

Estudio de estabilidad en depósitos de lodos del Distrito Minero de Mazarrón (SE España): Riesgos potenciales sobre la Rambla de Las Moreras

J. A. Acosta^(1,2), S. Martínez-Martínez⁽²⁾, P. Martínez-Pagan⁽³⁾, R. Zornoza⁽²⁾, D. M. Carmona⁽²⁾ y Á. Faz⁽²⁾

(1) Earth Surface Science, Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics. University of Amsterdam.
Nieuwe Achtergracht 166, 1018 WV Amsterdam, The Netherlands.

j.a.acostaaviles@uva.nl

(2) Grupo de Investigación "Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas".

Departamento de Ciencia y Tecnología Agraria. Universidad Politécnica de Cartagena.

Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena. Murcia. España.

ja.acosta@upct.es, silvia.martínez@upct.es, dora.carmona@upct.es, angel.fazcano@upct.es

(3) Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena.

Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena. Murcia. España.

p.martínez@upct.es

RESUMEN

En este estudio se han usado técnicas geoquímicas, geofísicas y geotécnicas para evaluar los riesgos medioambientales existentes en los depósitos de lodos San Cristóbal y Las Moreras, procedentes del abandono de la actividad minera extractiva de tipo Pb-Zn en el ámbito mediterráneo semiárido. Los resultados han mostrado que los lodos que conforman ambos depósitos generan un riesgo potencial sobre los ecosistemas cercanos a ellos, ya que presentan extrema acidez, alta salinidad y elevadas concentraciones de metales, especialmente en Pb y Zn. Si se produjese un colapso de los depósitos o bien la erosión arrastrara lodos a las zonas colindantes, se generaría la contaminación, acidificación, salinización, compactación, disminución de nutrientes, etc. de los suelos, lo que redundaría en una pérdida de la biodiversidad presente en la zona. Los estudios de tomografía eléctrica han revelado el espesor de los materiales que conforman los depósitos, su volumen, así como la geomorfología del zócalo. Los perfiles geoeléctricos (2D) mostraron que en ninguna de las seudosecciones hay regiones con morfología de fractura que puedan comprometer la estabilidad de las estructuras. De hecho, los estudios geotécnicos indican que ambos depósitos son estables a gran escala. Sin embargo, en el depósito San Cristóbal, suponiendo una rotura circular y acción sísmica, se obtienen valores del factor de seguridad críticos, por lo que se aconseja la realización de inspecciones periódicas con el fin de evaluar humedades, surgencias y asentamientos en el dique. Con el objetivo de reducir la erosión superficial de los lodos, es recomendable la aplicación de enmiendas alcalinas y orgánicas que mejoren las características geoquímicas en la capa superficial de los depósitos de modo tal que se creen condiciones que favorezcan el establecimiento de vegetación.

Palabras clave: estabilidad estructural, geofísica, geoquímica, geotécnica, riesgo ambiental, tomografía eléctrica geotécnica

Stability of tailings ponds in the mining district of Mazarrón (SE Spain): potential risks for the Moreras Rambla

ABSTRACT

We have used geochemical, geophysical and geotechnical techniques to identify and quantify the environmental risks of the San Cristóbal and Las Moreras tailing ponds, which have been left since the closing down of Pb-Zn mining activities in a semi-arid Mediterranean area. The results show that the tailings ponds present a potential risk to nearby ecosystems because of their high acidity, high salinity and high concentrations of metals, especially Pb and Zn contain. If the pond dams were to fail or if erosion carried dry sludge to the surrounding areas, the result would be pollution, acidification, salinization, compaction and nutrient depletion of the soil, thus reducing the biodiversity of the area. Geoelectrical tomography has shown the depth of the deposits, their volume and the geomorphology of the basement. The profiles reveal that in none of the pseudo-sections are there any regions betraying cracks that might affect the stability of the structures. In fact, geotechnical studies indicate that on a large scale both ponds are stable. Nevertheless, if we contemplate circular rupture and seismic action in the San Cristobal pond, the safety factor values become critical. It is recommended, therefore, that periodic inspections should be carried out to assess moisture, upsurges and settlements in the dam. To reduce erosion of the surface sludge in the tailing ponds we suggest the application of alkaline and organic remediation so as to improve their geochemical characteristics and encourage the establishment of natural vegetation.

Key words: electrical tomography, environmental risk, geochemistry, geotechnics, structural stability

Introducción

Existen en la Región de Murcia alrededor de 85

estructuras de residuos mineros procedentes de antiguos lavaderos del beneficio de minerales, las cuales fueron abandonadas después de una intensa activi-

dad minera llevada a cabo durante el pasado siglo, y que se encuentran distribuidas entre los Distritos Mineros de Cartagena-La Unión y Mazarrón.

Estas estructuras presentan en la actualidad una problemática singular debido tanto a la composición de los materiales que las constituyen, con elevados contenidos de metales pesados (Rodríguez *et al.*, 2009), como al emplazamiento de las mismas, localizadas en ramblas y cuencas hidrográficas, pudiendo originar focos de contaminación geoquímica e inestabilidad geotécnica, afectando negativamente a suelos, aguas, plantas, animales y poblaciones, así como a infraestructuras próximas.

Debido a que la mayoría de estos depósitos se encuentran desprovistos de toda cobertura que los proteja, las capas que componen estos depósitos pueden ser erosionadas por el viento o por las aguas de escorrentía (Razo *et al.*, 2004; Zanuzzi *et al.*, 2009) y, por lo tanto, los metales presentes en dichas capas pueden ser transportados largas distancias (Navarro *et al.*, 2008; Chaoyang *et al.*, 2009), así como verse afectada su estabilidad estructural.

Hasta hace pocos años, únicamente se disponía de un inventario desarrollado por la Dirección General de Política Energética y Minas, en el que se establecía una clasificación de los depósitos de lodos existentes en la Región de Murcia según su potencial de peligrosidad para la población humana y las infraestructuras que podían verse afectadas. Sin embargo, este inventario, ofrece únicamente una evaluación cualitativa geotécnica y ambiental, así como una descripción de los elementos de riesgo potencialmente afectados. Por lo tanto, se hace necesario profundizar en el conocimiento del estado actual de los depósitos con mayor riesgo potencial, realizando estudios de detalle conforme a un orden de prioridades, basado en la clasificación realizada en el inventario. Estos estudios deben realizarse de modo integral, mediante la aplicación de técnicas geofísicas, geotécnicas y geoquímicas que permitan establecer objetivamente un análisis y evaluación cuantitativa de los riesgos de contaminación y de estabilidad estructural.

En este sentido, las técnicas geofísicas son técnicas complementarias, no destructivas, de bajo coste y de rápida aplicación para evaluar un gran número de problemas ambientales y de ingeniería (Daniels, 1988; Hutchinson, 2005; Hanna y Pfeiffer, 2007; Martínez-Pagán *et al.*, 2009; Gómez-Ortiz *et al.*, 2010). Dentro de estas técnicas, el método geofísico de tomografía eléctrica (TE) puede ser usado para estudiar el espesor y la extensión que cubren los diferentes materiales, en este caso las capas de residuos mineros que conforman los depósitos, evaluar su grado de erosión, identificar grietas y distinguir rutas

preferenciales de agua o drenajes ácidos de mina en los mismos. Todo lo anterior es de especial relevancia en la evaluación de la estabilidad de estas estructuras mineras.

Por su parte, las técnicas geotécnicas permiten, por medio de ensayos mecánicos, conocer las características geomecánicas de los materiales que constituyen los depósitos mineros, de este modo se pueden clasificar los materiales y, de otro lado, ofrecen diversos métodos objetivos para el análisis de la estabilidad estructural.

Finalmente, las técnicas geoquímicas engloban un conjunto de métodos de análisis que permiten determinar tanto el contenido de metales pesados presentes en los depósitos (Conesa *et al.*, 2007; Parkpian *et al.*, 2002; Simon *et al.*, 1999) como las características edáficas de los mismos. Con estos datos es posible evaluar el grado de contaminación de los materiales que componen los depósitos, y de este modo, estimar el riesgo potencial sobre los ecosistemas que se verían afectados tanto si se produjera el colapso de alguno de ellos, como el efecto de los materiales erosionados y posteriormente transportados con las aguas de escorrentía en eventos tormentosos de alta intensidad.

Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es determinar y cuantificar los riesgos medioambientales existentes en dos depósitos de lodos procedentes del abandono de la actividad minera extractiva de tipo Pb-Zn en el ámbito mediterráneo semiárido (Distrito Minero de Mazarrón, SE España). De este modo se considera, por una parte, la determinación de la contaminación y el conocimiento de los mecanismos que controlan la generación y transporte de metales pesados (Cd, Zn, Pb, Cu) y, por otra, mediante la aplicación de técnicas geofísicas y geotécnicas, los riesgos estructurales existentes. Este estudio permitirá establecer patrones de restauración medioambiental y de disminución de riesgos, estableciendo recomendaciones mediante la valoración de medidas correctoras para neutralizar y/o minimizar estos riesgos.

Zona de estudio

Los depósitos de San Cristóbal y Las Moreras seleccionados para este estudio se encuentran localizados en el Distrito Minero de Mazarrón, el cual fue intensamente explotado hasta 1962, especialmente en los yacimientos del Cabezo de San Cristóbal, Los Perules,

Pedreras Viejas y Fortuna para obtener plomo, zinc y plata. Las minas más importantes del Cabezo de San Cristóbal son: Santa Ana, Fuensanta, Esperanza, San Juan y Triunfo (Ferrándiz, 2002).

El clima es típicamente mediterráneo con una temperatura media anual de 17 °C y una precipitación media anual de 300 mm, mientras que la evapotranspiración alcanza los 900 mm al año. Es de destacar que en la zona se presentan habitualmente eventos tormentosos de alta intensidad y poca duración, con carácter torrencial, por lo que los procesos erosivos, aunque puntuales, son muy intensos.

Los primeros vestigios de una explotación sistemática del mineral en el distrito aparecen con los fenicios y los cartaginenses. Después de estos, y tras el notable impulso dado a la extracción de minerales por los romanos, sigue una etapa con nuevas actividades mineras durante la ocupación árabe, finalmente la extracción prosigue en la mayor parte de los sectores hasta su cese en el año anteriormente citado (Arana *et al.*, 1993). Durante este último periodo es cuando el proceso de producción de concentrado de mineral se realiza a partir de técnicas de flotación diferencial, produciendo gran cantidad de residuos de tipo fango (lutíticos), dando origen a los depósitos de lodos objeto de este trabajo.

La selección de estos depósitos se realizó según los siguientes criterios: por su localización cercana a la Rambla de Las Moreras por lo que el riesgo de dispersión si se produjera su colapso sería muy importante, por que presentan un gran tamaño con superficies de 11200 y 25950 m² para San Cristóbal y Las Moreras respectivamente, porque se encuentran desprovistos de cobertura que los proteja contra la erosión (como la mayor parte de los depósitos de la Región de Murcia), y por su buena accesibilidad para realizar los muestreos y trabajos de campo requeridos para este estudio.

Metodología

Estudio Geoquímico

En cada uno de los depósitos seleccionados se tomaron muestras superficiales de 0-15 cm de profundidad para su posterior caracterización fisicoquímica. Se tomaron 12 y 14 muestras en San Cristóbal y Las Moreras, respectivamente, distribuidas siguiendo el diseño de una malla regular de 100 m x 100 m en toda la superficie de los depósitos, con ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) y ortofotografías aéreas de la zona de estudio (Figura 1a y 2a). Además, se realizó un sondeo mecánico en el centro

de cada uno de estos depósitos hasta alcanzar el contacto sustrato-estériles de mina, tomándose muestras cada metro, con un total de 10 y 12 muestras en San Cristóbal y Las Moreras, respectivamente.

Las muestras superficiales y del sondeo fueron guardadas en bolsas de polietileno y llevadas al laboratorio para su análisis. En el laboratorio las muestras se secaron al aire durante 7 días, tamizadas a 2 mm y molidas en mortero de ágata. Los siguientes análisis fueron determinados: pH en agua y KCl en solución 1:1 suelo/agua (Peech, 1965), sales solubles en solución 1:5 suelo/agua (Andrades, 1996), textura mediante combinación de tamizado en húmedo y sedimentación (FAO-ISRIC, 2006) y metales totales (Pb, Cu, Zn y Cd) mediante digestión con 10 ml de ácido nítrico y 10 ml de ácido perclórico en bloque digestor durante 90 min a 210 °C, la solución resultante fue enrasada a 100 ml con ácido clorhídrico 0,1 N (Risser y Baker, 1990), los metales fueron medidos usando un espectrofotómetro de absorción atómica (AAAnalyst 800, Perkin Elmer).

Se utilizó el material de referencia SO-4 del Canadian Certified Reference Materials Project (Bowman *et al.*, 1979) para el control de calidad de los análisis. Los porcentajes de recuperación de cada metal fueron: <4 % para Cd, <2 % para Cu, <3 % para Zn y <1 % para Pb.

Estudio Geofísico

Un total de cinco perfiles de tomografía eléctrica fueron realizados en los dos depósitos mineros seleccionados. Para el depósito San Cristóbal se desplegaron 3 perfiles de tomografía eléctrica, dos dispuestos diagonalmente a la geometría del depósito y un tercero longitudinalmente (Figura 1a). Por su parte en Las Moreras se realizaron 2 perfiles que cubren la totalidad de la superficie del depósito (Figura 2a).

El método de tomografía eléctrica (TE) ayuda a delinear el contacto entre el depósito y el sustrato, así como a identificar la erosión existente en superficie como la presencia de grietas o fracturas en las capas profundas del depósito, aspecto de gran interés en estudios de estabilidad estructural. Esto es posible debido a que los estériles mineros presentan un gran contenido de partículas metálicas, y con la humedad existente proporcionan valores de resistividad muy bajos que contrastan con las fisuras donde la falta de relleno y la presencia de aire da como resultado que las señales geoléctricas registren valores de resistividad eléctrica elevados.

El método de TE, aunque es una técnica más sofisticada en adquisición y procesado de datos, se puede

