



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Universidad Autónoma del
Estado de México

Volumen 14 No. 3 (Septiembre-Diciembre 2019): 10-15

INVURNUS

"En busca del conocimiento"

INVESTIGACIÓN

Restauración de terreros cianurados usando zeolita natural enriquecida con fertilizante NPK

Alvarado-Ibarra Juana^{1,2*}, Zamudio-Burgos Lara Angélica², Servín-Rodríguez Jesús Leonel³, Álvarez-Chávez Clara Rosalía^{4,2}, Esquer-Peralta Javier² y Flores-Varela Ramona⁵

¹ Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales. Universidad de Sonora.

² Departamento de Ingeniería Industrial, Posgrado en Sustentabilidad. Universidad de Sonora.

³ Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Sonora.

⁴ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora.

⁵ Departamento de Economía, Universidad de Sonora.

Resumen

Esta investigación muestra una alternativa con potencial para la restauración de terreros cianurados. El experimento se efectuó con cinco macetas de plástico, en las cuales se colocaron material del terrero previamente lavado con hidróxido de calcio, diversas cantidades de zeolita natural tipo chabasita enriquecida con fertilizante triple 17 NPK y semillas de pasto buffel (*Pennisetum ciliare* L). El material del terrero, la muestra testigo y las hojas y raíces de la muestra identificada como T-3D fueron analizados por la técnica de microscopia electrónica de barrido, utilizando un equipo con microsonda de análisis elemental acoplada. Los resultados indican que se logró la incorporación de los nutrientes en la zeolita y sirvió como medio de enriquecimiento al material del terrero, de manera que permitió el crecimiento del pasto buffel a los 77 días de iniciado el experimento, la planta creció en las muestras que contenían zeolita y el mayor crecimiento se dio en la identificada como T-3D. Los análisis a las raíces y hojas del pasto indican una acumulación de Mn, Fe, Cu y Zn mayor en raíz que en hojas. Se concluye que el enriquecimiento efectuado en la chabasita puede ser una buena alternativa para la remediación y recuperación de terreros cianurados abandonados.

Palabras Clave: Chabasita, terrero de lixiviación, remediación.

Restoration of cyanide lands using natural zeolite added with NPK fertilizer

This research shows an alternative with potential for the restoration of cyanide soils. The experiment was carried out in five plastic pots, in each one was placed material of the ground previously washed with calcium hydroxide, several amounts of natural chabazite-type zeolite enriched with triple NPK and buffel grass seeds (*Pennisetum ciliare* L). The material of the ground, the witness sample and the leaves and roots of the T-3D sample were analyzed by scanning electron microscopy technique with coupled elemental analysis microscopy. The results indicate that the incorporation of nutrients in the zeolite was achieved and served as means of enrichment to the material of the ground, so that it allowed the growth of the buffel grass within 77 days of starting the experiment, the plant grew in the samples that they contained zeolite and the highest growth was in that identified as T-3D. Analyzes to the roots and leaves of the grass indicate an accumulation of Mn, Fe, Cu and Zn greater in root than in leaves. We concluded that the enrichment made in the chabazite can be a good alternative for the remediation and recovery of abandoned cyaniders.

Keywords: Chabazite, leaching ground, remediation.

*Autor para envío de correspondencia: Universidad de Sonora. Calle de la Sabiduría, edificio 3C, interior del campus universitario, Hermosillo, Sonora, México, 83000. Tel/Fax: (55) 6622592161, ext. 3008. E-mail: juana.alvarado@unison.mx

INTRODUCCIÓN

En los últimos seis años la industria minera mexicana ha mermado su crecimiento, no obstante, sigue siendo una palanca de desarrollo socioeconómico para el país, a nivel nacional se consolida como el primer productor de plata y esta entre los diez principales productores de plomo, zinc, barita, grafito, yeso, oro, cobre, cadmio, molibdeno, bismuto, fluorita, wollastonita y diatomita (CAMIMEX, 2019). Por lo anterior, se ve a México como el quinto país con el mejor ambiente para hacer negocios mineros y el primer destino en inversión en exploración minera en América Latina (SE, 2019).

