

# Actuaciones para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre el terreno, y su restauración edáfica y morfológica

Coordinador: Daniel Baretino<sup>(1)</sup>

Autores: C. Antón-Pacheco<sup>(1)</sup>, J. C. Arranz<sup>(1)</sup>, D. Baretino<sup>(1)</sup>, G. Carrero<sup>(2)</sup>, M. Giménez<sup>(3)</sup>, J. A. Gómez<sup>(3)</sup>, J. C. Gumiel<sup>(1)</sup>, E. López Pamo<sup>(1)</sup>, J. A. Martín Rubí<sup>(1)</sup>, B. Martínez Pledele<sup>(1)</sup>, E. de Miguel<sup>(3)</sup>, J. Moreno<sup>(4)</sup>, G. Ortiz<sup>(1)</sup>, J. G. Rejas<sup>(3)</sup>, A. Silgado<sup>(5)</sup> y E. M. Vázquez<sup>(2)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Madrid

(2) Oficina Técnica del Corredor Verde del Guadiamar. Sevilla

(3) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Torrejón de Ardoz (Madrid)

(4) Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla

(5) Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla

## RESUMEN

Tras el accidente de la balsa minera de Aznalcóllar se emprendieron una serie de actuaciones cuyo objetivo final era la retirada de los lodos piríticos depositados sobre el terreno a lo largo del río Agrio y Guadiamar, y posterior recuperación de los suelos y sistema morfológico fluvial. Primeramente se realizó una cartografía de distribución espacial de los lodos, que permitió conocer superficies afectadas, espesores y volúmenes de lodo sedimentados, y que fue básica para la toma de decisiones y planificación de las actuaciones de retirada de los lodos. A partir de ella, la obra en sí de retirada de los lodos ha supuesto un hito, pues en un plazo temporal muy reducido se ha podido retirar la mayor parte del residuo minero, tanto en zonas de cauce como en terrenos agrícolas, en una extensión de la actuación de unos 42 km<sup>2</sup> incluyendo la actuación en Entremuros, de gran heterogeneidad en cuanto a cubierta vegetal y usos del suelo.

Para efectuar el seguimiento de las obras de retirada de lodos se han realizado una serie de campañas de vuelos con el sensor multispectral Daedalus- 1268 ATM. La realización de vuelos una vez finalizadas las tareas de retirada de los residuos mineros ha permitido obtener una cartografía de áreas con lodo remanente, que ha facilitado las labores posteriores de limpieza en estas áreas.

Las obras de retirada de lodos han supuesto una afección a los suelos complementaria a la propia contaminación generada por el residuo minero, puesto que la retirada por medios mecánicos ha inducido la extracción también de parte del perfil edáfico, pérdida de la fertilidad y modificación de la estructura de los suelos. Este movimiento de tierras de una magnitud sin precedentes, ha supuesto importantes modificaciones en la morfología del sistema fluvial. Los tratamientos edáficos encaminados a la restauración de los suelos, y la restauración morfológica de la cuenca, se abordan en el marco más complejo de la creación del Corredor Verde del Guadiamar.

Palabras clave: Cartografía, Geoquímica, Recuperación de suelos, Restauración, Teledetección.

## ***Mapping and removal of the sludge deposited on land. Soil remediation and morphological restoration of the fluvial system.***

### ABSTRACT

*After the failure of the Aznalcóllar mine dam, a number of activities were carried out in order to, first, remove the pyritic sludge deposited along the Agrio and Guadiamar river valleys and, second, to remediate the soils and to restore the fluvial morphology. A map of the spatial distribution of the sludge was made. This map showed the affected area, and the thickness and volume of the sludge deposit. This survey was critical for the decision-making process and the sludge removal planning. Sludge removal was a milestone in itself, as most of the mining waste was removed in a very short period. It was carried out both in the riverbed and in agricultural soil, encompassing a surface of about 42 km<sup>2</sup>, including Entremuros, with very heterogeneous plant cover and land uses.*

*Four multispectral Daedalus-1268 airborne surveys were performed over the affected area in different periods to evaluate the efficiency of this system for monitoring soil condition during and after the sludge removal. Digital classification of the multispectral data has allowed mapping, at 1:10 000 scale, the remnant pyritic sludge and the highly soluble sulfate salts which present a high acidity potential. These maps helped planning subsequent cleanup works.*

*Sludge removal works resulted in an additional impact on the soils, besides the contamination due to the mining waste. Mechanical removal involved the extraction of part of the soil profile, loss of fertility and changes in the soil structure. This soil removal, of a huge extension, have ment important modifications in the fluvial system morphology. Soil remediation and morphological restoration of the basin are being raised in the framework of the Guadiamar Green Corridor.*