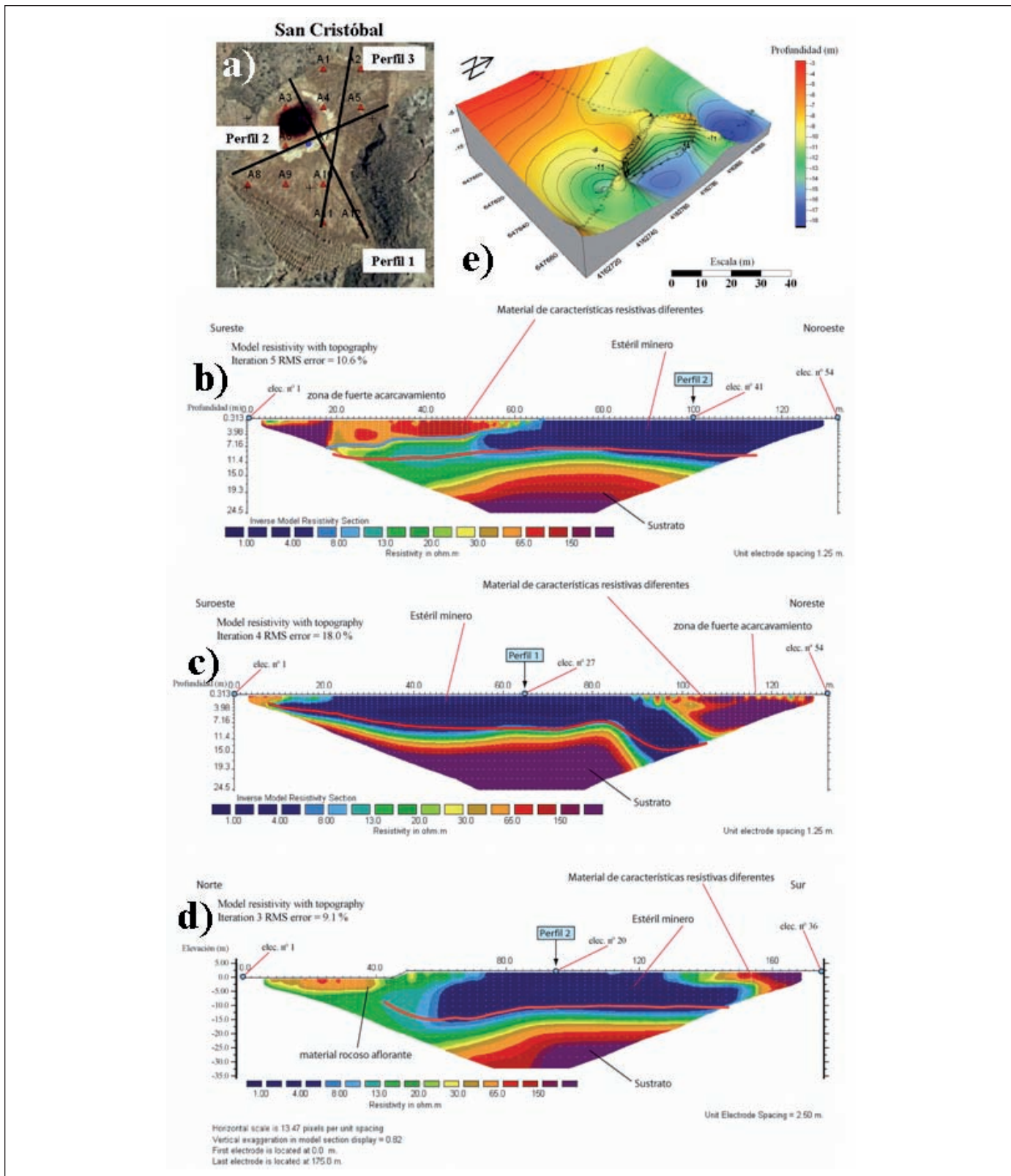


Figura 1. a) Distribución de muestras y perfiles; b) Seudosección eléctrica 2D del perfil 1; c) del perfil 2; d) del perfil 3; y e) Modelo 3D del zócalo. San Cristóbal

Figure 1. a) Location of the samples and profiles; b) electrical resistivity section of ERI profile 1; c) profile 2; d) profile 3; e) 3D model of the basement of the San Cristóbal tailing pond

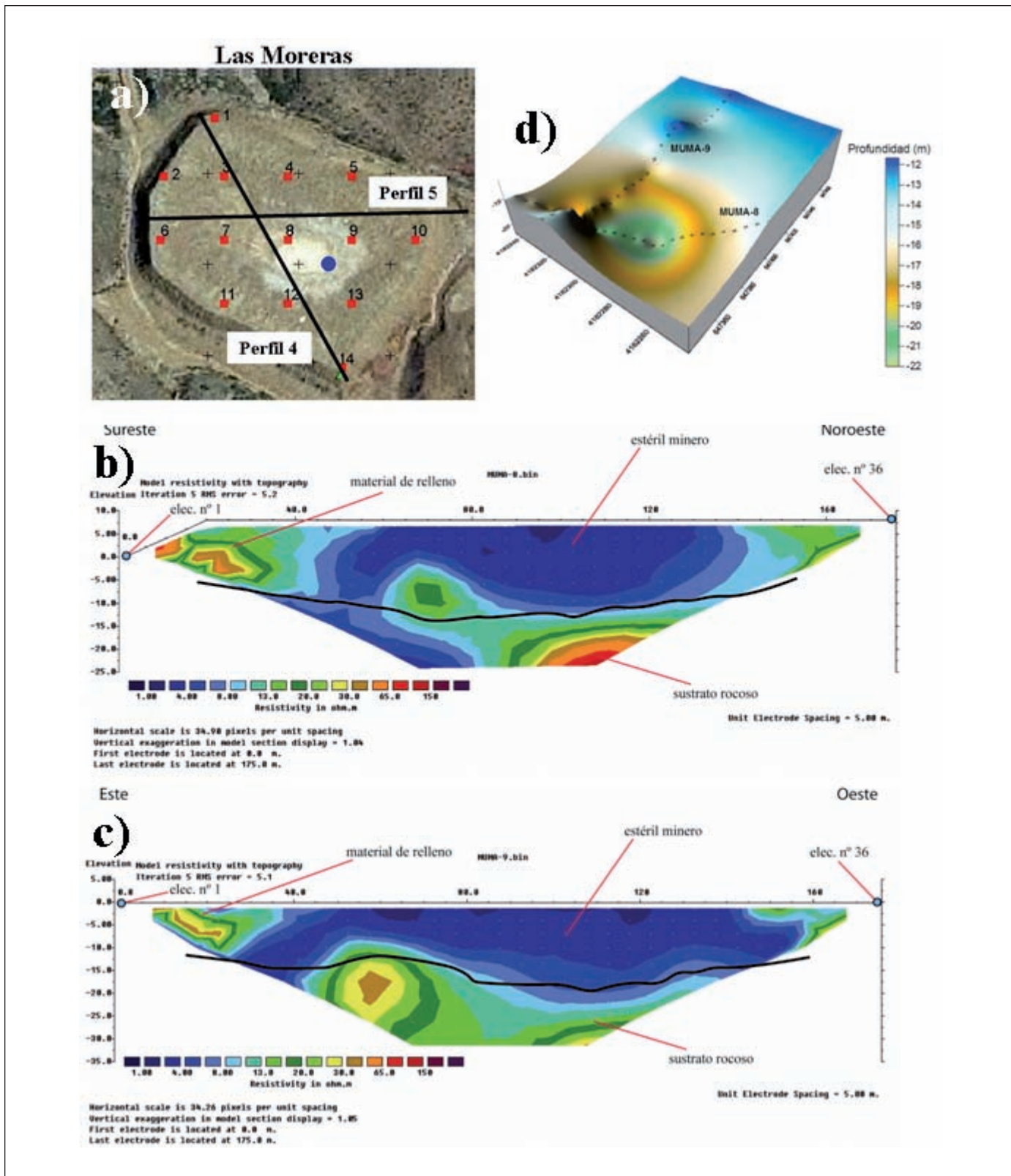


Figura 2. a) Distribución de muestras y perfiles; b) Seudosección eléctrica 2D del perfil 4; c) del perfil 5; d) Modelo 3D del zócalo. Las Moreras

Figure 2. Location of the samples and profiles; b) electrical resistivity section of ERI profile 4; c) profile 5; d) 3D model of the basement of the Las Moreras tailing pond

asemejar a una combinación de sondeos eléctricos verticales y calcatas eléctricas, lo que lo hace idóneo en la investigación de estructuras geológicas con fuertes cambios de resistencia lateral (Sumanovac y Weisser, 2001; Tejero *et al.*, 2002). Proporciona información detallada y fiable tanto lateral como verticalmente a lo largo del perfil y es la técnica más comúnmente usada en estudios ambientales (Seidel y Lange, 2007). Las mediciones de resistividad aparente se obtuvieron utilizando un sistema de multielectrodo controlado por ordenador con un gran número de electrodos (36, 54, o 72) dispuestos en un perfil a intervalos constantes. Dependiendo de la extensión de los depósitos los electrodos empleados fueron 36 o 54 con diferente resolución horizontal y vertical, profundidad de penetración y relación señal-ruido (Szalai y Szarka, 2008).

El conjunto de datos fueron adquiridos utilizando el dispositivo de medida Wenner-Schlumberger, ya que presenta un buen compromiso entre el ratio señal-ruido y la obtención de una buena resolución vertical. Esta última característica es especialmente interesante para determinar la presencia de fracturas o grietas en los depósitos de residuos (Pazdirek y Blaha, 1996; Gómez-Ortiz *et al.*, 2007). Se utilizó un resistivímetro Syscal R1 Switch 72 (IRIS Instruments, 2001). Cada electrodo, de acero inoxidable, tiene una longitud de 30 cm y está unido al resistivímetro, unidad principal de medida, a través de su conexión al cable principal por medio de pinzas. Esto hace que se consiga el contacto galvánico entre el electrodo y el suelo. Las coordenadas de los electrodos situados en los extremos y alguno intermedio se registraron con una unidad GPS, lo que permite la posición exacta de los perfiles sobre el depósito y la aplicación de las correcciones topográficas sobre los datos eléctricos.

