Co., Inc.
- Major, J., Rondón, M., Molina, D. y Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, 333, 117-128.
- Mendez, M. y Maier, R. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments-an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 16(3), 278-283.
- Monterroso, C., Álvarez, E., Fernández, M. y Macías, F. (1999). Geochemistry of aluminum and iron in mine soils from As Pontes, Galicia (N. W. Spain). *Water, Air, and Soil Pollution*, 110, 81-102.
- Mummey, D., Stahl, P. y Buyer, J. (2002). Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1717-1725.
- Opeka, T. y Morse, R. (1979). "Use of Green Manure Amendments and Tillage to Improve Minesoil Productivity". Industrial Environmental Research Laboratory. Usepa Cincinnati, OH, Tech. Rep. 600/7-791-257.

- Pond, R. (2005). Low elevation riparian forest restoration on a former gravel mine, North Cascades National Park: native plant germination, growth and survival in response to soil amendment and mulches. (Tesis de maestría), University of Washington, Seattle, wa.
- Sandoval, F., Bond, J. y Willis, W. (1973). Lignite mine spoils in the Northern Great Plains. Characteristics and potential for reclamation". En Proc., Res. and Applied Tech. Symposium on Mined-land Reclamation. National Coal Assn., Washington, D.C.
- Shrestha, R. y Lal, R. (2006). Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Environment International*, 32, 781-796.
- Smith, H., Morse, H., Bernath, G., Gillogly, L. y Briggs, W. (1964). Classification and revegetation of strip mine spoil banks. *Ohio Journal of Science*, 64, 168-175.
- Smith, P., Redente, E. y Hooper, E. (1987). "Soil organic matter". En R. D. Williams y G. E. Schuman (Eds.), *Reclaiming mine soils and overburden in the western United states: Analytic parameters and procedures* (pp. 185-213). Ankeny, Iowa: Soil Conservation Society of America.
- Smith, R. y Sobek, A. (1978). "Physical and Chemical Properties of Overburdens, Spoils, Wastes, and New Soils". En F.W. Schaller y P. Sutton (Eds.), *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* (pp. 149-172). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Smyth, T. y Cravo, M. (1992). Aluminum and calcium constraints to continuous crop production in a Brazilian Amazon Oxisol. *Agronomy Journal*, Madison, 84, 843-850.
- Steiner, C., Das, K., García, M., Forster, B. y Zech, W. (2008). Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol. *Pedobiologia*, 51, 359-366.
- Steiner, C. (2010). Las perspectivas de Bio-carbón. Secuestro de carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía. *Palmas*, 31, 116-125, 2010.
- Tack, F. y Meers, E. (2010). Assisted Phytoextraction: Helping Plants to Help Us. *Elements*, 6, 383-388.
- Tyler, G. y Olsson, T. (2001). Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity. *European Journal of Soil Science*, 52, 151-165.
- Tyner, E., Smith, R. y Galpin, S. (1948). Reclamation of strip- mined lands in West Virginia. *J. Am. Soc. of Agron*, 40, 313-323.
- U. S. Soil Conservation Service (1975). *Engineering Field Manual*. Chapter 8, "Terraces". Second Printing. United States Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Van der Heijden, M., Klironomos, J., Ursic, M., Moutoglis, M., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A. y Sanders, L. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396, 69-72.
- Warnock, D., Lehmann, J., Kuyper, W. y Rillig, M. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil. *Concepts and mechanisms*. *Plant Soil*, 300, 9-20.