Para la explotación mineral se tienen diversos métodos (SGM, 2017), en el caso específico de obtención de oro, la industria minera utiliza constantemente soluciones de cianuro de sodio o de potasio en concentración de 100 a 500 ppm y un pH de entre 10 y 11 (Encinas, 2016). El método patentado desde 1887 para extraer el oro se conoce como "lixiviación en patios", en el cual el mineral se va depositando en varias capas sobre una membrana impermeable, formando el patio de lixiviación o terrero (Guerrero, 2015), y mediante riego por goteo, en un periodo de 30 a 60 días, se libera la solución cianurada que se infiltra por la pila, lixivando a su paso el oro contenido en el mineral (Marroquín, 2015).

Una vez que los metales se han recuperado, el terrero se clasifica como residuo proveniente del minado y debe procesarse según la NOM-157-SEMARNAT-2009, de manera que se evite la liberación de contaminantes y sus posibles afectaciones en la salud de la población (DOF, 2009). La problemática que presentan los cianuros varía según su composición y estabilidad, la forma más tóxica es el cianuro libre (HCN y CN^-), aunque generalmente esta forma no se detecta en residuos mineros, la preocupación radica en las formas complejas de cianuro y la posibilidad de romperse y generar cianuro libre (Gaviria y Meza, 2006). Las concentraciones de cianuro letales para un humano se presentan en la tabla 1 (Ramírez, 2010).

Tabla 1. Concentración de cianuro libre letal para un humano.

Ruta de ingreso	Concentración
Ingestión	1 a 3 mg/Kg
Inhalación	118 a 355 mg/m ³
Adsorción	100 mg/Kg

Fuente: (Ramírez, 2010)

Se sabe que la degradación del cianuro a formas menos tóxicas se da de forma natural o química, la primera consiste

en abandonar el terrero y esperar la degradación a lo largo del tiempo por mecanismos de volatilización, oxidación natural, adsorción en superficies minerales, fotodegradación, reacciones de hidrólisis con la precipitación de compuestos insolubles y biodegradación, mismos que dependen de variables como la irradiación ultravioleta, la aireación o el tamaño de partícula (Fernández, 2007; Restrepo, et al., 2006). Los métodos químicos para detoxificar los terreros pueden ser por desmantelación y tratarlo por lotes o puede consistir en lavar el terrero para sacar el cianuro con peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio o sulfato ferroso (Fajardo, et al., 2010; Figueredo, et al., 2011), ya sea uno u otro lo que se busca es evitar que se de la formación y lixiviación del drenaje ácido junto con la movilidad de metales de los desechos mineros hacia los cuerpos de agua (Chaparro, 2009).

Aunque dichos efectos se dan por la disponibilidad y movilidad de los contaminantes, éstos dependen de la composición del mineral, la escala de operaciones y la cantidad de residuos mineros, así como de las características del entorno, tales como pH, humedad, contenido de arcillas y de materia orgánica del suelo natural (Durán, 2011). Lo que sí es una realidad es que la operación minera tiene impactos y entre las afectaciones ambientales se tiene la pérdida de estabilidad del sistema natural, teniendo como consecuencia directa la ausencia de vegetación, la pérdida de la productividad del suelo, alteración del reciclado biológico y con ello la modificación de la biodiversidad (Puga, et al., 2006; Fernández, 2008; Mena, 2015).

Por lo anterior, existen diversas investigaciones cuyo enfoque es el tratar la contaminación causada en los suelos (Cartaya, et al., 2011). Aunque, el uso de plantas, como todo ser vivo, requieren de un tiempo para adaptarse y ser capaces de colonizar los suelos degradados por las actividades mineras (Wong, 2003), la fitoestabilización tiene potencial para tratar yacimientos mineros, por lo que las plantas tienen una enorme capacidad para ocuparse como fitotecnología medioambiental (Garbisu y Alkorta, 2001; Shing, et al., 2003). El pasto buffel (*Pennisetum ciliare* L) resiste condiciones de humedad deficientes y se considera una especie importante para reconvertir a uso pecuario tierras de bajo potencial agrícola (Loredo, et al., 2005; Vara y Oliveira, 2003; Galaviz y Trejo, 2010).

El suelo se puede enriquecer adicionando componentes como el nitrógeno, potasio y fósforo y a través de sustratos porosos como las zeolitas (López-Romero, et al., 2010), aunado a que las zeolitas también se usan para la eliminación de un gran número de cationes disueltos tanto en solución acuosa como en suelo (Chica-Toro, et al., 2006). Adicional a sus propiedades, las zeolitas como fertilizantes mantienen una liberación lenta de los componentes debido a la estructura porosa y a la retención de agua dentro de éstas (Bansawal, et al., 2006).