Las medidas eléctricas obtenidas para cada perfil se analizaron siguiendo un proceso de dos etapas. En primer lugar, se utilizó el software PROSYS II (IRIS Instrumentos, Francia) con el fin de eliminar los valores anómalos causados por el ruido ambiental y aplicarle a los datos la corrección topográfica. Tras esta etapa, los datos corregidos fueron procesados con el software RES2DINV (Loke, 2000; 2004) y finalmente interpretados. El software RES2DINV ejecuta un proceso de inversión que permite obtener una distribución 2D de resistividad eléctrica relacionada con las propiedades físicas del subsuelo llamada imagen invertida de resistividad o sección de resistividad eléctrica (Martínez-Pagán *et al.*, 2009). Este proceso de inversión se basa en el empleo de algoritmos matemáticos basados en el empleo de mínimos cuadrados (deGroot-Hedlin y Constable, 1990; Loke y Barker, 1996). El error cuadrático medio que se obtie-

ne para cada proceso de inversión (RMS) es una indicación de la bondad alcanzada en el ajuste entre los valores de resistividad aparente medidos en campo y los valores de resistividad eléctrica aparentes estimados a partir de un modelo sintético (Ernstson y Kirsch, 2006). Cuando se emplea el dispositivo Wenner-Schlumberger, valores de RMS iguales o inferiores al 10% son indicativos de muy buenas secciones eléctricas, aunque valores ligeramente por encima del 10% no deben ser descartables si la estructura del subsuelo es muy compleja o bien hay zonas altamente resistivas en superficie. En base a lo anterior, el rechazo final del perfil y la realización de otro, dependerá de si la sección eléctrica final obtenida proporciona una imagen, desde el punto de vista geológico, creíble.

Estudio Geotécnico

Como ya ha sido comentado, se llevó a cabo un sondeo mecánico en cada uno de los depósitos, realizado con una tubería de 101 mm de diámetro en los primeros 7 m de profundidad en San Cristóbal y en los 1,8 m en Las Moreras, continuando el resto con tubería de 98 mm de diámetro hasta completar un total de 9,90 y 12 m en San Cristóbal y Las Moreras, respectivamente. A partir de los 8,20 y 10 m se cortó con el sustrato en San Cristóbal y Las Moreras, respectivamente. Las muestras analizadas se obtuvieron de los tramos 5,00-5,20; 6,40-6,60; 8,80-9,00 m para Las Moreras y de los tramos 1,20-1,40; 3,00-3,60; 4,20-4,50 y 7,30-7,50 m para San Cristóbal.

A partir de las muestras y valores obtenidos en los trabajos de campo se procedieron a realizar los siguientes ensayos: granulometría (BS, 1975; ASTM, 1980), índice de plasticidad mediante los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) (BS, 1975), ensayo de permeabilidad a la profundidad de 4,5 m mediante el ensayo de Lefranc con carga constante, ensayo de penetración estándar (SPT) a la profundidad de 3 m (ASTM, 1980). Para la clasificación de los residuos se ha optado por utilizar las clasificaciones típicas de la mecánica de suelos, tales como el sistema unificado de clasificación de suelos U.S.C.S. (ASTM, 1980) y en el sistema de clasificación AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Con los resultados obtenidos de los ensayos anteriores se evaluó la licuefacción de los materiales (Tsuchida, 1970; Ishiara, 1985) y su estabilidad estructural con rotura circular y no circular, con y sin variable sísmica mediante el método simplificado de Bishop, Jambu simplificado y corregido y Spencer (Bishop, 1955; Jambu, 1954).

Finalmente, y para saber si los depósitos son estables estructuralmente, se realizó la comparación de los coeficientes de seguridad con los estipulados por la normativa (BOE, 2000). Destacar que la sección considerada en el cálculo de la estabilidad de cada uno de los depósitos corresponde son las pseudosecciones eléctricas 2D de los perfiles 3 (San Cristóbal) y 5 (Las Moreras).

Resultados y discusión

Riesgos potenciales tras el colapso de los depósitos o por materiales erosionados

San Cristóbal

Los valores de pH presentan cierta homogeneidad en la superficie del depósito, siendo extremadamente ácidos (<2,5), siendo semejantes a las encontradas en profundidad, con valores que varían entre 3,8 y 5,2 (Tabla 1); clasificados como fuertemente ácidos (Soils Survey Division Staff, 1993). Por el contrario, en el sustrato el pH se incrementa considerablemente variando entre 7,5 y 7,8; pasando a ser suelos medianamente básicos, valores comunes en suelos desarrollados en ambientes semiáridos (Yaloon, 1997).

La conductividad eléctrica en las muestras de superficie es elevada entre 12 a 32 dSm⁻¹ (Tabla 1), siendo clasificadas como muy salinas. Mientras que en profundidad son consideradas como fuertemente salinas (11 y 13 dSm⁻¹). Por el contrario, las muestras tomadas en el sustrato presentan una salinidad algo inferior, catalogada como moderada. Es conocido que la CE está relacionada con el pH, ya que cuando el pH decrece se produce una mayor disolución de las sales y, por lo tanto, un aumento en la CE (Conesa *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2003). En cuanto a la textura, la predominante es la franco limosa tanto en superficie como en profundidad, incluidas las muestras del sustrato.

Teniendo en cuenta los datos anteriormente comentados, si los lodos alcanzaran los suelos naturales colindantes, la acidez produciría un incremento en la movilidad de los metales y, por lo tanto, el riesgo de toxicidad para plantas y animales sería mucho mayor (Ross, 1994; Brallier *et al.*, 1996). Además, esta acidez provocaría una disminución en los contenidos de carbonatos por lo que la estructura del suelo también se vería afectada, incrementando la compactación, reduciendo la aireación y la retención de agua, de igual modo, la capacidad de retención de nutrientes se vería reducida y, por lo tanto, aumentaría considerablemente el estrés para la vegetación. Además, se produciría la salinización de los suelos, por lo que el crecimiento de las plantas se vería severamente reducido y se favorecería la presencia de plantas halófilas, lo que disminuiría la biodiversidad actualmente presente en la zona.

En relación a los contenidos de metales totales, los valores medios de todas las muestras superficiales y sub-superficiales sobrepasan los límites establecidos por las diferentes legislaciones para Zn, Pb y Cd, por lo que se pueden considerar que están extremadamente contaminados (BOE, 1990; Ministry of Housing, 1994) (Tabla 2). Por el contrario, el depósito se podría considerar contaminado por cobre sólo en algunas zonas, tanto en la superficie como en profundidad. De forma similar se ha encontrado para todos los metales, que las menores concentraciones de todos ellos se encuentran en las muestras del sustrato, aunque igualmente estos contenidos muestran que el depósito se encuentra contaminado (Tabla 2). Referente a su distribución espacial, el depósito presenta un alto grado de contaminación en toda su superficie por la presencia de Pb, Zn y Cd, y claramente se observa que las áreas de mayor contaminación están localizadas en la zona norte y sur.

Estos datos ponen de manifiesto el alto grado de contaminación de los lodos que conforman este depósito, por lo que si se produjera un colapso de su

		pH			Conductividad (dSm-1)			Arcilla (%)			Limo (%)			Arena (%)		
		Superf.	Sondeo	Sust.	Superf.	Sondeo	Sust.	Superf.	Sondeo	Sust.	Superf.	Sondeo	Sust.	Superf.	Sondeo	Sust.
San Cristóbal	Media	2,0	4,4	7,6	23,3	12,0	7,5	8,3	9,1	15,4	50,1	60,3	33,2	41,7	30,6	51,5
	Error	0,0	0,2	0,2	2,2	0,3	0,9	0,5	0,4	0,8	4,6	4,8	1,5	4,7	4,9	0,6
	Mínimo	1,8	3,8	7,5	12,0	10,5	6,6	4,8	8,0	14,5	20,9	39,8	31,7	21,0	11,6	50,9
	Máximo	2,2	5,2	7,8	31,8	13,1	8,4	10,3	11,0	16,2	72,0	78,4	34,7	73,0	52,0	52,1
Las Moreras	Media	3,3	4,8	7,0	5,4	3,3	3,3	3,0	20,9	4,4	27,1	38,0	39,7	69,9	41,1	56,4
	Error	0,0	0,2	0,7	0,5	0,3	0,1	0,2	4,6	3,8	4,4	6,2	7,1	4,4	5,9	5,8
	Mínimo	3,1	3,7	5,6	3,0	1,9	3,2	2,1	1,0	0,6	8,0	20,2	30,4	34,8	17,9	45,7
	Máximo	3,5	5,4	7,7	8,7	4,2	3,5	4,3	44,8	12,0	62,9	81,1	53,7	88,8	70,4	65,7