*Key words: Geochemistry, Mapping, Remote sensing, Restoration, Soil remediation.*

## INTRODUCCIÓN

*Daniel Barettino*

Tras la rotura del dique de la balsa de lodos procedentes de la planta de concentración de minerales del complejo minero de Aznalcóllar, la comisión de coordinación entre la Administración General del Estado y la Junta de Andalucía, creada de forma inmediata para abordar las medidas de urgencia necesarias para minimizar los efectos del accidente, tomó rápidamente la decisión clave de retirar los residuos mineros que se habían depositado en la cuenca del Guadiamar tras el paso de la avenida provocada por el derrame de los lodos al río Agrio.

Otra decisión que tomó rápidamente dicha Comisión fue la de retener las aguas ácidas de la avenida en la zona de Entremuros mediante la construcción de un dique de contención, de dirección transversal a la corriente y a los dos muros paralelos a ella. Con ello se confinaron las aguas de elevada acidez y contenido en metales pesados, impidiendo su entrada en los terrenos del Parque Nacional de Doñana, así como los posibles efectos negativos hacia aguas abajo, en el Estuario del Guadalquivir. Las aguas retenidas fueron tratadas para su depuración y posterior vertido hacia el río Guadalquivir (ver Capítulo 6).

El área cubierta por el lodo sedimentado se extendió hasta la cabecera de Entremuros, a unos 45 km de distancia de la balsa siniestrada. En la zona de Entremuros el suelo fue afectado por la precipitación y decantación de los metales pesados y otros compuestos presentes en las aguas retenidas, por lo que finalmente se decidió la retirada de la capa superficial de suelo, una vez

concluido el desembalse y vertido de agua tras su tratamiento de depuración.

El objetivo de este capítulo es describir de manera resumida las actuaciones que se abordaron para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre los terrenos de la cuenca del Guadiamar, así como las que se han venido afrontando para la recuperación de los suelos y la restauración morfológica del sistema fluvial tras las obras.

El apartado 5.1 describe una de las primeras actuaciones que se desarrolló con carácter de urgencia, con el fin de conocer con un suficiente nivel de detalle la distribución espacial de los lodos depositados sobre los terrenos. La realización de una cartografía de distribución y espesores a escala 1:10 000 permitió la estimación de volúmenes, y fue una herramienta básica para la toma de decisiones y para la planificación de las obras de retirada de lodos. En paralelo a los trabajos de campo para la realización de dicha cartografía, la toma de muestras a lo largo de toda la extensión de lodos sedimentados, y posterior analítica, permitió la caracterización mineralógica y química del residuo minero.

En el apartado 5.2. se describe la actuación de retirada de los lodos. Es una de las labores más complejas que ha habido que abordar como consecuencia del accidente en la balsa minera y, a la vez, una de las más satisfactorias, puesto que pocos podían pensar a los pocos días del accidente que ocho meses después los lodos habrían sido retirados. Esta complejidad radicaba en la gran extensión cubierta por el lodo (unos 27 km<sup>2</sup>) y volumen de material a retirar, el tiempo disponible que se marcó para la ejecución de las obras

en previsión del inicio del período de lluvias, la gran heterogeneidad de la zona afectada (cauce, bosquetes de ribera, terrenos agrícolas con diferentes cultivos) y de los espesores a retirar, sensibilidad de la población ante el material a transportar y medidas de seguridad en las diferentes operaciones. Además, no existían antecedentes de obras similares, por lo que hubo que ir modificando sobre la marcha los diseños y planificaciones iniciales de obra en función de la propia experiencia que se iba adquiriendo. Se describe la técnica utilizada para la retirada de lodos, tanto en el cauce como en terrenos agrícolas, las características remarcables de la obra, y la evolución temporal de la retirada en los diferentes tramos y sectores.

La obra de retirada se efectuó con medios mecánicos, y únicamente se realizaron manualmente las labores de afino y limpieza en las zonas no accesibles a la maquinaria. Debido a ello, y a la gran envergadura de la obra, quedó sobre el terreno un pequeño porcentaje de residuo pirítico. En el apartado 5.3 se describe la utilización de varias campañas de vuelos multispectrales Daedalus-1268 ATM, primeramente para efectuar el control y seguimiento de los trabajos de retirada de los lodos, y posteriormente para cartografiar con gran detalle las áreas con lodo remanente una vez finalizadas las obras. Esta cartografía es una herramienta básica que permite, o bien la extracción física mediante retirada de este lodo remanente, o bien los tratamientos edáficos correctivos en áreas conflictivas.

