



Recuperación ambiental de terrenos contaminados mediante técnicas mineralúrgicas y metalúrgicas

Carlos Sierra Fernández, Ramón Villa Menéndez, Felipe González Coto, Juan M^a Menéndez Aguado, José Luis R. Gallego

Grupo de Biotecnología y Geoquímica Ambiental, Campus de Mieres. Universidad de Oviedo.

La existencia de terrenos de gran extensión afectados por contaminación con metales pesados (antiguos distritos mineros, terrenos industriales, etc.) ofrece grandes posibilidades de innovación tecnológica para la regeneración de los mismos. Así, el objetivo de este artículo es dar a conocer tecnologías que, siendo habituales en el sector minero y metalúrgico, comienzan poco a poco a ser aplicadas en el ámbito medioambiental. Para ello, se presenta una síntesis de la aplicabilidad de algunos procesos mineralúrgicos y metalúrgicos relacionados con la recuperación de terrenos contaminados.



La problemática derivada de la contaminación de terrenos constituye uno de los problemas ambientales que más atención han reclamado por parte de empresas e investigadores en los últimos años. Así como en la temática de las aguas contaminadas, la legislación y las aproximaciones técnicas y científicas poseen un recorrido extenso, el tema de los suelos había permanecido hasta los años 90 en segundo plano a pesar de encontrarnos en un país amenazado por la desertificación y por los usos indebidos del suelo. No obstante, a raíz de hechos tales como el accidente de Aznalcóllar o incluso la catástrofe del Prestige (no olvidemos que las arenas de playa son otro tipo de suelo) se ha puesto en primera línea la problemática que nos ocupa. Como consecuencia, en diversos proyectos se han venido realizando inventarios de suelos contaminados; se han puesto en marcha iniciativas legales por parte de varias Comunidades Autónomas; y, por último, se ha publicado el Real Decreto 9/2005 que regula la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo, y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

Pese a que en la citada legislación se preconiza la utilización de tecnologías de recuperación innovadoras, lo cierto es que las soluciones aportadas al problema se reducen en general al transporte a vertedero, estabilización y, en unos pocos casos, a la aplicación de técnicas más avanzadas tecnológicamente ya sean biológicas, térmicas o físico-químicas, destacado entre estas últimas las técnicas de lavado de suelos.

Tanto es así que en lo que se refiere al mundo empresarial, aunque un buen número de compañías en España incluyen como una de sus principales actividades los trabajos sobre “Suelos Contaminados”, este número se reduce drásticamente cuando se trata de que ejecuten trabajos de remediación/recuperación de suelos y, finalmente, solo un número bajo “declaran”, por ejemplo, haber realizado tratamientos de lavado. En concreto, ejemplos recientes de los que se ha

En diversos proyectos se han venido realizando inventarios de suelos contaminados

tenido información son los realizados en Lezo (Guipúzcoa), El Grao (Valencia) y Santurce (Vizcaya) todos ellos mediante maquinaria de lavado móvil (en el segundo caso, previo a la realización de una desorción térmica). En todos estos casos se han tratado terrenos afectados con hidrocarburos; existiendo, por otra parte, gran interés en el sector en encontrar tecnologías adecuadas para metales pesados.

En la línea de dar respuesta al creciente interés mostrado tanto por empresas como administraciones (tanto nacionales como internacionales) en lo que al tema del procesado de suelos contaminados se refiere, el empleo de conocidos procedimientos de la industria mineralúrgica y metalúrgica constituye una meta más para un sector como el minero acostumbrado a tratar con problemas similares a aquellos que se plantean en el tratamiento de suelos contaminados. Baste, para ello, señalar los progresos que en los últimos años han tenido lugar en el tratamiento de yacimientos de cada vez más bajas leyes y de menas más complejas, los cuales pueden aportar importantes novedades a las tecnologías del tratamiento de suelos contaminados por metales pesados.

PROCESADO MINERALÚRGICO

El objetivo de este tipo de procesado es la separación, según diferencia de las propiedades físicas, con el fin de obtener una reducción del volumen total de suelo contaminado (lavado de suelos [Anderson R., Rasor, E., 1998]). En líneas generales, son de aplicación a la descontaminación de suelos las técnicas de separación que se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Modificado de EPA (1994) y Dermont et al., (2008).