Tabla 1. Propiedades de las muestras superficiales, del sondeo y del sustrato en los depósitos estudiados
 Table 1. Properties of the superficial, drilling-core and substrate samples in the two tailings ponds

		Zn (mgkg-1)			Pb (mgkg-1)			Cu (mgkg-1)			Cd (mgkg-1)		
		Superficial	Sondeo	Sustrato	Superficial	Sondeo	Sustrato	Superficial	Sondeo	Sustrato	Superficial	Sondeo	Sustrato
San Cristóbal	Media	9381	18245	3372	2958	3377	2123	84,5	159,9	80,8	23,0	21,5	8,0
	Error	1290	1111	1094	437	414	490	19,8	13,3	12,0	3,1	3,8	2,9
	Mínimo	3250	14570	2278	1014	1774	1633	9,3	106,1	68,8	9,9	11,9	5,2
	Máximo	15278	23233	4467	5508	5399	2613	268,3	222,7	92,9	42,4	38,3	10,9
Las Moreras	Media	1653	2138	5037	2881	4578	15752	58,6	109,1	86,8	2,3	3,3	32,2
	Error	115	415	1086	390	627	6245	8,3	16,0	32,6	0,4	0,8	15,2
	Mínimo	906	404	3460	1144	1239	3277	18,2	24,5	21,6	0,1	0,1	10,2
	Máximo	2613	4056	7119	5590	6487	22516	134,0	165,0	121,0	5,0	6,7	61,5
Máxima concentración de metales permitida por la legislación (mg kg ⁻¹)													
		Zn			Pb			Cu			Cd		
España		150-450			50-300			50-210			1-3		
Holanda		1000			400			500			5		
Dinamarca		720			530			190			12		

Tabla 2. Metales totales de las muestras superficiales, del sondeo y del sustrato en los depósitos estudiados
 Table 2. Heavy metals in the superficial, drilling-core and substrate samples in the two ponds

estructura se produciría la contaminación de las zonas próximas, impactando finalmente sobre la rambla de Las Moreras que desemboca al Mar Mediterráneo. Ante este evento se obligaría a la realización de costosos programas de recuperación de las zonas afectadas con el fin de disminuir los niveles de metales hasta valores por debajo de los indicados por la legislación.

Las Moreras

Los valores de pH en superficie no presentan diferencias significativas entre ellos, permitiendo definir todas las muestras como ultra ácidas (Soils Survey Division Staff, 1993) con un valor medio de 3,3 (Tabla 1). Por su parte, las capas sub-superficiales del depósito tienen una acidez inferior, con valores medios de 4,8; aunque siguen siendo extremadamente ácidas (Soils Survey Division Staff, 1993). Por el contrario, el sustrato es clasificado como neutro (7,0).

En relación a los resultados de la conductividad eléctrica en las muestras superficiales, el valor medio asciende a 5,4 dSm⁻¹ (Tabla 1), clasificadas como moderadamente salinas. Tanto en el sondeo como en el sustrato, esta salinidad es algo inferior (media 3,3 dSm⁻¹) con lo que pueden clasificarse como ligeramente salinas. En relación a la textura, el predominio de las fracciones arenosa y franco-arenosa tanto en superficie como en profundidad permite concluir que el depósito presenta, en términos generales, textura moderadamente gruesa, lo cual facilita la infiltración del agua.

En este caso, si se produjera un desprendimiento de los lodos que conforman el depósito o si se produjera el colapso del mismo, el impacto desde el

punto de vista de las propiedades edáficas de los residuos sería ligeramente inferior al del depósito comentado anteriormente. No obstante, y teniendo de referencia los valores registrados en el sustrato, se incrementaría considerablemente la acidez de los suelos con las consecuencias ya comentadas, a la vez que se produciría un ligero aumento de la salinidad.

En relación a las concentraciones de metales totales obtenidas, tanto el área superficial como las capas que conforman el depósito, éstas sobrepasan ampliamente los límites establecidos por las legislaciones mencionadas para los contenidos en Zn y Pb (BOE, 1990; Ministry of Housing, 1994) (Tabla 2), de modo que este depósito podría ser clasificado como extremadamente contaminado por estos metales. Por otro lado, las concentraciones medias de cadmio y cobre no sobrepasan el valor límite para considerar un suelo como contaminado por la legislación holandesa y danesa. Al contrario a lo que sucedía en el depósito anterior, las mayores concentraciones de todos ellos, a excepción del Cu, se encuentran en las muestras del sustrato (Tabla 2), lo que puede deberse a la acumulación de estos metales en el suelo procedentes de los residuos que se encuentran sobre ellos. En relación a su distribución espacial, las máximas concentraciones de Zn, Cu y Pb obtenidas en toda el área superficial del depósito se localizan claramente en el extremo sureste del depósito. Sin embargo, la distribución superficial de las concentraciones de Cd muestra que al suroeste del depósito aparecen mayores concentraciones.

En este caso, aunque con una menor intensidad que en el depósito San Cristóbal, el colapso de la estructura del depósito o el arrastre de lodos, tras eventos tormentosos o vientos de gran intensidad,

provocaría la dispersión de los metales hasta alcanzar zonas naturales próximas, como es la rambla de Las Moreras, perturbando su ecosistema, tanto desde el punto de vista de la contaminación por metales como por el sellado del suelo por los residuos arrastrados.

Evaluación geofísica de los depósitos de lodos

San Cristóbal

El perfil 1 estuvo formado por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre los electrodos de 2,5 metros con lo que se consiguió un perfil de 132,5 metros de longitud. La ubicación de este perfil fue establecida en función de la geometría del depósito con el fin de que el perfil geoelectrico alcanzara la máxima profundidad (Figura 1a).

En la Figura 1b se presenta la pseudosección geoelectrica procesada y corregida del perfil 1. Esta pseudosección se ha obtenido con un valor de error aceptable (10.6 %) lo que indica que el proceso de inversión se ha realizado con un ajuste adecuado entre los valores sintéticos del modelo generado en las iteraciones y los valores medidos. La pseudosección geoelectrica presenta la morfología resistiva del subsuelo (Figura 1b) en donde se observa claramente el espesor asignado a los estériles mineros definido a través de valores inferiores a 10 Ohm.m de resistividad y que ha servido como valor límite para señalar el comienzo del sustrato natural o zócalo.

Este perfil muestra un depósito con un estéril bastante uniforme en sus características resistivas en la zona noroeste con un incremento de la conductividad (valores inferiores a 8 Ohm.m). Sin embargo, en la parte sureste del perfil se refleja un cambio en las características de los materiales más superficiales relacionado con un incremento de la resistividad a través de valores de resistividad eléctrica superiores a 8 Ohm.m. Es interesante hacer notar que esta zona más resistiva estaba fuertemente sometida a procesos de erosión y a la formación de microfisuras sobre su superficie.

La pseudosección indica un incremento de la profundidad hacia la parte sureste del perfil con espesores de estéril ligeramente superiores a 12 metros. Hacia la zona noroeste, también se detecta un espesor de estéril en torno a los 12 metros, pero se aprecia una tendencia decreciente hacia el final del perfil, ya que el extremo se encuentra próximo a la ladera natural del cabezo San Cristóbal. La zona central es donde se refleja menos espesor con profundidades de 11 metros. El incremento que se detecta hacia el

sureste, es por otra parte lógico con la información que se tiene del depósito, ya que es hacia esta zona donde se encuentra el dique.

El perfil 2 de tomografía eléctrica estuvo formado también por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre los electrodos de 2,5 metros con lo que se consiguió un perfil de 132,5 metros de longitud (Figura 1c). Este perfil también se desplegó diagonalmente cubriendo su longitud los diferentes niveles del depósito (Figura 1a).