Dado que la economía mexicana no se concibe sin la obtención de los productos derivados de la explotación minera, esta industria debe contemplar el uso de buenas prácticas para prevenir riesgos a la salud y al ambiente causados por el cianuro, una vez que se ha extraído el oro o que se encuentre dispuesto de forma inadecuada (Fajardo, et al., 2010; Arias-Lafargue, et al., 2017). Además los procesos deben de encaminarse hacia el cumplimiento de los objetivos de la agenda 2030 hacia la sustentabilidad, como respuesta a la insostenibilidad del actual sistema de producción (Bustos-Flores y Chacón-Parra, 2009). Es en este contexto que la presente investigación tiene el objetivo de usar una chabasita natural enriquecida con fertilizante triple 17 NPK para recuperar terreros mineros contaminados con cianuro y tener como indicador el crecimiento de pasto buffel.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de esta investigación se basa en una metodología experimental. Se trabajó a nivel laboratorio en un proceso de intercambio iónico entre una zeolita enriquecida con fertilizante triple 17 NPK, material de un terrero de lixiviación y semillas de pasto buffel como planta indicadora de la recuperación.

Obtención de muestras

Se tomó una muestra del terrero de la mina abierta Virgen del Carmen, ubicada en la localidad de Divisaderos, Sonora, México; entre las coordenadas geográficas 29° 42' 42.9" norte y 109° 26' 54.2" oeste, la cual extrae oro y plata por medio de cianuración. La muestra de zeolita natural se obtuvo de un yacimiento mineral en la misma localidad, ubicado en las coordenadas geográficas 29° 41' 18.9" norte y 109° 31' 53.1" oeste. Para enriquecer la zeolita se usó un fertilizante comercial identificado como triple 17, que se encuentra compuesto por los macroelementos nitrógeno, fósforo y potasio al 17 % cada uno. Las semillas de pasto buffel se obtuvieron de espacios abiertos de la región árida desértica del municipio de Hermosillo, Sonora.

Acondicionamiento de la muestra del material del terrero

Para reducir la concentración tóxica del cianuro se procedió a lavar la muestra del terrero con una solución de cal comercial y agua desionizada, utilizando una columna de PVC de 4 pulgadas de diámetro por 1.5 m de largo. Se tomaron muestras de 10 mL del efluente de la columna durante cada hora por 5 h y se determinaron los cianuros totales por el método potenciométrico, según lo establecido en la NMX-AA-058-SCFI-2001 (SE, 2001). Una vez lavada la muestra, se extendió sobre una charola plástica y se dejó secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se tomaron

tres muestras de 5 g cada una y se secaron a 100 °C durante 24 h., al finalizar el secado se molieron en un mortero de ágata.

Análisis fisicoquímico del material acondicionado

Para medir el pH se preparó una mezcla del material acondicionado con agua desionizada con una relación peso-volumen (1:25) la cual se agitó magnéticamente durante 5 minutos, se midió el pH directamente en la suspensión obtenida con un potenciómetro Pinnacle series M 555P.

Para la determinación de la proporción de las partículas (arcilla, limo y arena) de la muestra de terrero, se utilizaron tres tamices de diferente luz de malla: 0.035 mm, 0.50 mm y 1.00 mm. La textura se determinó por el método del triángulo textural y por la tabla granulométrica de dimensión de partícula elemental, ambas establecidas por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

Para determinar la conductividad, se preparó una mezcla de 30 g de la muestra con 75 mL de agua desionizada con una relación peso-volumen (1:25), la cual se dejó reposar durante una hora y en seguida se midió la conductividad eléctrica con un conductímetro HACH sension5, por el método AS-18 establecido en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002).

La composición química se analizó por Microscopía Electrónica de Barrido con un equipo JEOL JSM-5410LV con adaptación de sonda de electrones EDX.

Enriquecimiento de la zeolita

Se disolvió 1 kg de fertilizante triple 17 (NPK) en 4 litros de agua desionizada, se dividió en cuatro vasos de precipitados de un litro cada uno y se agitaron a 650 rpm durante tres horas.

