

# Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del drenaje ácido de una escombrera minera (Faja Pirítica Ibérica, España)

*Hydrodynamic and hydrochemical characterization of acid mine drainage flowing from a metallic waste rock pile (Iberian Pyrite Belt, Spain)*

Damián Sánchez García<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1,2</sup>, Xavier Bernat Camí<sup>3</sup>, Manuel Ollás Álvarez<sup>4</sup>, Francisco Macías Suárez<sup>4</sup>, Gustavo Calero Díaz<sup>5</sup> y Marina Arnaldos Orts<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cetaqua Andalucía. C/ Severo Ochoa, 7, 29590 Málaga. dsanchezga@cetaqua.com

<sup>2</sup> Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, 29071 Málaga. andreo@uma.es

<sup>3</sup> Cetaqua Barcelona. Ctra. d'Esplugues, 75, 08940 Cornellá de Llobregat, Barcelona. xbernat@cetaqua.com; marina.arnaldos@cetaqua.com

<sup>4</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación sobre Recursos Naturales, Salud y Medio Ambiente (RENSMA), Universidad de Huelva. Campus 'El Carmen' s/n, 21071 Huelva. manuel.ollas@dgyp.uhu.es; francisco.macias@dgeo.uhu.es

<sup>5</sup> Hidralia, Gestión Integral de Aguas de Andalucía. C/ Periodista Federico Alba, 1, 29620 Torremolinos (Málaga). gcalerod@hidralia-sa.es

## ABSTRACT

*A long history of metalliferous mining has left the Iberian Pyrite Belt sulphide province with a legacy of numerous and enormous sulphide-bearing waste rock piles and tailings. Rainwater infiltrates and circulates through the waste rocks. These waters flow out of the mine dumps transformed into acid mine drainages (AMD). This work presents a preliminary hydrochemical and hydrodynamic characterization of AMD using an abandoned waste rock pile located in the central area of the Huelva province (SW Spain) as pilot site. Results show variable (0.1-12.2 L/s) and rainfall-dependent discharge flows which respond quite rapidly to precipitations. During the dry season discharge flows are progressively lower. Recharge produced by the infiltration of rainwater provokes, in general, the drainage of more mineralized waters mainly due to increased contents of SO<sub>4</sub>, Fe, Al and Mg. Water pH has been low (2.4-2.6), with no evident relationship with recharge. Redox potential has shown oxidizing conditions in all samples along the monitoring period.*

**Key-words:** waste rock pile, metallic mining, temporal characterization, Iberian Pyrite Belt.

## RESUMEN

*La intensa actividad minera que ha tenido lugar en la Faja Pirítica Ibérica desde tiempos históricos ha dado lugar a numerosas y extensas escombreras ricas en sulfuros. El agua de lluvia se infiltra y circula a través de estos materiales. Cuando dichas aguas vuelven a la superficie, lo hacen transformadas en drenajes ácidos de mina. Este trabajo muestra una caracterización preliminar de los drenajes desde un punto de vista hidroquímico e hidrodinámico, utilizando para ello una escombrera minera abandonada situada en la zona central de la provincia de Huelva. Los caudales de descarga han sido variables (0,1-12,2 L/s) y están condicionados por el régimen pluviométrico. La respuesta hidrodinámica de la escombrera a las lluvias es relativamente rápida y en ausencia de precipitaciones los caudales tienden a ser progresivamente menores. La recarga de la escombrera por la infiltración del agua de lluvia provoca, en general, el drenaje de aguas más mineralizadas debido, principalmente, al aumento de los contenidos en SO<sub>4</sub>, Fe, Al y Mg. El pH del agua ha sido muy ácido (2,4-2,6) y su evolución temporal no parece guardar relación con la recarga. El potencial redox ha mostrado siempre valores muy positivos, propios de condiciones oxidantes.*

**Palabras clave:** escombrera, minería metálica, caracterización temporal, Faja Pirítica Ibérica

Geogaceta, 64 (2018), 139-142  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 31 de enero de 2018  
Revisión: 18 de abril de 2018  
Aceptación: 25 de abril de 2018

