



Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina

Hans Sgier ingeniero civil y alumno del Programa de Doctorado del Departamento de Geología de la Universidad de Huelva
Francisco Macías doctor en Ciencias Geológicas e investigador contratado del Departamento de Geología de la Universidad de Huelva
José Miguel Nieto doctor en Ciencias Geológicas y profesor titular del Departamento de Geología de la Universidad de Huelva
Tobias T.S. Rötting doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y consultor senior en Schlumberger Water Services

La contaminación de agua, de suelo y de aire como consecuencia de las actividades humanas es uno de los principales problemas a los que hay que enfrentarse en la sociedad actual. De todos estos, el impacto causado por el drenaje ácido de mina es una de las formas más graves de contaminación de aguas superficiales y subterráneas por su extensión, naturaleza y dificultad en la resolución dada su gran complejidad. Un notable ejemplo de esta problemática es la Faja Pirítica Ibérica, situada al suroeste de la Península Ibérica, una de las mayores provincias metalogénicas de sulfuros masivos del mundo. Como consecuencia de esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo proponer un conjunto de criterios para diseñar una planta para el tratamiento pasivo de aguas ácidas de mina a escala real, aplicando la tecnología DAS en un vertido asociado a la mina Monte Romero (Almonaster la Real, Huelva), con objeto de contribuir a la descontaminación del arroyo de Monte Romero, el cual desemboca en el embalse del Olivargas, en la parte alta de la cuenca del río Odiel.

Palabras clave

Drenaje ácido de mina, tratamiento pasivo, sustrato alcalino disperso (DAS), Faja Pirítica Ibérica (FPI).

Design of a pilot plant for the passive treatment of acid mine drainage

The pollution of water, soil and air as a result of human activities is one of the main problems we have to face in today's society. From them, the impact associated to acid mine drainage is one of the most severe forms of pollution of surface and groundwater due to its size, nature and difficulty in solving, given its high complexity. A notable example of this problem is the Iberian Pyrite Belt, located in the southwest of the Iberian Peninsula, one of the most important metallogenic provinces of massive sulphides in the world. As a result of this problem, this paper aims to propose a set of criteria to design a plant for the passive treatment of acid mine water. In this paper we designed a full-scale passive treatment plant using DAS technology to treat a spill associated with the Monte Romero mine (Almonaster la Real, Huelva, Spain), in order to contribute to the restoration of the Monte Romero stream which flows into the Olivargas reservoir in the upper of the Odiel river basin.

Keywords

Acid mine drainage, passive treatment, dispersed alkaline substrate (DAS), Iberian Pyrite Belt (FPI).



1. Introducción

El drenaje ácido de mina (en adelante AMD, por sus siglas en inglés, *acid mine drainage*) es agua contaminada por la oxidación de sulfuros metálicos, originada por la explotación minera, ya sea superficial o profunda. El AMD de la Faja Pirítica Ibérica (FPI) típicamente tiene alta acidez y niveles elevados de sulfato y metales pesados, principalmente hierro, aluminio y zinc. Debido a la alta cantidad de hierro, el drenaje ácido de mina a menudo tiene un color rojizo. El tratamiento de estas aguas puede realizarse mediante dos enfoques genéricos:

- Tratamiento activo. Consiste en la aplicación de métodos que requieren el suministro continuo de reactivos químicos (por ejemplo cal viva) y energía artificial para la mejora de la calidad del agua. Este tratamiento, aunque eficaz, suele ser muy costoso por los reactivos y los equipos que utiliza y por el mantenimiento o control diario que necesita.