La Figura 1c muestra la sección geoelectrica del perfil 2 con un error de ajuste del 18.0 %. La pseudosección indica el cambio de material que se produce al noreste del mismo. También confirma la poca profundidad de estéril cerca del electrodo n° 1 (entre 0-5 metros de espesor) debido a la presencia de la ladera del cabezo de San Cristóbal y que penetra lateralmente al depósito formando el valle que sirvió de zona de vertido de estériles.

Sobre toda la sección eléctrica destaca de forma clara la zona ocupada por el estéril ya que tiene una resistividad homogénea con valores muy bajos de resistividad eléctrica (<10 Ohm.m). Hacia la parte noreste de la sección eléctrica, concretamente a partir del electrodo n° 39, se puede observar un incremento importante de la resistividad eléctrica, con valores superiores a 150 Ohm.m, de los estériles más superficiales, y que según observaciones llevadas a cabo in situ, responde a otra zona fuertemente sometida a procesos de erosión hídrica con la generación de importantes fisuras.

El perfil 3 estuvo formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre los electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud (Figura 1d). Este perfil se orientó longitudinalmente de forma que el perfil no sólo cubriera en su totalidad el depósito sino que se extendiera más allá de los límites del mismo, esto fue posible ya que había suficiente espacio para la instalación de los electrodos con una mayor separación, y así tener la garantía suficiente de alcanzar el zócalo. Esto permitiría ubicar de forma adecuada el estéril almacenado. Por supuesto, también poder poner de manifiesto cualquier anomalía estructural que pudiera estar presente en su interior (Figura 1a).

La Figura 4 muestra la sección eléctrica del perfil 3 con un error de ajuste del 9.1 %. Este resultado es coherente con los resultados obtenidos en los anteriores perfiles y, por tanto, viene a confirmar el estilo geomorfológico de los estériles mineros y del zócalo original. Según la sección eléctrica, a medida que nos acercamos al talud del depósito el espesor de los

materiales va aumentando, como es de esperar, por otra parte, en balsas de lodos construidas aguas abajo sobre valle, alcanzando valores de 15 metros en dicha zona.

En la zona opuesta también se ha detectado un incremento en el espesor de los materiales depositados alcanzando profundidades entre 15 y 20 metros.

La sección eléctrica también refleja un aumento en los valores de resistividad eléctrica entre el electrodo n° 1 y el electrodo n° 12, con valores superiores a 8-9 Ohm.m, debido a que estos electrodos están situados fuera del perímetro de la balsa de lodos, sin embargo al ser zonas de inundación, arrastre y deposición de estériles y finos, estos valores de resistividad eléctrica permanecen relativamente bajos. Por otro lado, la proximidad de la ladera del cabezo de San Cristóbal, es reflejada sobre la sección con valores de resistividad superiores a 100 Ohm.m.

Una vez realizada la interpretación de cada uno de los perfiles, esta información se ha tratado con el programa Surfer, de Golden Software, para obtener la superficie de contacto entre el sustrato rocoso y el estéril minero. Este modelo 3D, que se presenta en la Figura 1e, proporciona las profundidades hasta el contacto estéril-sustrato desde la superficie del terreno.

En el modelo 3D se observa una zona situada al este donde se presenta el mayor volumen de material depositado con espesores que pueden llegar hasta los 18 metros. La zona con menos espesor se encuentra hacia el oeste del depósito y coincide con la superficie de la ladera que penetra en el depósito.

Se ha llevado a cabo una cubicación del material dispuesto con la información aportada por los perfiles geoelectrónicos. Para ello se ha empleado el método trapezoidal (Orche, 1999) obteniéndose un volumen de 116494 m³ y el método de Simpson (Orche, 1999) obteniéndose un volumen de 116506 m³.

Las Moreras

El perfil 4 de tomografía eléctrica estuvo formado, al igual que los perfiles anteriores, por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre los electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud. El perfil 4 se dispuso diagonalmente a este depósito, con el fin de cubrir su superficie (Figura 2a).

La sección eléctrica procesada de este perfil se obtuvo con un error del 5.2 %, siendo un valor de ajuste muy bueno. Lo importante de la información que se presenta en la Figura 2b es la zona ocupada por el estéril, que como viene siendo habitual en las

secciones eléctricas llevadas a cabo sobre depósitos de estériles mineros de sulfuros metálicos, se identifica de forma clara a través de valores bajos de resistividad eléctrica (<10 Ohm.m). El espesor del estéril, obtenido por el método de tomografía eléctrica, en el centro del depósito ha sido de 15 metros, a partir de dicha profundidad comienza a aparecer el sustrato natural identificado con valores de resistividad eléctrica en aumento (> 50 Ohm.m).

El perfil 5 de tomografía eléctrica estuvo formado, al igual que los perfiles anteriores, por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre los electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud. El perfil 5 se dispuso diagonalmente a este depósito (Figura 1), con el fin de cubrir su superficie.

La sección eléctrica obtenida para este perfil se alcanzó con un error del 5.1 %. Este perfil al haberse emplazado sobre el mismo depósito que el perfil 4, comentado anteriormente, es lógico que los resultados sean similares, lo que muestra la coherencia de las medidas realizadas. Así, se puede ver sobre la sección de la Figura 2c, la zona conductora (<10 Ohm.m) que representa al estéril minero y que alcanza su mayor profundidad en la zona central (17 metros); a partir de ahí los valores de resistividad eléctrica comienzan a incrementarse mostrando la presencia del sustrato natural.

El modelo obtenido combinando la información extraída de los perfiles de tomografía eléctrica 4 y 5 (Figura 2d) indica las zonas del depósito donde se encuentran los mayores espesores de estéril. Estas zonas, según la escala de profundidades, pueden alcanzar los 21 metros. Según el modelo, los mayores espesores se presentarían en la parte oeste del depósito; por otro lado, los menores espesores de estéril se encontrarían localizados en la parte este, siendo estos espesores próximos a 11 metros.

Estabilidad estructural de los depósitos mineros

San Cristóbal

Como se puede observar en la Tabla 3, las muestras analizadas tienen un porcentaje superior al 50% de material que pasa a través del tamiz 0,08 mm, por lo que se clasifican como un suelo de grano fino. Por su parte, los valores de los índices de plasticidad son muy similares y elevados, lo que equivale con una baja capacidad drenante. El ensayo Lefranc dio como resultado un volumen de agua estabilizado medio de $4,2 \times 10^{-3}$ l/min siendo la permeabilidad de $2,45 \times 10^{-6}$

Profundidad (m)	Índices de Attenberg			Granulometría (% que pasa)			Clasificación de los lodos	
	LL	LP	IP	5 mm	2,40 mm	0,08 mm	U.S.C.S.	A.A.S.H.T.O.
1,2-1,4	40,6	25,9	14,7	100	100	97,6	CL	A-6
3,0-3,6	32,8	21,5	11,3	100	100	96,6	CL	A-6
4,2-4,5	40,1	24,1	16	100	100	98,6	CL	A-6
7,3-7,5	37,7	21,6	16,1	100	100	98,4	CL	A-6

Tabla 3. Características geomecánicas de las muestras del depósito San Cristóbal
 Table 3. Geotechnical characteristics of the samples from the San Cristóbal tailings pond

cm/s, dichos valores son considerados característicos para balsas de lodos, con un cierto grado de consolidación (Vick, 1990).

Con estos datos, los lodos a todas las profundidades estudiadas, se clasifican, según U.S.C.S., como: arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla (CL); y, según A.A.S.H.T.O., como: arcillosos (A-6) (Tabla 3), los cuales presentan una cohesión máxima de 38 kPa y una fricción de 17°. Estos valores están tipificados para suelos compactados. Aunque las balsas están constituidas por materiales que no han recibido ningún grado de compactación cuando se realizan vertidos sucesivos y continuos de lodos, se origina un gradiente de presión debido al peso de éstos que hace que el agua escape hacia las superficies libres, con lo cual los lodos se consolidan, reduciéndose su porosidad.

De acuerdo con los límites de Tsuchida (1970) e Ishiara (1985), las muestras obtenidas se distribuyen dentro de las fronteras pertenecientes a los suelos potencialmente licuefactibles, quedando fuera de las de mayor probabilidad de licuefacción. Dichas muestras se sitúan paralelamente a los límites indicativos de residuos mineros limosos con baja resistencia a la licuefacción.