## Introducción

La intensa actividad minera que ha tenido lugar en la Faja Pirítica Ibérica (FPI, SO de la Península Ibérica) desde tiempos históricos, y con mayor intensidad durante la segunda mitad del siglo XIX y todo el siglo XX, ha dado lugar a numerosas y extensas escombreras de residuos mineros ricos en sulfuros masivos, la

mayoría de ellas sin ningún tipo de medida preventiva o correctiva que evite su meteorización. En contacto con el oxígeno atmosférico y el agua de lluvia, se produce una reacción de oxidación de los sulfuros que tiene como consecuencia un descenso del pH y la liberación de sulfatos y Fe al medio. Bajo estas condiciones ácidas, se produce la disolución de los minerales de la roca de caja y, con ella, la

liberación de otros metales como Al, Cu o Zn (Cánovas *et al.*, 2016). Los drenajes ácidos resultantes, que pueden seguir produciéndose durante miles de años (Younger, 1997), contaminan las masas de agua superficial con los que entran en contacto (Sarmiento *et al.*, 2009; Ollás y Nieto, 2015).

Las escombreras mineras, fundamentalmente las formadas por residuos de mayor ta-

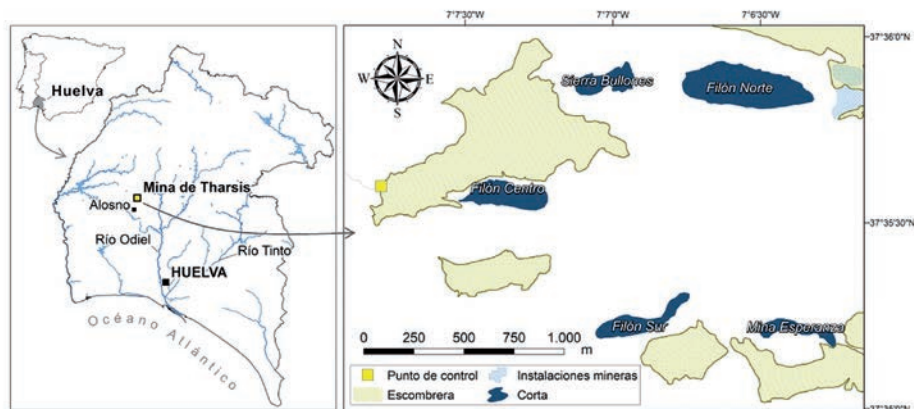


Fig. 1.- Mapa de localización. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Location map. See color figure in the web.

maño de grano, permiten la infiltración de una parte del agua de lluvia y la circulación de ésta en su interior. Cuando dichas aguas emergen en surgencias o manantiales, situados, por lo general, en la base de las escombreras, lo hacen transformadas en drenajes ácidos de mina. A diferencia de la mayoría de los ríos y arroyos de la FPI, estas surgencias ácidas no se secan durante los meses de verano debido a la capacidad de regulación de las escombreras, que se comportan como acuíferos de origen antrópico.

A diferencia de los cursos fluviales, galerías mineras y lagos ácidos, existe poca información acerca del funcionamiento de las escombreras mineras presentes en la FPI, a pesar de la gran superficie que ocupan y de constituir el origen de muchos de los drenajes ácidos de mina. El objetivo del presente trabajo es caracterizar la evolución temporal del drenaje ácido de una escombrera minera metálica situada en la FPI, desde un punto de vista hidrodinámico e hidroquímico.

## Zona de estudio

La zona de estudio corresponde al complejo minero de Tharsis, situado en el término municipal de Alosno, en la zona central de la provincia de Huelva (Fig. 1). Sin actividad desde el año 2000, y en la actualidad en estado de semiabandono, fue explotada tanto a cielo abierto mediante cinco cortas (Fig. 1) como por trabajos de interior. La explotación más intensiva se produjo durante los siglos XIX y XX, cuando la piritita constituía la principal materia prima para la producción de ácido sulfúrico. Los depósitos de sulfuros están formados por piritita (90%), esfalerita, calcopiritita y galena como principales especies minerales, con altas leyes de Zn, Cu, Pb, Ag y Au (Grande-Gil, 2016). Las escombreras ocupan actualmente una extensión de 303 ha (Cetaqua Andalucía, 2017), la

mayor parte de ellas en las proximidades de las cortas (Fig. 1).

Para la realización del estudio se ha seleccionado uno de los principales drenajes de escombrera, en cuanto a caudal y permanencia en el tiempo, del complejo minero de Tharsis, situado al oeste de la corta Filón Centro (Fig. 1). El clima de esta región es de tipo mediterráneo, la precipitación media es de 750 mm/año y la temperatura media de 17,5°C.