- Tratamiento pasivo. Implica el tratamiento del AMD en sistemas de flujo gravitacional (sin bombeo) que contienen materiales naturales (abono, piedra caliza, etc.). Los sistemas pasivos mejoran la calidad del agua por medio de reacciones biogeoquímicas sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa, lo cual da como resultado una opción más económica para descontaminar estas aguas. Además, solo requiere de un mantenimiento infrecuente (aunque regular). Los sistemas de tratamiento pasivo tradicionales como drenajes óxicos de caliza (*oxic limestone drains*, OLD), Drenajes anóxicos de caliza (*anoxic limestone drains*, ALD), sistemas reductores y generadores de alcalinidad (*reducing and alkalinity producing systems*, RAPS), son propensos a colmatarse (atascarse) y a pasivarse (perder la reactividad) cuando se usan para tratar aguas con elevada acidez y carga metálica, típicas características de los AMD de la FPI.

Con el fin de superar estos problemas se desarrolló el sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS, de las siglas en inglés *dispersed alkaline substrate*) (Rötting *et al.*, 2008a). El DAS consiste en un reactivo alcalino de grano fino tal como la arena caliza (DAS-calizo) o polvo de MgO (magnesia cáustica; DAS-magnésico) mezclado con una matriz inerte de grano grueso (por ejemplo virutas de madera). El reactivo de grano fino tiene una alta reactividad (alta velocidad de disolución) reduciendo por lo tanto los problemas de pasivación (pérdida de reactividad). Las virutas de madera tienen alta permeabilidad por el gran tamaño de poro que proporciona a la mezcla y disminuyen de esta forma los problemas de colmatación.

Basándose en esta tecnología, se muestra en el presente trabajo el diseño de una planta para el tratamiento de aguas ácidas de la mina abandonada de Monte Romero, en la parte española de la FPI, donde el AMD tiene un origen subterráneo y contamina el arroyo de Monte Romero, que finalmente desemboca en el embalse de Olivargas.

El AMD de Monte Romero se caracteriza por un bajo pH (promedio de 3,3), contenidos promedios de 400 mg/L de Fe (~95% Fe(II)), 395 mg/L de Zn, 105 mg/L de Al, 22 mg/L de Mn, 3670 mg/L de SO_4^{2-} y 0,1-1,5 mg/L de Cu, Co, Ni, Cd, As y Pb, con una acidez total de 2.020 mg/L equivalentes en CaCO_3 . El caudal promedio del vertido es de 2 L/seg. Las dimensiones de la planta de tratamiento se calcularán con el objetivo primordial de obtener una total retirada de metales trivalentes (Fe y Al principalmente). Los criterios de diseño y dimensionamiento se basan en la experiencia de las investigaciones previas sobre la tecnología DAS (Rötting *et al.*, 2008a y b; Caraballo *et al.*, 2009 y 2011; Macías *et al.*, 2012).

Figura 1. Localización de Cueva de la Mora en la provincia de Huelva. En la parte superior derecha se muestra el detalle de la salida del AMD del túnel de la Mina de Monte Romero.



2. Objetivos

Los objetivos que se plantean son:

- Diseñar una planta piloto de tratamiento pasivo de aguas ácidas a escala real, basada en los resultados de los diversos trabajos previos sobre el tratamiento de las aguas ácidas en plantas experimentales DAS.
- Dimensionar la planta para tratar 2 L/seg (172,8 m³/ día) de AMD con altas concentraciones en metales pesados y bajo pH.
- Evaluar la relación coste-eficacia aplicando materiales y métodos de producción y de diseño CAD.
- Asegurar un tratamiento eficaz en continuo, también durante intervenciones de mantenimiento o de cambio del material reactivo.
- El diseño de la planta piloto está realizado de modo que también podrían realizarse modificaciones estructurales sobre este diseño en función de las características del AMD a tratar, para su aplicación en diversas fuentes de contaminación, así como también en diferentes lugares.

3. Localización

La mina Monte Romero se localiza en las inmediaciones de la aldea de Cueva de la Mora, perteneciente al término municipal de Almonaster la Real en la provincia de Huelva, SO de España (**Figura 1**). La actividad minera en Monte Romero tuvo lugar en diferentes épocas del siglo pasado, durante sus tres primeras décadas y más recientemente entre 1967 y 1972, cuando fue explotada por Asturiana de Zinc para la obtención de Zn y Pb. Toda esta actividad minera generó una gran cantidad de desechos, que en estos momentos se encuentran abandonados en el complejo minero y sus alrededores (**Figura 2**). Cabe destacar la relación con este trabajo los pozos y galerías, ya que una vez abandonados se inundan generando una importante cantidad de aguas ácidas.