Para el análisis de la estabilidad de los materiales se utilizaron los métodos: simplificado de Bishop,

Janbu Simplificado, Janbu Corregido y Spencer, considerando dos tipos de supuestos: el primero basado en la aparición de rotura circular y el segundo sin que ésta se produzca (caso menos frecuente), en ambos casos se evaluó la presencia o no de acción sísmica (Tabla 4).

En la Tabla 4 se puede apreciar que los métodos de Bishop, Janbu Corregido y Spencer para rotura circular son aproximados, estando la mayor dispersión en el método de Janbu Simplificado, mostrando todos ellos que el depósito es estable estructuralmente. Cuando se añade el factor sísmico se observa que los valores han disminuido. Estando todos los valores muy próximos a la unidad, valor que indica el equilibrio estricto de la estructura. Sin embargo, para el método de Janbu Simplificado se está por debajo de dicho valor lo que implicaría la rotura del depósito. En el caso de rotura no circular (aleatoria), los resultados alcanzados por los cuatro métodos demuestran que la posibilidad de producirse este tipo de rotura es muy escasa debido a los valores altos que se obtienen (Tabla 4). De la misma forma que para los casos anteriores, los factores de seguridad son parecidos apreciándose una ligera disminución en el método de Janbu Simplificado. Cuando se le añade el factor sísmico, los resultados alcanzados muestran una disminución. Pero en este caso están por encima del equilibrio estricto para todos los métodos.

Método	San Cristóbal				Las Moreras	
	Rotura circular	Rotura circular + acción sísmica	Rotura no circular	Rotura no circular + acción sísmica	Rotura circular	Rotura circular + acción sísmica
Bishop Simplificado	1,324	1,034	1,721	1,24	3,487	2,74
Janbu Simplificado	1,235	0,958	1,605	1,2	3,39	2,604
Janbu Corregido	1,313	1,019	1,735	1,242	3,634	2,789
Spencer	1,322	1,034	1,743	1,263	3,497	2,751

Tabla 4. Factores de seguridad del análisis de estabilidad de los depósitos estudiados
 Table 4. Security factors deriving from a stability analysis of the studied ponds

Las Moreras

Como se puede observar en la Tabla 5, las dos primeras muestras tienen un porcentaje superior al 50% de material que pasa a través del tamiz 0,08 mm (suelo de grano fino), situándose la restante próxima a este valor, por lo que se clasifican como un suelo de grano fino. Por su parte, los valores de los índices de plasticidad son muy similares y elevados, lo que equivale a materiales finos con baja capacidad drenante.

El ensayo Lefranc dio como resultado un volumen de agua estabilizado medio de $3,3 \times 10^{-5}$ l/seg siendo la permeabilidad de $3,67 \times 10^{-7}$ cm/s, dichos valores son considerados característicos de depósitos de lodos procedentes de arenas depositadas periféricamente en la playa, con menos de 30% de finos (Vick, 1990).

Con estos datos, los lodos se clasifican, según U.S.C.S., como: primera muestra, arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas (CH); segunda muestra, limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos (MH); y tercera muestra, arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla (SC). Y, según A.A.S.H.T.O., como: primera y segunda muestra, suelos arcillosos (A-7); y tercera muestra, suelo arenoso (A-4) (Tabla 5). Según NAVFAC (1971), las propiedades típicas para suelos CH son: cohesión máxima de 50 kPa y una fricción 19° , para suelos MH son: cohesión máxima de 30 kPa y una fricción 25° , y para suelos SC son: cohesión máxima de 30 kPa y una fricción 31° .

De acuerdo con los límites de Tsuchida (1970) e Ishiara (1985), las muestras obtenidas se distribuyen dentro de las fronteras pertenecientes a los suelos potencialmente licuefactibles, quedando fuera de las de mayor probabilidad de licuefacción. Dichas muestras se sitúan en el interior de los límites indicativos de residuos mineros limosos con baja resistencia a la licuefacción.

Para el análisis de la estabilidad de los materiales se utilizaron los métodos: simplificado de Bishop,

Janbu Simplificado, Janbu Corregido y Spencer, considerando la aparición de rotura circular, así como con y sin el efecto de la acción sísmica (Tabla 4).

En la Tabla 4 se puede apreciar que los métodos de Bishop, Janbu Simplificado y Spencer para rotura circular son aproximados, estando la mayor dispersión en el método de Janbu Corregido, mostrando todos ellos que el depósito es estable estructuralmente. Cuando se añade el factor sísmico se observa que los valores han disminuido. Siendo todos los valores superiores a 2,5; valor que indica el equilibrio estricto de la estructura. Comparando ambos depósitos, Las Moreras presenta factores de seguridad muy superiores a los encontrados en San Cristóbal, por lo que en un principio, las medidas más urgentes para reducir riesgos de colapso deberían llevarse a cabo en este último depósito.

Conclusiones

De acuerdo con los datos geoquímicos, los lodos que conforman ambos depósitos generan un riesgo potencial sobre los ecosistemas cercanos a ellos principalmente sobre las áreas de escorrentía hacia la Rambla de Las Moreras, la cual desemboca finalmente al Mar Mediterráneo. El efecto de una elevada acidez generada por la disolución de los sulfatos presentes en los residuos mineros produciría un incremento en la movilidad de los metales y, por lo tanto, el riesgo de toxicidad para plantas y animales. Los materiales sedimentados a lo largo de drenajes y de la Rambla incrementarían la compactación, reduciendo la aireación y la retención de agua y nutrientes, así como un incremento en la salinización de los suelos, por lo que el crecimiento de plantas se vería severamente reducido, favoreciendo la presencia de plantas halófilas, lo que reduciría la biodiversidad actualmente presente en la zona.

Por otro lado, las elevadas concentraciones de metales presentes en los depósitos, especialmente Pb y Zn, generan un riesgo de contaminación de las

Profundidad (m)	Índices de Attenberg			Granulometría (% que pasa)			Clasificación de los lodos	
	LL	LP	IP	5 mm	2,40 mm	0,08 mm	U.S.C.S.	A.A.S.H.T.O.
5,0-5,2	50,6	25,7	24,9	100	100	98	CH	A-7
6,4-6,6	62	35,3	26,7	100	100	99,8	MH	A-7
8,8-9,0	32,7	23,2	9,5	95	87,1	44,3	SC	A-4

Tabla 5. Características geomecánicas de las muestras del depósito Las Moreras
 Table 5. Geotechnical characteristics of the samples from the Las Moreras tailings pond

zonas pobladas y agrícolas próximas a estos depósitos, en el caso en que se produjera un colapso de la estructura de los mismos o bien la erosión tanto hídrica como eólica arrastraría lodos a las zonas colindantes, lo que obligaría a la realización de programas de recuperación de las zonas afectadas con el fin de disminuir los niveles de metales hasta valores por debajo de los indicados por la legislación.

La tomografía eléctrica de ambos depósitos muestra que los valores de resistividad eléctrica atribuidos al material vertido son inferiores a 10 Ohm·m, indicando por ello que se trata de un material de muy baja resistividad eléctrica, como es lógico por otro lado de sustancias procedentes del procesamiento de minerales metálicos. Los perfiles eléctricos de San Cristóbal muestran un incremento del espesor hacia el este del depósito. La tomografía eléctrica ha revelado la geomorfología del zócalo, lo que ha permitido estimar con mayor precisión los espesores de estéril. En el caso de Las Moreras, los perfiles han mostrado un depósito de grandes dimensiones que en su zona oeste alcanza los 20-21 metros de profundidad. Ninguna de las seudosecciones estudiadas han puesto de manifiesto cerca de los taludes o diques, regiones con morfología de fractura (caracterizadas por valores bajos de resistividad eléctrica) que puedan comprometer la estabilidad de las estructuras.

Los depósitos estudiados son estables a gran escala, con unos coeficientes de seguridad, ante un posible colapso, superiores a los valores exigidos por la normativa para este tipo de estructuras. En el depósito San Cristóbal suponiendo con rotura circular y considerando la acción sísmica, los valores del factor de seguridad son críticos, por lo que se aconseja la realización de inspecciones visuales periódicas con el fin de recoger información sobre aparición de humedades o surgencias en el paramento del dique, asentamientos de la coronación del dique o cualquier tipo de deslizamiento en el frente del mismo. Además, se debe inspeccionar la estructura de los depósitos después de cada sismo, siendo muy importante reparar rápidamente cualquier daño originado.