	Separación por tamaños	Clasificación por velocidad de sedimentación	Separación gravimétrica	Separación magnética	Flotación
Principios básicos	Varios diámetros abiertos: paso de partículas de diferente tamaño efectivo	Diferentes ratios de sedimentación debido al tamaño, forma o densidad	Separación debido a diferencias de densidad	Susceptibilidad magnética	Propiedades superficiales de las partículas
Ventajas	Alto nivel de procesamiento continuo con equipos baratos y simples.	Alto nivel de procesamiento continuo con equipos baratos y simples.	Alto nivel de procesamiento continuo con equipos baratos y simples.	Recuperación de una amplia variedad de materiales cuando se utilizan en terrenos con propiedades muy diferentes.	Efectivo para partículas finas.
Limitaciones	Sistemas frágiles, los procesos en seco producen polvo.	Proceso dificultoso cuando existen altas proporciones de arcillas, limos y materiales húmicos.	Proceso dificultoso cuando existen altas proporciones de arcillas, limos y materiales húmicos.	El proceso conlleva costes operacionales altos e inyección de capital.	Las partículas deben estar presentes en bajas concentraciones.
Equipos	Parrillas, tamices y trómeles.	Hidrociclones	Mesas de sacudidas, espirales y jigs.	Electroimanes o filtros magnéticos	Columnas de flotación por aire o celdas.

Como ejemplo de este tipo de tratamientos, se expone el resultado de tratar en un banco de hidrociclones un suelo afectado por una contaminación multicomponente

Las ventajas principales de estos métodos son la simplicidad, el bajo coste, y la variedad de tratamientos posibles, lo que permite una gran flexibilidad. Por el contrario, es un inconveniente la necesidad de una diferencia clara de propiedades entre agregados de suelo, la generación de polvo cuando se trabaja en seco y, finalmente, el mejor funcionamiento, cuando las concentraciones de contaminante son altas y los suelos presentan contenidos bajos en limos y arcillas.

Obviamente, debe tenerse presente que un suelo no es una mena, y aunque pueda ser procesado por este tipo de sistemas, la presencia de materia orgánica y de un elevado porcentaje de arcillas pueden perjudicar gravemente los procesos de separación física. De hecho, las arcillas (debido a su elevada relación superficie-volumen) y la materia orgánica (forma complejos organometálicos), son componentes muy activos químicamente, de modo que gran parte de los contaminantes se encuentran adheridos normalmente a su superficie (Figura 1).

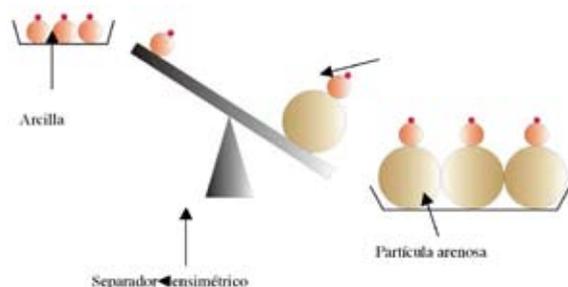


Figura 1. En la figura se representa el efecto de desclasificación sufrido durante el tratamiento de algunos suelos en el laboratorio. La elevada actividad de las partículas arcillosas y de la materia orgánica hace de ellas un problema, ya que al quedar adheridas a las partículas más gruesas, y poseer, también, la mayor proporción de elementos contaminantes, incrementan el volumen de los desclasificados al formar partículas de una densidad global menor.

Como posible solución a este problema -cuando los suelos presentan concentraciones elevadas de materia orgánica- generalmente debería efectuarse un tratamiento previo de oxidación de la misma; normalmente, por simple combustión (controlando esta temperatura para evitar la formación de materiales refractarios poco reactivos al lavado químico) o con algún oxidante, por ejemplo peróxido de hidrógeno. Tras este tratamiento, y a fin de reducir el efecto de desclasificación generado por las arcillas a la vez que disminuir el consumo de reactivos, se introduce el suelo en un tanque con agitación mecánica ('scrubbing'), en presencia de algún dispersante, como pueden ser disoluciones de alófono, hexametáfosfato de sodio; nitrato de circonio; o incluso, si no se desean aditivos químicos, ultrasonidos.

Si se siguen estos tratamientos previos las características del suelo resultarán ya aptas para su tratamiento por medios de separación mineralúrgicos, tales como espirales, concentradores multigravimétricos o, incluso, por medio de flotación por espumas. Un caso paradigmático es la planta de tratamiento de suelos "King of Prussia", en Nueva Jersey (EE.UU), donde se trataban, por procedimientos mineralúrgicos, 25 t/h de suelo y se incluía, como una de las etapas de lavado de las arenas, la flotación por espumas (USEPA,1995).