4. Metodología

Para el diseño de la planta de tratamiento pasivo de la mina Monte Romero se tomaron en cuenta los siguientes datos:

Figura 2. Impacto de los vertidos de aguas ácidas en el río Odiel.



- La topografía del terreno de construcción.
- La composición química del AMD (**Tabla 1**).
- El caudal del vertido.
- Auto CAD Land para crear y modelar el terreno de construcción.
- Auto CAD para diseñar los componentes de la planta.

Para calcular las dimensiones de una planta DAS-calizo se tomaron en cuenta las experiencias previas de las plantas piloto de Monte Romero. Se utilizaron los siguientes métodos:

- Para calcular las medidas de los tanques reactivos de flujo vertical se aplica la tasa de remoción R_A (*removal rate*) observada en las experiencias previas. Esta tasa es la eficiencia de retirar masa de metales por cada m² de

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y elementos mayoritarios seleccionados del AMD en la entrada del tratamiento, a la salida de la balsa decantadora 3 y porcentaje de metales retenidos.

Parámetros	Al	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	SO ₄	Zn	Acidez total	pH
AMD de entrada (mg/L)	105	310	2	400	320	22	3.670	395	2.020	3,3
AMD salida D3 (mg/L)	0	860	0	0	360	23	3.710	380	630	5,5
Retirada de metales (%)	100	-117	100	100	-13	-5	-1,09	4	69	



su superficie de una balsa de tratamiento ($\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{día})^{-1}$):

$$R_A = Q(C_e - C_s)/A$$

Ecuación 1

donde A es el área de tratamiento (m^2); Q, el caudal promedio ($\text{m}^3/\text{día}$); C_e , la concentración de entrada para un metal (mg/L); y C_s , la concentración de salida para el mismo metal (mg/L). Según las investigaciones antes mencionadas, se recomiendan los siguientes valores de R_A para la retención de los principales metales presentes en el AMD mediante un DAS-calizo: para retirar Fe R_A de 80-150 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$, para Al 70-100 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ y para retener Zn 5-8 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$.

- La masa de material reactivo se calcula en función de su tiempo de operación previsto, es decir, el tiempo de funcionamiento antes de tener que ser reemplazado por mezcla reactiva nueva. En un DAS-calizo la masa y volumen de arena caliza se calcula según:

$$M = (Q \cdot C \cdot T_f) / (10^6 \cdot Z) \cdot R$$

masa para un tiempo de funcionamiento en toneladas

Ecuación 2

$$V_A = M / \delta$$

volumen de arena de caliza necesario (m^3)

Ecuación 3

donde Q es el caudal del vertido (en $\text{m}^3/\text{día}$); C, la diferencia de acidez total antes y después del tratamiento en la balsa a dimensionar ($C_e - C_s$, en mg/L equivalentes en CaCO_3); T_f , el tiempo de funcionamiento previsto en días; R es un factor de reserva de 1,3; Z, el contenido de caliza en la roca (%/100) y δ , la densidad aparente de la arena caliza (t/m^3).

- Para calcular las medidas de las balsas decantadoras se utiliza el tiempo de residencia, o tiempo que perma-

nece el AMD en una balsa (en horas):

$$T_R = V \cdot 24 / Q$$

Ecuación 4

donde T_R es el tiempo de residencia (horas); Q, el caudal ($\text{m}^3/\text{día}$); y V, el volumen de la balsa (m^3).