## Metodología

Se han realizado 32 muestreos durante un periodo de 15 meses (julio de 2015 a octubre de 2016), en cada uno de los cuales se efectuó una medida *in situ* de la conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), pH y potencial redox (ORP) del agua, así como del caudal de drenaje de la escombrera. La frecuencia media de los muestreos fue de 2 semanas.

La medida de los parámetros físico-químicos se llevó a cabo con un equipo portátil multiparamétrico de la casa CRISON, modelo MM 40+, con multisensor 5048. Adicionalmente, se instaló un conductímetro WTW 3310 para el registro continuo de la conductividad eléctrica del agua que estuvo operativo durante un año (Fig. 2). Por motivos técnicos este equipo se situó unas decenas de metros aguas abajo del punto de surgencia, por lo que durante las precipitaciones más intensas recibió escorrentía superficial.

Los aforos de caudal se realizaron con un micromolinet digital modelo PROBE, cuando la lámina de agua cubría por completo el diámetro de la hélice; en caso contrario, el aforo se realizó con un recipiente graduado y un cronómetro (valor medio de tres repeticiones).

En cada campaña se tomó una muestra de agua utilizando frascos esterilizados de polipropileno de 60 mL de capacidad. Las muestras fueron filtradas en campo (0,20 µm de tamaño de

poro) y acidificadas con HNO<sub>3</sub> hasta pH <1 para "evitar la precipitación de metales disueltos en el agua. Las muestras se mantuvieron refrigeradas hasta su análisis, que fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Huelva mediante ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*).



Fig. 2.- Estación para el registro continuo de conductividad eléctrica.

Fig. 2.- Station for continuous monitoring of electrical conductivity

## Resultados

### Parámetros estadísticos básicos

En la figura 3 se presentan los parámetros estadísticos básicos correspondientes a CE, T, pH, ORP, caudal y los 11 componentes más abundantes (el azufre se representa como ion SO<sub>4</sub>). Los valores de CE han sido elevados y muy variables a lo largo del periodo de control (5,9-9,5 mS/cm), con un valor medio de 7,7 mS/cm. Por el contrario, el pH del agua ha sido estable durante los 15 meses de registro (2,4-2,6), como también lo ha sido el ORP (429-497 mV). La temperatura del agua ha estado comprendida entre 15-20°C.

Los caudales de drenaje de la escombrera han sido variables (0,1-12,2 L/s), aunque generalmente bajos (el 75% de los aforos fueron iguales o inferiores a 0,4 L/s; Fig. 3).

El compuesto más abundante es el ion SO<sub>4</sub>, con una concentración media de 8000 mg/L. Destacan igualmente los altos contenidos en Al (765 mg/L), Mg (529 mg/L), Fe (510 mg/L), Mn (102 mg/L) y Cu (81 mg/L). En general, todos los componentes analizados han mostrado rangos de variación amplios durante el periodo de monitorización.

*Evolución temporal*

En ausencia de lluvias, la escombrera tiende a drenar caudales cada vez menores (julio-septiembre de 2015; mayo-octubre de 2016), si bien cuando se producen las precipitaciones la respuesta hidrodinámica de la escombrera es relativamente rápida (Fig. 4). El caudal máximo se alcanzó a mediados de mayo de 2016, momento a partir del cual el flujo de agua drenado se fue haciendo progresivamente menor.

Durante los primeros tres meses de control (julio-octubre de 2015) el agua drenada por la escombrera fue progresivamente menos mineralizada. Las primeras lluvias con cierta entidad, ocurridas a mediados de octubre, hacen que se alcance un máximo de conductividad eléctrica, que va seguido de una tendencia descendente, en ausencia de lluvias, y ascendente cuando éstas vuelven a estar presentes (periodo comprendido entre octubre de 2015 y enero de 2016). El evento pluviométrico de mayo –el más importante, en cuanto a volumen, de todos los registrados– provoca, en primer lugar, una dilución del agua que hace que la conductividad alcance el mínimo de la serie y, posteriormente, el drenaje de aguas más mineralizadas. La última fase del seguimiento (junio-octubre 2016) muestra una tendencia contraria a la observada al principio del registro, esto es, un aumento de la conductividad eléctrica del agua al tiempo que el caudal se va haciendo menor. Los máximos de conductividad eléctrica coinciden tanto con descensos como con ascensos relativos de la temperatura.