El apartado 5.4 trata de las actuaciones encaminadas a la restauración edáfica y morfológica del tramo afectado del sistema fluvial, en el marco del proyecto de Corredor Verde del Guadiamar promovido por la Junta de Andalucía. Los suelos de la zona afectada, además de la contaminación por metales pesados y otros elementos traza, han sufrido una pérdida de su fertilidad y estructura, a causa de la retirada del lodo por medios mecánicos, que ha supuesto también la extracción de parte del perfil edáfico, así como por compactación por la maquinaria. En este apartado se describen los diferentes tratamientos efectuados en los suelos, tanto para corregir la contaminación como para mejorar las propiedades edafológicas y fertilidad, y favorecer así las posteriores labores de siembra y plantación de especies vegetales. El

movimiento de tierras realizado durante las labores de retirada de lodo ha producido una importante modificación en la llanura de inundación y ribera en un tramo de 62 km en el río Guadiamar y 5 km en el río Agrío. Se discute también la filosofía y bases sobre las que se plantea la restauración morfológica.

### **5.1. Cartografía y cubicación de los lodos mineros vertidos en la cuenca del río Guadiamar, y su caracterización química y mineralógica**

*E. López Pamo, D. Barettino, G. Ortiz, J.C. Arranz, B. Martínez Pledel, J.A. Martín Rubí*

#### *Objetivos*

Los objetivos fundamentales de este trabajo han sido, por un lado, la realización en el menor tiempo posible de una cartografía de la distribución y espesores de los lodos mineros depositados en la cuenca del río Guadiamar, y a partir de esta cartografía estimar su cubicación (IGME, 1998), y por otro, proceder a su caracterización química y mineralógica (IGME, 1999; López-Pamo *et al.*, 1999).

Para alcanzar el objetivo con la urgencia requerida por la situación de emergencia, se dispuso de tres equipos autónomos de dos personas cada uno para realizar la campaña de reconocimiento y muestreo sobre el terreno. Dicha campaña tuvo lugar entre los días 11 al 17 de mayo de 1998, sin interrupción a pesar de las fuertes lluvias que obligaron incluso a detener las primeras labores de retirada del lodo ante las dificultades en el desplazamiento de la maquinaria.

#### *Bases topográficas y fotográficas*

Se ha utilizado como topografía básica la del Instituto de Cartografía de Andalucía (ICA), a escala 1:10 000, en formato digital. Se han usado además dos vuelos sobre la zona afectada. El vuelo perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) se ha realizado a escala 1:15 000, en blanco y negro. El de la Consejería de Medio Ambiente (CMA) es en color y a escala 1:10 000, resultando de gran utilidad para este trabajo.

Se ha contado también con una imagen satélite *spot* previa al vertido y dos imágenes *radarsat* posteriores al mismo, registradas el 30 de abril. Esta última imagen fue interpretada en el IGME, permitiendo una primera aproximación al conocimiento de la magnitud de la zona afectada por los lodos mineros previa al desplazamiento a la zona.

#### *Metodología del reconocimiento y obtención de datos sobre el terreno*

Sobre el terreno se han reconocido más de 60 perfiles/zonas a lo largo de los aproximadamente 40 km de cuenca afectada por la deposición del residuo minero. En cada uno de estos perfiles/zonas se recorrieron por término medio unos 600 m sobre los lodos. Así se puede afirmar que se han realizado itinerarios de reconocimiento sobre la zona afectada que alcanzan en su totalidad una longitud de 36 km. Esta cifra permite asegurar que se ha realizado al menos un reconocimiento visual de toda el área en la que se han depositado los lodos piríticos. Se han realizado unas 720 medidas puntuales del espesor de los lodos, lo cual equivale a 28 medidas por kilómetro cuadrado.

Como resultado final de estos trabajos se obtuvieron dos tipos de datos. Por un lado se tienen los asociados a un punto concreto perteneciente a un perfil, intersectando éste la capa de lodos desde su margen hasta el cauce, y por otro una serie de medidas puntuales de espesores de lodo asignables a un polígono o tesela coincidente en sus límites con una parcela agrícola, terraza fluvial, arboleda, gravera, tramo de cauce, etc. Este último conjunto de datos permite calcular un espesor medio asignable a cada polígono o tesela.