La zeolita se molió en una quebradora de quijada y después se pasó por una trituradora giratoria, seguido se tamizó usando una malla de 0.75 mm de abertura.

Se pesaron 2 kg de zeolita tamizada y se colocaron en un recipiente con los 4 litros de fertilizante triple 17 disuelto anteriormente, manteniéndolos en contacto por cinco horas. Al finalizar se filtró y se recuperó la muestra sólida.

Para determinar el ingreso del P y el K en la zeolita, se realizaron análisis por EDX, usando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM-5410LV con adaptador de sonda de electrones. La determinación

del nitrógeno total se realizó por la técnica KJELDAHL en agua, especificado en la Norma Mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010 (SE, 2010).

Desarrollo experimental

Se utilizaron cinco macetas de plástico, identificando un testigo y cuatro tratamientos, tal y como se muestra en la tabla 2. En cada maceta se agregó 1 kg de material del terrero acondicionado más una cantidad de zeolita enriquecida y 1.5 g de semilla de pasto buffel. Los tratamientos se regaron de forma manual dos veces a la semana con 100 mL de agua corriente. Por un período de 11 semanas se monitoreo el crecimiento del pasto buffel, así como la temperatura ambiental, la humedad y velocidad del viento, usando una estación climática KESTREL 3500. A los 77 días se analizó el tejido vegetal de las raíces y las hojas, previamente se secaron a 100 °C durante 4 días, cada muestra se maceró en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino. Posteriormente, las muestras se analizaron por EDX.

Tabla 2. Distribución de los tratamientos.

Tratamientos	Terrero/zeolita enriquecida
T-TD =	1 kg/0 g (testigo)
T-1D =	1 kg/1.105 g
T-2D =	1 kg/2.210 g
T-3D =	1 kg/5.526 g
T-4D =	1 kg/11.053 g

Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH inicial del agua (lechada de cal) del lavado del material del terrero fue de 11.5, al final del proceso el agua tenía un pH de 10. En la tabla 3 se presentan los valores de cianuro que se tuvieron de la hora 1 a la hora 5 de lavado. La concentración de cianuro de la solución utilizada para regar el terrero en la mina Virgen del Carmen es de 350 ppm, y la concentración al finalizar el proceso de lavado fue de 1.4 ppm. Según lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, este parámetro queda dentro del límite permisible para el cianuro en suelo con uso de riego agrícola (DOF, 1997).

Con base en la clasificación de suelos que realiza USDA, la composición del terrero de la mina Virgen del Carmen es mayormente material grueso y arenas (ONU-FAO, 2019), los datos se muestran en la tabla 4. Por otra parte, si se considera la composición de arena, arcilla y limo como la composición total y usando la clasificación textural del triángulo, se tiene un suelo con clasificación tipo arenoso.

Tabla 3. Valor de cianuro obtenido por el Método Potenciométrico.

LMP*	Valor inicial	Hora de lavado	Cianuro (ppm)
2 ppm	350 ppm	1	4.24
		2	2.4
		3	2.16
		4	1.57
		5	1.4

*LMP= Límite máximo permisible en promedio diario para cianuro en suelo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Clasificación textural del terrero de la mina Virgen del Carmen.

Textura del suelo del terrero	Distribución del tamaño de partícula (%)	
Grava gruesa y suelo arenoso	Material grueso	79.5
	Arena	18.97
	Arcilla y limos	1.53

Fuente: elaboración propia

Con base en lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000, el material del terrero tiene un pH de 6.75 y conductividad eléctrica de $1.81 \cdot 10^{-3} \text{dSm}^{-1}$, lo que lo clasifica como un material neutro con nula capacidad para el desarrollo de cultivos.

En la tabla 5 se presentan los valores obtenidos por EDX de la zeolita natural y de la zeolita enriquecida. Se evidencia la incorporación de los nutrientes fósforo y potasio en la zeolita. Comportamiento similar a lo reportado con una clinoptilolita mexicana (López-Romero, et al., 2010).

Tabla 5. Composición química de la zeolita natural y enriquecida.