Como ejemplo de este tipo de tratamientos, se expone en la tabla 2, el resultado de tratar en un banco de hidrociclones un suelo afectado por una contaminación multicomponente resultado de la actividad industrial de la tostación de las piritas. El trabajo, realizado en el laboratorio de los autores, tiene como primer paso un estudio de viabilidad para construir la tabla de recuperaciones y rendimientos de los resultados obtenidos en el estudio en planta piloto; en ellos, por lo general, se buscarán las condiciones óptimas de concentración; es decir, aquellas que maximicen la recuperación y minimicen el rendimiento (Sierra et al., 2009).

PROCESADO METALÚRGICO

Entre los ámbitos de trabajo de la metalurgia (Figura 2), destaca, por su interés en la descontaminación de suelos por metales pesados, el hidrometalúrgico, estando muy extendidos por ejemplo los procesos de lixiviación y electrolisis. Por otra parte, la pirometalurgia suele quedar relegada al tratamiento de escorias, cenizas y demás residuos industriales, los cuales tienen un mayor contenido en metales (todo esto siempre matizado desde el punto de vista experimental).



Recuperación hidrometalúrgica

En nuestro caso es una de las técnicas que mejores posibilidades ofrece en la medida que el material a tratar (suelo) podrá tener concentraciones reducidas de metales, y estos procedimientos se adaptan perfectamente a esta característica. Dentro de ellos describiremos el de lixiviación, solubilización de los metales presentes el suelo para su posterior recuperación, cuya naturaleza se encuentra gobernada, principalmente, por los parámetros de pH y potencial de oxidación reducción. Las variantes de este método son muchas, siendo las que se recogen en el cuadro (Tabla 3) su medio de operación más general.

Uno de los aspectos que condiciona la lixiviación de escombreras para su descontaminación, es el hecho de que para que la cinética y la eficiencia de la descontaminación sean adecuadas puede resultar precisa una cominución (molienda) adicional a la que ya se efectuó en su día para el beneficio del mineral- cuestión esta que condiciona mucho los costes.

Otra variante prometedora de los procesos de lixiviación y que se desarrolla a partir de los años 50, es el empleo de cepas bacterianas (biolixiviación). Un ejemplo habitual de biolixiviación es el que tiene lugar como consecuencia de la formación de las aguas ácidas de mina; en este caso, los sulfuros inorgánicos son reducidos a sulfatos, y el hierro ferroso a férrico, mediante la acción catalizadora de bacterias, tales como el *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Este procedimiento, a escala industrial no se encuentra aún lo suficientemente desarrollado, a la espera de la selección de las cepas bacterianas, más resistentes y con mayor competitividad natural por el medio natural (resistentes a otros microorganismos).

Condiciones de trabajo				Recuperación			
Diámetro de la punta (mm)	Presión (Kp/cm ²)	Ensayo	Rendimiento	As	Cd	Hg	Pb
9,5	1	P1	0,66	0,43	0,41	0,38	0,40
		R1	0,34	0,57	0,59	0,62	0,60
9,5	2	P2	0,73	0,53	0,49	0,48	0,49
		R2	0,27	0,47	0,51	0,52	0,51
9,5	3	P3	0,71	0,51	0,51	0,50	0,49
		R3	0,29	0,49	0,49	0,50	0,51
3	1	P4	0,69	0,39	0,42	0,37	0,42
		R4	0,31	0,61	0,58	0,63	0,58
3	2	P5	0,77	0,49	0,52	0,50	0,51
		R5	0,23	0,51	0,48	0,50	0,49
3	3	P6	0,82	0,55	0,56	0,58	0,56
		R6	0,18	0,45	0,44	0,42	0,44

Tabla 2. Recuperaciones y rendimientos obtenidos para seis ensayos bajo distintas condiciones de presión y diámetro de punta en un banco de hidrociclones en el test de tratamiento de un suelo contaminado. "P" simboliza punta, y "R" rebose. Recuperaciones y rendimientos en tanto por uno. Se desean encontrar las condiciones de concentración; o lo que es lo mismo, aquellas puntas o reboses en los que las recuperaciones para los diversos metales sean mayores que el rendimiento. El criterio para ponderar la importancia de cada metal vendrá dado por criterios técnicos, económicos o medioambientales