El registro horario de la CE (línea continua, Fig. 4) no coincide siempre con las medidas puntuales de campo y muestra diluciones mucho más intensas, debido a que el equipo no pudo situarse en la surgencia sino a unos 50 m corriente abajo, por lo que se ve afectado ocasionalmente por aguas de escorrentía superficial.

Las evoluciones temporales de la concentración de SO<sub>4</sub>, Al y Mg son prácticamente iguales o muy similares; el Fe, por el contrario, muestra una evolución algo diferente. El aumento de conductividad eléctrica registrado en octubre de 2015 coincide con un aumento en el contenido de los cuatro iones; sin embargo, la dilución y posterior aumento de la mineralización registrados en mayo de 2016 no parecen tener efectos en el contenido de Fe. El incremento de la mineralización del agua observado en el verano de 2016 se produce por el aumento en el contenido de los cuatro componentes (Fig. 4).

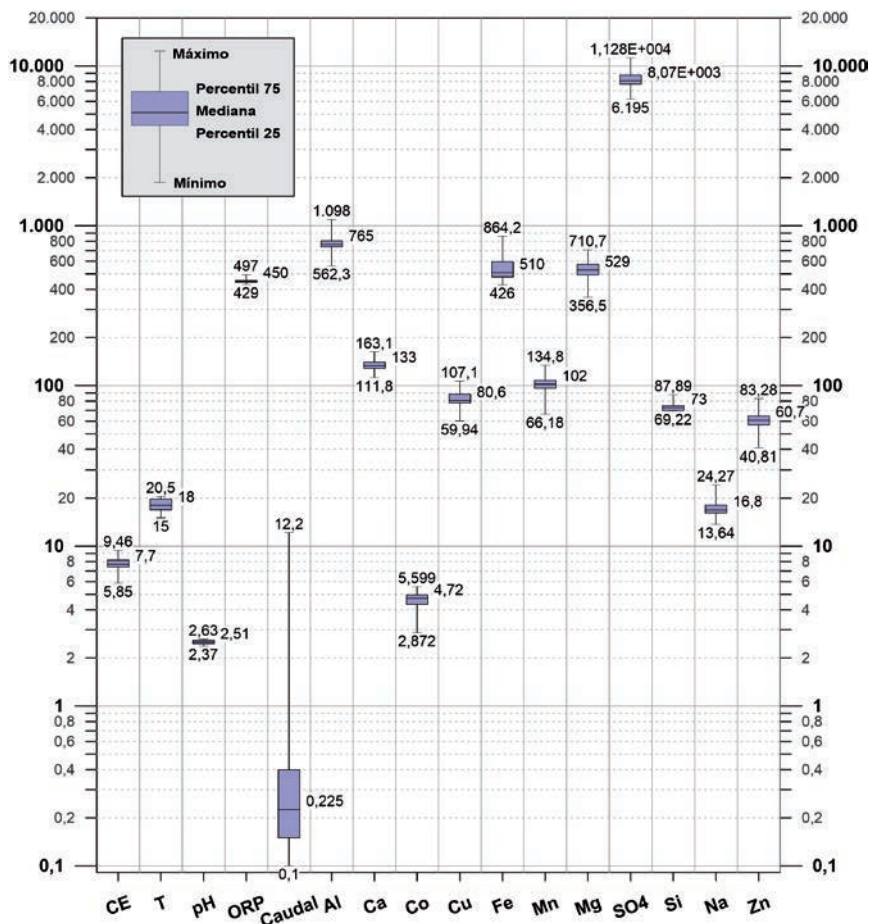


Fig. 3.- Diagrama de cajas en el que se muestran los parámetros estadísticos básicos. Número de casos para todas las variables: 32. (CE: mS/cm, T: °C, ORP: mV, Caudal: L/s, resto: mg/L). Figura en color en la web

Fig. 3.- Box-whisker plot showing the main statistical parameters. Number of cases for all variables: 32. Colour figure on the web.

El pH presenta en general unos valores poco variables. Los descensos más pronunciados coinciden tanto con aumentos como con descensos de CE.

**Discusión**

La actividad minera desarrollada en Tharsis durante décadas ha tenido como consecuencia la exposición en superficie de grandes volúmenes de rocas y residuos mineros con sulfuros en su interior que, en contacto con el oxígeno atmosférico y el agua de lluvia, se oxidan generando drenajes ácidos de mina. En el caso de las escombreras mineras constituidas por residuos de mayor tamaño de grano, su mayor permeabilidad permite la rápida infiltración y circulación en su interior del agua de lluvia. Ésta sale a superficie en forma de surgencias o manantiales de aguas ácidas y muy mineralizadas (Sánchez-España *et al.*, 2005; Grande *et al.*, 2014; Olías *et al.*, 2016; Cetaqua Andalucía, 2017), cuya composición

química incumple la normativa exigible a las aguas destinadas al consumo humano (Grande *et al.*, 2018).