Óxidos	% masa	
	Zeolita natural	Zeolita enriquecida
SiO	53.1	56.6
Al ₂ O ₃	14.65	15.14
Fe ₂ O ₃	2.80	1.96
MgO	3.18	3.18
CaO	2.93	2.3
Na ₂ O	1.38	1.54
K ₂ O	1.01	4.62
P ₂ O ₅	0.04	6.44
Si/Al	3.19	3.30

Fuente: elaboración propia

Para el caso de nitrógeno, los resultados obtenidos por la técnica KJELDAHL, muestran que el elemento se incrementó aproximadamente un 97%.

En la tabla 6 se presenta el resultado del análisis químico del material del terrero y la muestra del tratamiento T-3D, por ser la que presentó mayor crecimiento del tejido vegetal del pasto buffel. En la composición del material del terrero con zeolita, destaca la presencia del P.

Tabla 6. Composición química del terrero y el tratamiento T-3D.

Elemento químico	Peso (%)	
	Terrero	T-3D
C	18.14	19.23
O	50.73	51.17
Mg	0.40	0.49
Al	4.00	4.49
Si	14.49	14.99
P	-	0.12
K	2.05	2.05
Ca	1.39	1.31
Ti	0.13	-
Mn	1.85	0.61
Fe	2.87	2.90
Cu	1.50	1.35
Zn	1.37	1.25
Pb	1.09	-

Fuente: elaboración propia

En la tabla 7 se presentan los resultados del análisis por EDX a raíces y hojas de la planta del tratamiento T-3D. Se encontró que el mayor crecimiento vegetal se presentó en este experimento, en el cual se obtuvieron hojas de hasta 6 cm de largo y raíces de casi 11 cm, valores dentro de los reportados en bibliografía (Loredo, et al., 2005).

Tabla 7. Composición química de raíces y hojas del pasto buffel del tratamiento T-3D.

Elemento químico	Masa (%)	
	Raíces	Hojas
O	57.83	65.24
Na	1.29	3.94
Mg	0.81	0.68
Al	5.46	2.43
Si	18.95	8.99
P	0.29	0.33
S	0.44	0.93
Cl	0.71	2.48
K	3.35	6.96
Ca	2.05	2.01
Mn	1.11	0.39
Fe	3.30	1.08
Cu	2.59	2.40
Zn	2.01	1.95

Fuente: elaboración propia

Los valores meteorológicos diarios se promediaron por semana, la temperatura promedio fue de 24.7 °C; la humedad relativa mínima registrada fue de 28.2 % y la máxima de 72.2 %, mientras que en la velocidad del viento

se registró una mínima de 2.2 mph y una máxima de 4.7 mph. La planta estudiada muestra las dos estrategias de acumulación tanto en raíz como en la parte aérea, destaca el hecho de la acumulación de Mn, Fe, Cu y Zn mayor en raíz que en hojas, comportamiento similar a lo reportado por Durán (2011). Lo que indica que el pasto buffel puede ser considerado como una especie con potencial fitorremediador y de promover la cobertura vegetal.

CONCLUSIONES

El material del terrero no puede ser denominado suelo, ya que se compone principalmente por material grueso, aun así, la incorporación de nutrientes en la zeolita y mezclarla con el material del terrero permitió el crecimiento del pasto buffel en dos meses y medio. La cantidad de nutrientes NPK del tratamiento T-3D, con una relación 1 kg de material del terrero con 5. 526 g de zeolita enriquecida, fueron los adecuados para el mayor crecimiento del pasto buffel, logrando hojas de hasta 6 cm de largo y raíces de casi 11 cm de longitud. Por lo anterior, la chabasita enriquecida con fertilizante triple 17 puede considerarse como una potencial alternativa para promover la cobertura vegetal y recuperar terreros abandonados.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias-Lafargue, T., Fernández-Compta, D., Sánchez-Rodríguez, Y. y Lasserra-Portuondo, A. 2017. Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. RTQ. 37(3): 461-476.
- Bansiwala, A K; Rayalu, S S; Labhasetwar, N K; Juwarkar, A A y Devotta, S. 2006. Surfactant modified zeolite as a slow release fertilizer for phosphorus. J. Agric. Food Chem, 54: 4773-4779.
- Bustos-Flores, C. y Chacón-Parra, G. B. 2009. El desarrollo sostenible y la agenda 21. TELOS, 11(2): 164-181.
- CAMIMEX. 2019. La industria minera en México. <https://camimex.org.mx/files/8615/5603/1974/Abril2019.pdf>
- Cartaya, O., Reynaldo, I., Peniche, C. y Garrido, M. L. 2011. Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. Rev. Int. Contam. Ambient. 27(1): 41-46.
- Chaparro, E. 2009. Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua. https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/1/35691/Eduardo_Chaparro_agua_y_mineria.pdf
- Chica-Toro, F. d. J., Londoño-Benitez, L. M. y Álvarez-Herrera, M. I. 2006. La zeolita en la mitigación ambiental. Rev. Lasallista Investig. 3(1): 30-34.
- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-1996, <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/60197.pdf>
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-