#### *Elaboración de la cartografía de lodos mineros*

Las unidades se han definido atendiendo a la posibilidad de asignación de una potencia media para toda la superficie contenida en cada una y a la homogeneidad. No sólo se ha atendido al hecho de que la potencia de lodos tenga un rango de variación pequeño en cada unidad, sino también a otras características relacionadas con

la retirada de lodos y al valor agrícola y ambiental. De este modo se han diferenciado, por ejemplo, unidades colindantes que tienen potencias medias muy similares, pero en las que el uso previo del terreno afectado es distinto, o se han agrupado en una sola unidad zonas con una misma problemática aunque la potencia de lodos sea variable, como es el caso de algunas zonas de antiguas graveras. En la base de datos asociada a la cartografía se presentan también las observaciones, de manera que circunstancias atípicas, como la recién descrita, quedan aclaradas, indicándose además las potencias máxima y mínima medidas en la unidad.

En la definición de los límites de las unidades se han tenido en cuenta los factores observados en campo que influyen en la distribución y espesor de los lodos. Aparte de los más obvios y generales, como son la distancia a la balsa, al cauce del río, o características topográficas, se han observado algunos factores que han sido tenidos en cuenta a la hora de situar estaciones de medida y definir las unidades. Entre ellos cabe destacar los siguientes: la vegetación ha favorecido generalmente la acumulación de lodos, como es el caso de carrizales, sotos de ribera, zonas donde la vegetación herbácea alcanza alturas decimétricas, zonas de olivares y frutales que no han sido escardadas el último año, etc. Sin embargo la vegetación arbórea no ha supuesto variaciones de consideración cuando no va acompañada de sotobosque. Los caminos, vallas y algunos otros elementos lineales han producido frecuentemente un efecto barrera a escala de detalle, que se traduce generalmente en acumulaciones mayores en sus cercanías. El estado de la superficie de los terrenos agrícolas ha influido en el sentido de que los cultivos bajo plástico o los frutales en regadío han acumulado mayores espesores de lodo, aunque las diferencias son, a lo sumo, centimétricas respecto a cultivos de cereales. En relación al estado de la superficie del terreno en zonas agrícolas, conviene señalar que los campos recién labrados han sufrido, además de mayor acumulación de lodos como consecuencia de la microtopografía, una penetración en profundidad no observada en los demás campos, siendo el contacto lodo-suelo en estos últimos muy nítido, no observándose en ellos penetración, salvo siguiendo el sistema radicular de las plantas.

Como resultado se ha obtenido una división de la "mancha" de lodos en 168 unidades. Posteriormente se procedió a la digitalización de la cartografía de las unidades reflejadas sobre cada una de las hojas del Mapa Topográfico de Andalucía (MTA) a escala 1:10 000. Los archivos digitales resultantes se unieron en una sola cobertura, se asignaron los identificadores de los polígonos y se generó la topología. Se fusionaron las tablas de datos espaciales con las de atributos, lo que a continuación permitió la obtención de las áreas y el volumen de lodos parcial y total mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) empleado (Ortiz, 1999).

### Cartografía generada

Se ha generado una cartografía a escala 1:10 000, y otra a escala 1:50 000 como síntesis de resultados. A escala 1:50 000 se ha presentado la cartografía en un solo mapa con formato póster, en el que sobre un fondo de vías de comunicación y poblaciones se representa la superficie total afectada, y las diferentes unidades con su número de identificación coloreadas en función del rango de espesor medio (Fig. 5.1).

En recuadros independientes integrados en el póster se ha incluido, por un lado, un listado de los polígonos con sus áreas, espesor de lodos y volumen; y por otro, los resultados finales por tramos de superficie afectada y metros cúbicos de lodos. Estos tramos coinciden con la división efectuada por la mayoría de empresas y organismos que han participado en las tareas relacionadas con la retirada de lodos, siendo sus límites los siguientes:

- Tramo I: Balsa de estériles - Puente de Sanlúcar La Mayor
- Tramo II: Puente de Sanlúcar La Mayor - Puente de Aznalcázar
- Tramo III: Puente de Aznalcázar - Cabecera de Entremuros

A escala 1:10 000 se ha producido la cartografía por hojas 1:10 000 del Mapa Topográfico de Andalucía (MTA). En total la zona ocupada por lodos está incluida en doce hojas a esta escala.