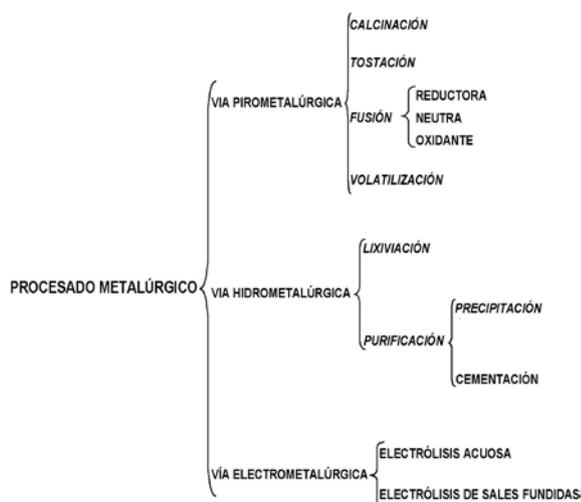


Figura 2. Resumen de los procesos metalúrgicos.

Procedimiento	Descripción	Características	Esquema
In situ	Inyección de la solución lixivante directamente sobre el suelo contaminado	<ul style="list-style-type: none"> –Bajo coste. –Efectividad menor que la de otros sistemas. –Es preciso un conocimiento muy profundo de la geología de la zona para evitar las pérdidas de líquido lixivante. 	
Pilas	Percolación del líquido lixivante sobre montones contruidos al efecto.	<ul style="list-style-type: none"> –Mejor control del fluido lixivante. 	
Tanques	Ataque del suelo en recintos estancos con productos altamente corrosivos.	<ul style="list-style-type: none"> –Mayor coste de todos los sistemas. –Mejor recuperación. 	

Tabla 3. Procedimientos seguidos para la puesta en contacto del suelo con el lixivante.

Figura 3.
Formación
de agua ácida
de mina en
Los Ruedos
(Asturias)



También en línea biotecnológica, se están efectuando en la actualidad nuevas e interesantes aportaciones al sector ambiental, con el desarrollo de tecnologías como la biovolatilización: recuperación y eliminación de metales en las fases líquida y sólida por gasificación, por ejemplo, la reducción-volatilización de los iones de mercurio por la Hg-reductasa en mercurio elemental; o la biosorción: eliminación y recuperación de metales por adsorción a la superficie de las células de las bacterias, levaduras, hongos o algas (Brierley, 1990).

Sea como fuere, téngase presente que todos los procesos de lixiviación expuestos precisan de otros destinados a recuperar el metal de la solución formada. Omitiendo para simplificar las fases de purificación (con menor interés para la descontaminación de suelos) y de concentración, cabe destacar entre la gran variedad de procedimientos posibles para la recuperación del metal contaminante, aquellos de cementación, precipitación por gas, la electro-deposición, y la biomineralización.

Los procedimientos de cementación y de recuperación por gas tienen en común que permiten la precipitación de los cationes metálicos presentes en la disolución acuosa mediante la reducción de los mismos por medio de otro metal más electronegativo en el caso de la primera; o un gas, en el de la última, generalmente, el hidrógeno.

En cuanto a la electrodeposición, ésta se produce debido al desplazamiento de los iones positivos hacia el

cátodo, y el de los iones negativos hacia el ánodo, produciéndose la deposición de los metales presentes en la solución en la superficie del cátodo.

Por último la biomineralización (Boskey, 1999), ofrece la posibilidad de la solidificación y recuperación de metales en la fase líquida por mineralización; por ejemplo, la solidificación por reducción de iones de óxidos metálicos (Se, Te, etc.) al estado elemental.

Procesado pirometalúrgico: tratamiento de los metales contenidos en lodos y escorias

La pirometalurgia, en la medida de que se ha sido muy desarrollada para el beneficio de los metales (es la primera de las técnicas metalúrgicas conocidas), no ofrece grandes oportunidades para el tratamiento de suelos, pero sí para el tratamiento de lodos—que pueden haberse generado en el proceso de tratamiento mineralúrgico del suelo—, así como de otro tipo de residuos como pueden ser las escorias.

A grandes rasgos, los procedimientos susceptibles de ser empleados pueden ser de dos tipos: fusión oxidante y fusión reductora; mientras en la primera se persigue obtener una mata y una escoria; en la segunda lo que se busca es reducir las materias oxidadas por medio de algún agente reductor, generalmente, el carbono o sus compuestos para obtener el metal fundido.

En cuanto a su aplicabilidad, dos tipos de procesado pirometalúrgico se encuentran en posición de ser desarrollados a fin de ponerlos a disposición de la descontaminación de suelos:

- El pretratamiento de los materiales como preparación para su ulterior transformación.
- El tratamiento de los materiales para convertirlos a compuestos metálicos y rechazar componentes indeseables (Figura 5).