- RECENAT-2000. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- DOF. 2009. Norma Oficial Mexicana, NOM-157-SEMARNAT-2009. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.htm>
- Durán, P. 2011. Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona.
- Encinas, M. A. 2016. Tratamiento de residuos y jales de procesos de cianuración. GEOMIMET, XLIII(320): 15-22.
- Fajardo, J A; Burbano, D C; Burbano, E J; Apraez, N J; Rosero, M. 2010. Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro en veta en el departamento de Nariño. Rev. Luna azul. 31: 8-16.
- Fernández, B., 2007. Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. s.l.:Universidad de Oviedo.
- Fernández, J.C. 2008. Una aproximación al conocimiento del impacto ambiental de la minería en la Faja Pirítica Ibérica. MACLA. 10: 24-28.
- Figueredo, M; Lubián, T; Alcalá, R; Cortés, N; Hidalgo, E; Martín, D. 2011. Alternativas de tratamiento de efluentes mineros cianurados en el procesamiento de menas auríferas no refractarias. Presentado en IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba.
- Galaviz, L. A. y Trejo, C. R. 2010. Uso de *Cenchrus ciliaris* L. y *Setaria verticiliata* L. en la fitoestabilización de suelos. Rev. Chapingo serie zonas áridas. 10: 27-31.
- Garbisu, C. y Alkorta, I. 2001. Phytoextraction: A cost effective plant-based technology for the removal of metal from the environment. Biores Tech, 77(3): 229-236.
- Gaviria, A. C. y Meza, L. A. 2006. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa Mineros Nacionales, municipio de Marmato, Caldas. Dyna. 73(149): 31-44.
- Guerrero, J. J. 2015. Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. El ingeniero de minas. X(35): 22-25.
- López-Romero, M; Hernández-Espinosa, M A; Barahona-Argueta, C R; Martínez-Guerrero, M A; Portillo-Reyes, R; Rojas-González, F. 2010. Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Terra Latinoamericana. 28(3): 247-254.
- Loredo, C., Beltrán, S., Villanueva, J. y Urrutia, J. 2005. Establecimiento de pasto buffel para el control de la erosión hídrica, México, D.F.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Marroquín, A. J. 2015. Evaluación de la estabilidad física del Pad de lixiviación N°. 2: unidad minera Chihuahua. <http://repositorio.uni.pe/handle/uni/5265>
- Mena, I. 2015. Efecto sobre el medio ambiente de la explotación del yacimiento de calizas El Pilón. Ciencia y Futuro. 5(4): 84-97.
- ONU-FAO, 2019. Taxonomía de suelos. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- Puga, S; Sosa, M; Lebgue, T; Quintana, C; Campos, A. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Ecol. Apl. 5(1-2): 149-155.
- Ramírez, A. 2010. Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. Anales de la Facultad de Medicina. 7(1): 54-61.
- Restrepo, O. J., Montoya, C. A. y Muñoz, N. A. 2006. Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de *p. fluorescens*. Dyna. 73(149): 45-51.
- SE. 2001. NMX-AA-058-SCFI-2001 <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166784/NMX-AA-058-SCFI-2001.pdf>
- SE. 2010. NMX-AA-026-SCFI-2010. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- SE. 2019. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- SGM. 2017. Servicio Geológico Mexicano, explotación minera. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html
- Shing, O V; Labana, S; Pandey, G; Budhiraja, R; Jain, R K. 2003. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil. App. Microbiology and Biotech. 61: 405-412.
- Vara, M. N. y Oliveira, H. M. 2003. Metal hyperaccumulation in plants- Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. Electronic J. of Biotech. 6(3):286-305.
- Wong, M. H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere. 50: 775-780.