Para las balsas decantadoras se recomienda un tiempo de residencia aproximado de 25-50 h (Younger *et al.*, 2002). Existe otro tipo de recomendaciones para el diseño y dimensionamiento de balsas decantadoras:

- Un criterio para calcular las dimensiones de una balsa decantadora es que debe tener por lo menos 100 m^2 de superficie por cada L/seg de caudal.

- Para construir una balsa decantadora se recomienda una relación de largo por ancho de por lo menos 2:1 para limitar la posibilidad de cortocircuitos hidráulicos.

- Una balsa decantadora puede eliminar 30-50 mg/L de Fe. Si la concentración total es mayor, hay que construir cascadas de aeración adicionales, Pyramid Consortium (2003).

5. Diseño de la planta de tratamiento pasivo

Las características del AMD y la metodología del funcionamiento hidroquímico de diferentes experiencias piloto con la tecnología DAS en el tratamiento del AMD de Monte Romero han sido obtenidas de diferentes fuentes bibliográficas: Caraballo *et al.*, 2009 y 2011; Rötting *et al.*, 2008a y 2008b; y Sarmiento, 2007. La topografía del terreno fue realizada mediante un levantamiento de GPS para elaborar un modelo digital del terreno (MTD) en 3 dimensiones. Todos los componentes de la planta de tratamiento, según las dimensiones calculadas, fueron diseñados con el programa Auto CAD en 3 dimensiones para implantar después la planta completa en el MTD. Los parámetros del AMD a la entrada de la planta se muestran en la **Figura 3** y en la **Tabla 1**.

6. Realización de la planta de tratamiento pasivo

Debido a que el caudal del AMD varía mucho en función de la pluviometría, especialmente la estación húmeda, se diseña una arqueta de entrada (AE en **Figura 4**) donde mediante una apertura, conocida como diseño de Thomson, se limita el caudal de entrada a la planta de tratamiento a un promedio de 2 L/seg. En los meses de mayor pluviometría el caudal en exceso se desvía directamente en dirección al arroyo Romero para que no interfiera en el funcionamiento del sistema.

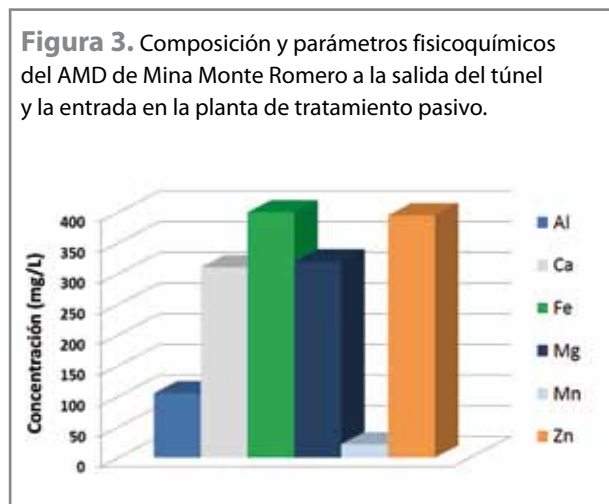
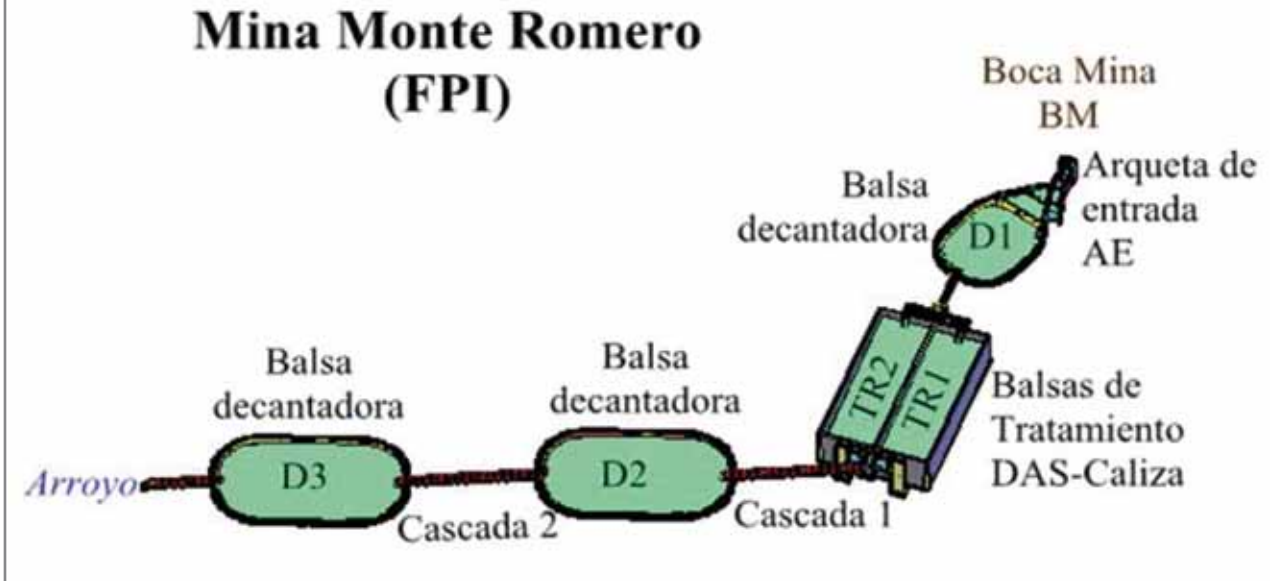