Tanto el caudal de descarga como la composición química del drenaje de escombrera estudiado han sido muy variables durante el periodo de control. Por lo que respecta al primero, su evolución temporal está condicionada fundamentalmente por el régimen pluviométrico. Las primeras lluvias del año hidrológico no tienen efecto en el caudal, posiblemente porque sirven para saturar de humedad el suelo, muy seco tras los meses de verano. Las siguientes lluvias, por el contrario, sí producen un aumento del caudal de descarga del drenaje de escombrera. Durante el estiaje, en ausencia de lluvias, el caudal se hace progresivamente menor.

La recarga de la escombrera por la infiltración del agua de lluvia produce una intensificación de los procesos de oxidación de los sulfuros y el lavado de sales solubles previamente precipitadas, puesto de manifiesto por un incremento de los contenidos en SO<sub>4</sub>, Al, Mg y, ocasionalmente, Fe. No obstante, tras

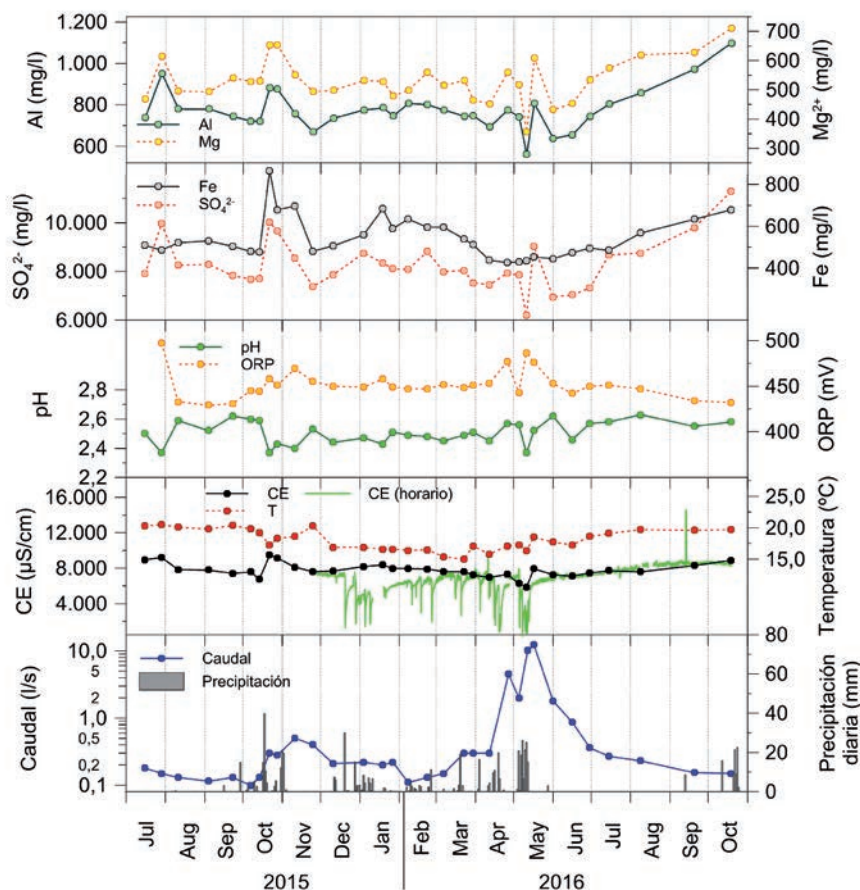


Fig. 4.- Evolución temporal del caudal (en escala logarítmica) y de los principales parámetros físico-químicos del drenaje ácido de escombrera analizado. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Temporal evolution of discharge flow (in logarithmic scale) and the main physical-chemical parameters of the waste rock pile acid drainage under study. See color figure in the web.

precipitaciones muy intensas como la ocurrida en mayo de 2016, se observa una dilución previa al pico de mineralización (Fig. 4), que podría estar relacionada con flujos más rápidos que han permanecido menos tiempo en el interior de la escombrera. Durante los meses de estiaje, el caudal de descarga va siendo progresivamente menor, en tanto que las aguas van incrementado su contenido en  $\text{SO}_4$  y metales disueltos. El pH, por el contrario, permanece relativamente estable.