A pesar de la estabilidad de los depósitos, y debido a que nos encontramos en un área de climatología semiárida, con un régimen pluviométrico irregular, escasa vegetación colindante, y elevados niveles de escorrentía superficial, el principal deterioro que se observa en los depósitos son los intensos (acelerados) procesos erosivos en las pendientes laterales y en la superficie. Por lo que se recomienda una actuación con aplicación de técnicas de rehabilitación más utilizadas como es la aplicación de enmiendas que mejoren las características geoquímicas superficiales, en cuanto a su estructura, reducción

de la movilidad y toxicidad de los metales, aporte de nutrientes, de modo tal que estas nuevas condiciones favorezcan la colonización de la vegetación. Estas actuaciones reducirían considerablemente la erosión y los riesgos de transporte de sedimentos y de metales en las aguas de escorrentía hacia las cuencas de drenaje.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia la financiación de este trabajo. R. Zornoza agradece la concesión de un contrato Juan de la Cierva al Ministerio de Educación y Ciencia. J. A. Acosta agradece la concesión de una beca de investigación a la Fundación Séneca de la Región de Murcia.

Referencias

- ASTM (American Society for Testing of Materials). 1980. Annual Book of ASTM Standards.
- Andrades, M. 1996. *Prácticas de Edafología y Climatología*. Universidad de la Rioja (ed.). Logroño, La Rioja, España, 14-16 p.
- Arana, R., Pérez, C. y Ortiz, R. 1993. *Explotaciones mineras e impacto ambiental en el sector de Mazarrón (Murcia)*. Universidad de Murcia, Murcia, 834 pp.
- BOE. 2000. Instrucción Técnica Complementaria del capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera "Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas". *Boletín Oficial del Estado* n° 111, de 9 de mayo de 2000. Enmienda en el Boletín Oficial del Estado n° 156, del 30 de julio de 2000. Ministerio de Industria de España.
- BS. 1975. Methods of test for soils for civil engineering purposes, British Standards Institution, London.
- Bishop, A.W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, (5) 1, 7-17.
- BOE. 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se Regula la Utilización de los Lodos de Depuración en el Sector Agrario. *BOE* n° 262 de 1 de noviembre de 1990, Madrid, 32339-32340.
- Bowman, W.S., Faye, G.H., Sutarno, R., McKeague, J.A. and Kodama, H. 1979. Soil Samples SO-1, SO-2, SO-3 and SO-4. Certified Reference Materials. CANMET Report 79-3. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, Ottawa, ON. 34 pp
- Brallier, S., Harrison, R.B., Henry, C.L. and Dongsen, X. 1996. Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni and Zn in soil amended with sewage sludge 16 years previously. *Water, Air and Soil Pollution*, 86, 195-206.
- Chaoyang, W., Cheng, W. and Linsheng, Y. 2009. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in

- Shuikoushan, Hunan Province, China. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1230-1236.
- Conesa, H.M., Robinson, B.H., Schulin, R. and Nowack, B. 2007. Growth of *Lygeum spartum* in acid mine tailings: response of plants developed from seedlings, rhizomes and at field conditions. *Environmental Pollution*, 145, 700-707.
- Daniels, J.J. 1988. Locating caves, tunnels and mines. *The Leading Edge of Exploration*, 32-52.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Ernstson, K. and Kirsch, R. 2006. Geoelectrical Methods. En: Reinhard Kirsch (ed.), *Groundwater Geophysics*, Springer, 85-117.
- FAO-ISRIC. 2006. *Guidelines for Soil Description*. 4th edition (revised). FAO, Roma, 97 pp.
- Ferrándiz, C. 2002. Los Almazarrones. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, 285 pp
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., De Ignacio-San José, C. and Lillo, J. 2010. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Near Surface Geophysics*, 8, 65-74.
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Lillo, J., López, I., Carreño, F., Martín-González, F., Herrera, R. and De Pablo, M.A. 2007. Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to investigate volcanic materials and structures in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 62, 287-300.
- Hanna, K. and Pfeiffer, J. 2007. Geophysical technologies to image old mine works. *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 20 (1), 1527-1537.
- Hutchinson, J. 2005. Electrical imaging of deep clay-mine voids. *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 18(1), 247-279.
- IRIS Instruments. 2001. Syscal switch v. 11.4. User's manual, Orleans, France, 66 pp.
- Jambu, N. 1954. Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. *European Conference on Stability Analysis*, Stockholm, Sweden.
- Loke, M.H. 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, 61 pp.
- Loke, M.H. 2004. *RES2Dinv software*. Geotomo Software Company.
- Loke, M.H. and Barker, R.D. 1996. Rapid left-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, (1), 131-152.
- Martínez-Pagán, P., Faz Cano, A., Aracil, E. and Arocena, J.M. 2009. Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 14(2), 63-76.
- Ministry of Housing. 1994. *Spatial Planning and the Environment. Intervention and Target Values-Soil Quality Standarts*. Report HSE 94.021. The Netherlands.
- NAVFAC. 1971. *Design Manual DM-7, Soil Mechanics Foundations and Earth Structures*. Naval Facilities Engineering Command. Washington D.C.
- Navarro, M.C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Vidal, J., Tovar, P.J. and Bech, J. 2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 183-193.
- Orche, E. 1999. *Manual de Evaluación de Yacimientos Minerales*. Editorial Entorno Gráfico. 330 pp.
- Parkpian, P., Leong, S.T., Laortanakul, P. and Torotoro, J.L. 2002. Influence of salinity and acidity on bioavailability of sludge-borne heavy metals. A case study of Bangkok municipal sludge. *Water, Air and Soil Pollution*, 139, 43-60.
- Pazdirek, O. and Blaha, V. 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. *EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts*, Amsterdam, Netherlands.
- Peech, M. 1965. Hydrogen-ion activity. En: C. A. Black (ed.), *Methods or Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA 2, 914-916.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz Barriga, F. and Monroy, M. 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air and Soil Pollution*, 152, 129-152.
- Risser, J.A. and Baker, D.E. 1990. Testing soils for toxic metals. En: Westerman, R. L. (ed.), *Soil Testing and plant analysis*. Soil Sci. Soc. Amer. Spec. Publ. 3. 3rd ed., Madison, Wi.p. 275-298.
- Rodríguez, L., Ruiz, E., Alonso-Azcarate, J. and Rincon, J. 2009. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90, 1106-1116.
- Ross, S.M. 1994. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. En: Ross, S.M. (ed.), *Toxic Metals in Soil-plant Systems*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK, 63-152.
- Seidel, K. and Lange, G. 2007. Direct current resistivity methods. En: Knödel, K., Lange, G., Voigt, H. (ed.), *Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies*, Springer, 205-238.
- Simon, M., Ortiz, I., Garcia, I., Fernandez, E., Fernandez, J., Dorronsoro, C. and Aguilar, J. 1999. Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznalcollar, Spain). *Science of the Total Environment*, 242, 105-115.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. USDA Handbook 18, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Sumanovac, F. and Weisser, M. 2001. Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains. *Journal of Applied Geophysics*, 47, 13-28.
- Szalai, S. and Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 56, 109-175.
- Tejero, A., Chávez, R.E., Urbieta, J. and Flores-Márquez, E.L.

2002. Cavity detection in the Southwestern Hilly Portion of Mexico City by resistivity imaging. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 7 (3), 130-139.
- Tsuchida, H. 1970. Prediction and Countermeasure Against the Liquefaction in Sand Deposits. *Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute*, pp. 3.1 -3.3 (in Japanese).
- Vick, S.G. 1990. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Bitech Publishers, Ltd. Canada. 382 pp.
- Wong, M.H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50, 775-80.
- Yaalon, D. 1997. Soils in the Mediterranean region: what makes them different? *Catena*, 28, 157-169.
- Zanuzzi, A., Arocena, J.M., van Mourik, J.M. and Faz, A. 2009. Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, 154, 69-75.

Recibido: diciembre 2010
Revisado: diciembre 2010
Aceptado: febrero 2011
Publicado: abril 2011