Figura 4. Planta de tratamiento pasivo al completo con tanques reactivos DAS, cascadas y balsas decantadoras.



Después de la arqueta de entrada se propone una primera balsa (D1 en **Figura 4**) para fomentar la oxidación de Fe (Macías *et al.*, 2012) con una superficie de 100 m² y un volumen de 110 m³ (tiempo de residencia es 15 horas). En esta balsa, como consecuencia de la oxidación y

posterior hidrólisis, se precipita una primera parte del hierro del AMD. De esta balsa decantadora el agua a tratar sigue mediante un canal abierto hasta una arqueta donde se distribuye el AMD en los tanques reactivos TR1 y TR2 (**Figura 5**), rellenos de material reactivo tipo DAS-calizo.

Figura 5. Plano de los tanques reactivos 1 y 2 DAS-calizos.

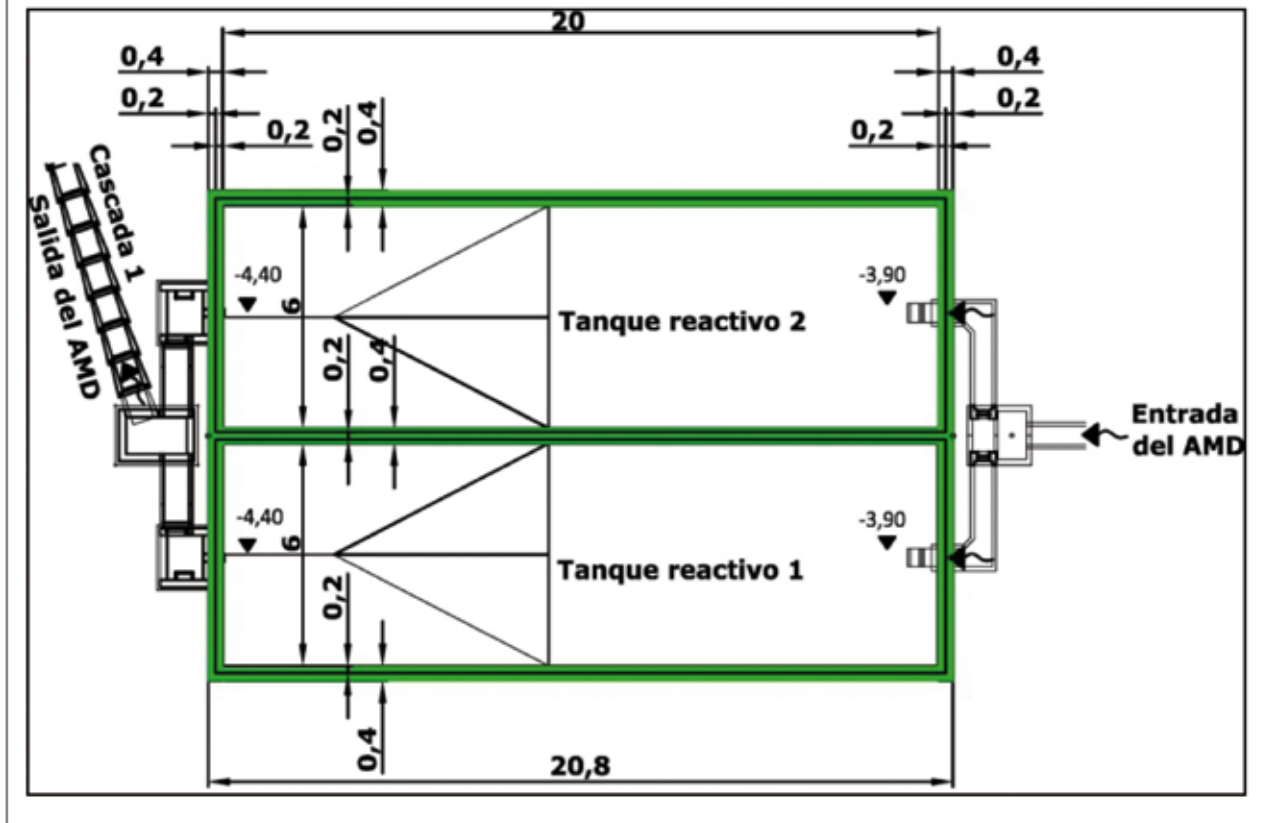
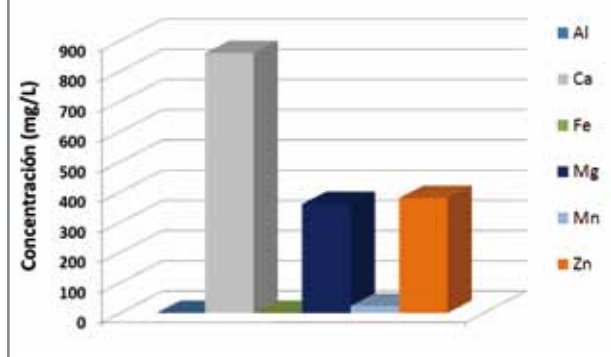




Figura 6. Composición química del AMD de Mina Monte Romero después del tratamiento a la salida de la balsa decantadora.



El tanque reactivo se divide en dos partes iguales para facilitar la labor de limpieza de forma que el proceso de tratamiento no se interrumpe en caso de mantenimiento o de cambio del material reactivo. Los tanques son fabricados en hormigón armado con una profundidad media de 4,15 m. El relleno de estos está estructurado como sigue (de abajo a arriba): una capa de drenaje de 40 cm que consta de 30 cm de grava de cuarzo gruesa (tamaño 10-40 mm) y una segunda capa de 10 cm de espesor de grava fina (5-10 mm). La mezcla reactiva DAS-caliza ocupa un espesor de 2,25 m, el resto de la profundidad del tanque estará ocupado por el sobrenadante y pared libre. Los tanques reactivos tienen una superficie de 120 m² y un volumen del material reactivo de 270 m³ cada uno.

La elección de los componentes del hormigón de la estructura es fundamental, pues debe soportar el mayor tiempo posible y sin riesgos de rotura el ataque químico del drenaje que almacenará. La capa de hormigón sobre la estructura de hierro de la planta debe ser lo suficientemente gruesa para que el AMD no la ataque, evitando así riesgos de daños como consecuencia de la corrosión de la armadura.