El control continuo de la CE ha permitido registrar el pico de mineralización asociado a la primera lluvia tras el verano, producida el 13 de septiembre de 2016 (Fig. 4). Ese día tuvo lugar una precipitación de casi 9 mm, la primera desde el mes de mayo, que disolvió las sales precipitadas durante el verano en las inmediaciones del punto de descarga y del cauce por el que discurren dichas aguas, lo que provocó un incremento brusco (de 8 a 15 mS/cm) y de corta duración (15 h aproximadamente) de la conductividad eléctrica. Este es un fenómeno común al resto de drenajes de escombrera de Tharsis y, en general, a todas las zonas afectadas por minería metálica y del carbón.

El carácter exotérmico de la reacción de oxidación de la pirita puede conferir a los drenajes ácidos un cierto termalismo (Olías *et al.*, 2017). Sin embargo, en el presente trabajo no se ha observado relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica del agua. En términos generales, las temperaturas más altas se han registrado durante los meses de verano y las más bajas en los meses de invierno, lo que sugiere un cierto equilibrio entre la temperatura del aire y la del agua en el interior de la escombrera.

## Conclusiones

El seguimiento temporal del drenaje ácido de escombrera minera analizado en este trabajo ha permitido comprobar que tanto su composición físico-química como su caudal cambian significativamente a lo largo del año hidrológico. Por lo que respecta al caudal, su evolución depende principalmente de la distribución e intensidad de las precipitaciones. La evolución hidroquímica es más compleja y depende de factores como la composición mineral de la escombrera o el tiempo de residencia del agua en su interior.

El drenaje de escombrera analizado ha mostrado incrementos de mineralización tanto durante el estiaje (más progresivos) como tras los principales eventos de recarga (más rápidos), si bien estos últimos pueden estar precedidos por una fase de dilución.

## Agradecimientos

Este trabajo muestra resultados del proyecto de investigación PTQ-13-06126 financiado parcialmente por el Ministerio de Economía y Competitividad en el marco de las Ayudas Torres Quevedo. Se agradece el apoyo de Hidralia, Gestión Integral de Aguas de Andalucía, S.A. y al Grupo de Recursos Hídricos de la Junta de Andalucía (RNM-308). Los autores agradecen igualmente los comentarios y sugerencias del Prof. Grande-Gil y un revisor anónimo que han contribuido a la mejora del manuscrito original.

## Referencias

- Cánovas, C.R., Macías, F. y Pérez-López, R. (2016). *Journal of Contaminant Hydrology* 188, 29-43.
- Cetaqua Andalucía (2017). *Contaminación de aguas ácidas en zonas de captación destinadas al consumo humano. Proyecto CAZMIN*. Málaga, 148 p. Informe inédito.
- Grande-Gil, J.A. (2016). *Drenaje ácido de mina en la Faja Pirítica Ibérica: técnicas de estudio e inventario de explotaciones*. Universidad de Huelva, 348 p.
- Grande, J.A., Valente, T., de la Torre, M.L., Santisteban, M., Cerón, J.C. y Pérez-Ostale, E. (2014). *Environmental Earth Sciences* 71(6), 2729-2738.
- Grande, J.A., Santisteban, M., de la Torre, M.L., Dávila, J.M. y Pérez-Ostale, E. (2018). *Chemosphere* 199, 269-277.
- Olías, M. y Nieto, J.M. (2015). *Environments* 2, 295-316.
- Olías, M., Nieto, J.M., Pérez-López, R., Cánovas, C.R., Macías, F., Sarmiento, A.M. y Galván, L. (2016). *Catena* 137, 12-23.
- Olías, M., Macías, F., Cánovas, C.R. y Moreno, R. (2017). En: *Impacts of Global Change on Western Mediterranean Aquifers* (M.L. Calvache, C. Duque y D. Pulido-Velázquez, Eds.). Proceedings, 37-42.
- Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia, E., Aduvire, O., Reyes, J. y Barettoni, D. (2005). *Applied Geochemistry* 20, 1320-1356.
- Sarmiento, A.M., Nieto, J.M., Olías, M. y Cánovas, C.R. (2009). *Applied Geochemistry* 24, 697-714.
- Younger, P. (1997). *Science of the Total Environment* 194/195, 457-466.