Todos los procesos de lixiviación expuestos precisan de otros destinados a recuperar el metal de la solución formada



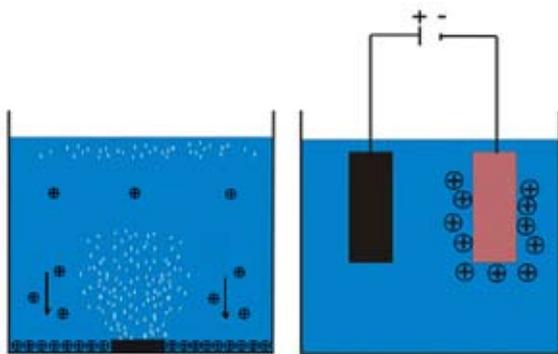


Figura 4. Procedimientos empleados para la recuperación de los metales de las disoluciones acuosas. De izquierda a derecha: precipitación por gas y electrodeposición

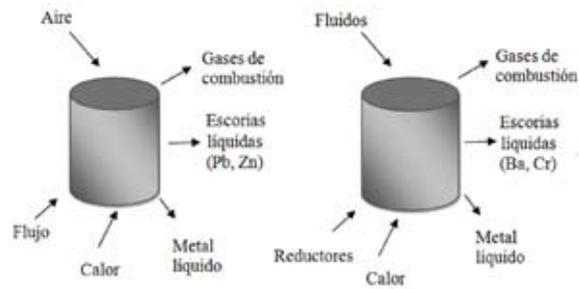


Figura 5. Esquema general del proceso pirometalúrgico: fusión oxidante y fusión reductora.

Sin embargo, si bien esta tecnología presenta una serie de ventajas, entre las que se encuentran: las elevadas velocidades de reacción y, por lo tanto, productividades; su adecuación para alimentaciones heterogéneas; la decomposición de la materia orgánica; o incluso, las posibilidades de obtener un subproducto comercializable. También presenta las desventajas de poseer un elevado consumo energético y, por lo tanto, elevado coste; generar problemas medioambientales, consecuencia de los gases generados en el reactor (sobre todo arsénico y mercurio, en caso de estar estos presentes); y no resultar del todo adecuada para el tratamiento de bajas concentraciones de metales, al poseer dependencia excesiva tanto de las concentraciones de los metales presentes, como de la forma física y química de la matriz.

La complejidad de este tipo de procesos, unida al elevado coste que requiere el tratamiento, hacen que rara vez se emplee en la descontaminación de suelos, si bien es preciso remarcar que su uso se ha extendido en las operaciones de reciclaje de escorias o cualquier otro tipo de residuo rico en metales; es decir, aquellas de las que se derive un procesado útil, y cuya naturaleza se muestra, generalmente, separada del concepto habitual de suelo.

CONCLUSIONES

Las técnicas de lavado de suelos son procedimientos para eliminar los contaminantes, concentrándolos en un menor volumen de suelo; para ello, se emplean métodos físicos: separación por tamaño de las partículas, separación gravimétrica, atrición, etc. que guardan una estrecha relación con las técnicas empleadas en la pre-

paración mecánica de los minerales –mineralurgia- y que explotan las diferencias entre partículas del suelo, como el tamaño, la densidad, el magnetismo, características superficiales etc.; o aditivos químicos, en cuyo caso se establece un claro paralelismo entre las mismas y las técnicas hidrometalúrgicas. Todo ello hace que la experiencia acumulada durante años por el sector minero, constituya una oportunidad más para que sus empresas diversifiquen y transfieran tecnológica y recursos humanos a un sector aún poco explorado. ■

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson R., Rasor, E., 1998. Particle size separation via soil washing to obtain volumen reduction. *Journal of Hazardous Materials* 66, 89-98.
- Boskey A., 1999. Biomineralization: conflicts, challenges, and opportunities. *Journal of Cellular Biochemistry* 72, 83–91.
- Brierley, C. L. 1990. Bioremediation of metal contaminated surface and groundwater. *J. Geomicrobiol.* 8, 201-223.
- Dermont, et al., 2008. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *J. Hazardous Materials* 152, 1-31.
- Sierra et al., 2009. Análisis de viabilidad del lavado de suelo contaminado con cenizas de pirita en una antigua instalación industrial. Libro de Actas VII Congreso Ibérico de Geoquímica, Soria.
- USEPA, 1994. Recycling and Reuse of Material Found on Superfund Sites. (EPA/625/R-94/004).
- USEPA, 1995. Soil Washing Treatment, Engineering Bulletin. (EPA/540/2-90/017)