El material reactivo de relleno de los tanques consiste en un 20% (v/v) de un reactivo alcalino de grano fino, arena de caliza con $d_{10} = 0,3$ mm, $d_{50} = 1,4$ mm, $d_{max} = 5$ mm, mezclado con una matriz inerte de grano grueso (80% (v/v) virutas de madera con una longitud máxima de 2 cm y un diámetro de 0,5 cm).

Después del tanque reactivo el AMD tratado pasa a una cascada 1 (**Figura 4**) con 15 m de largo, 0,40 m de ancho y un desnivel de 1,5 m, donde se oxigena a lo largo de su recorrido, posteriormente entra en la balsa decantadora 2 (D2, **Figura 4**) con una superficie de 260 m² y un volumen de 290 m³, con un tiempo de residencia

es de 40 horas. Las balsas decantadoras se construyen de tierra compactada y excavaciones, en función de la altura del terreno, el sellado se puede realizar mediante lámina de PVC.

El proceso se repite en la segunda cascada y en la balsa decantadora 3 (**Figura 4**). Después de esta balsa, el agua tratada fluye en dirección al arroyo Monte Romero. Los parámetros del AMD después de la limpieza en la balsa decantadora 3 se resumen en la **Figura 6** y en la **Tabla 1**.

7. Conclusiones

Se ha diseñado una planta de tratamiento pasivo basado en las características fisicoquímicas del AMD de la mina Monte Romero. La planta ha sido diseñada para adaptarse en las limitadas condiciones topográficas del terreno. La capacidad de la planta de tratamiento permitiría tratar 2 L/seg (172,8 m³/día) de AMD. Es posible modificar este diseño en función de las características del AMD a tratar, para su aplicación en diversas fuentes de contaminación así como también en diferentes lugares.

El diseño ha sido realizado para que en ningún momento durante futuras labores de limpieza, el AMD fluya directamente al cauce natural, pues al estar la estructura dividida en dos partes iguales que trabajan independientemente, el sistema seguiría en funcionamiento durante la limpieza de uno de los subtanques.

Bibliografía

- [1] Rötting, T.S.; Thomas, R.C.; Ayora, C.; Carrera, J. (2008a). Passive treatment of acid mine drainage with high metal concentrations using dispersed alkaline substrate. *Journal of Environmental Quality*, núm. 37(5), págs. 1.741-1.751.
- [2] Rötting, T.S.; Caraballo, M.A.; Serrano, J.A.; Ayora, C.; Carrera, J. (2008b). Field application of calcite dispersed alkaline substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations. *Applied Geochemistry*, núm. 23(6), págs. 1.660-1.674.
- [3] Caraballo, M.A.; Rötting, T.S.; Macías, F.; Nieto, J.M.; Ayora, C. (2009). Field multi-step limestone and MgO passive system to treat acid mine drainage with high metal concentrations. *Applied Geochemistry*, núm. 24(12), págs. 2.301-2.311.
- [4] Caraballo, M.A.; Macías, F.; Rötting, T.S.; Nieto, J.M.; Ayora, C. (2011). Implementation of a dispersed alkaline substrate (DAS) based passive treatment system at Mina Esperanza, SW Spain: long term remediation of highly polluted acid mine drainage. *Environmental Pollution*, núm. 159(12), págs. 3.613-3.619.
- [5] Macías, F.; Caraballo, M.A.; Nieto, J.M.; Rötting, T.S.; Ayora, C. (2012). Natural pretreatment and passive remediation of highly polluted acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, núm. 104, págs. 93-100.
- [6] Younger, P.L.; Banwart, S.A.; Hedin, R.S. (2002). *Mine water - Hydrology, pollution, remediation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [7] Pyramid Consortium (2003). *Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters*. In: European Commission Fifth Framework RTD Project No. EVK1-CT-1999-00021 "Passive In-situ Remediation of Acidic Mine/Industrial Drainage" (Pyramid), University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, UK.
- [8] Sarmiento, A.M. (2007). Tesis von Aguasanto Miguel Sarmiento: Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de minas de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España).