En los mapas generados se superpone la zona

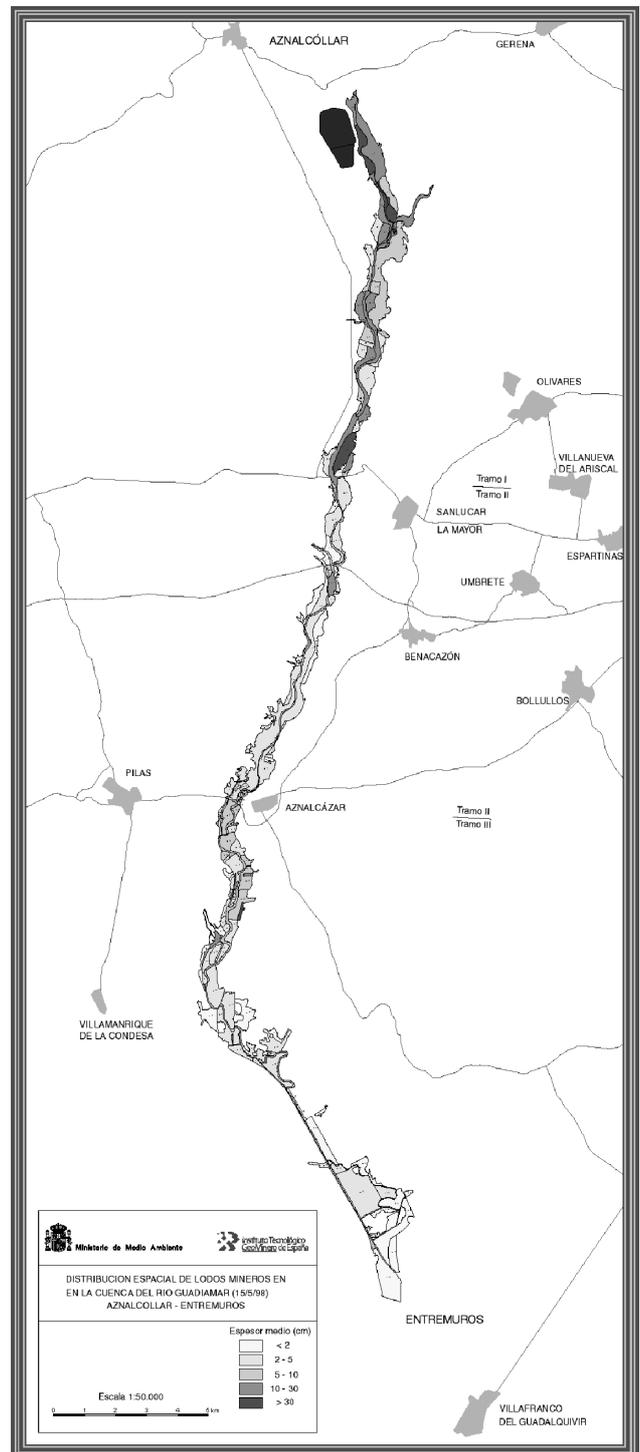


Figura 5.1 - Síntesis de la cartografía del lodo minero y sus espesores a escala 1:50 000 (reducción de original).

ocupada por lodos con sus polígonos correspondientes sobre la topografía del ICA (Instituto

Cartográfico de Andalucía). Cada polígono lleva asociado su número de identificación y el espesor medio correspondiente, además de estar coloreado en base al rango de espesor medio (Fig. 5.2). Esta cartografía ha sido, y es, de utilidad para la ejecución de los diversos trabajos relacionados con la zona ocupada por lodos: retirada, limpieza, recuperación, estudio, seguimiento de la zona, etc.

**Resultados: Superficie afectada y volumen de lodos**

La superficie total ocupada por los lodos vertidos a la cuenca de río Guadiamar provenientes de la rotura de la balsa de estériles de la mina de Aznalcóllar alcanza la cifra de 2616 ha.

En esta superficie se encuentra desigualmente

repartido un volumen de 1 981 850 m<sup>3</sup> de lodo, de los que 1 228 400 se han depositado en el tramo I (62 %), entre la balsa accidentada y el puente de Sanlúcar La Mayor, desde este puente al de Aznalcázar (tramo II) se depositaron 284 500 m<sup>3</sup> (14 %), y de aquí hasta la zona de Entremuros 468 950 m<sup>3</sup> (24 %) (Tabla 5.1). El tramo que presenta una mayor superficie ocupada es el situado más al sur con el 46 % del total. La relación volumen de lodo depositado por superficie va dismi-

	Superficie afectada (ha)	Superficie (%)	Volumen de lodo (m <sup>3</sup> )	Volumen (%)	Volumen/Superficie (m <sup>3</sup> /ha)
Tramo I	789	30	1 228 400	62	≈1560
Tramo II	640	24	284 500	14	≈450
Tramo III	1187	46	468 950	24	≈400
TOTAL	2616		1 981 850		≈760

Tabla 5.1 - Distribución de la superficie afectada y volumen de lodo depositado por tramos.

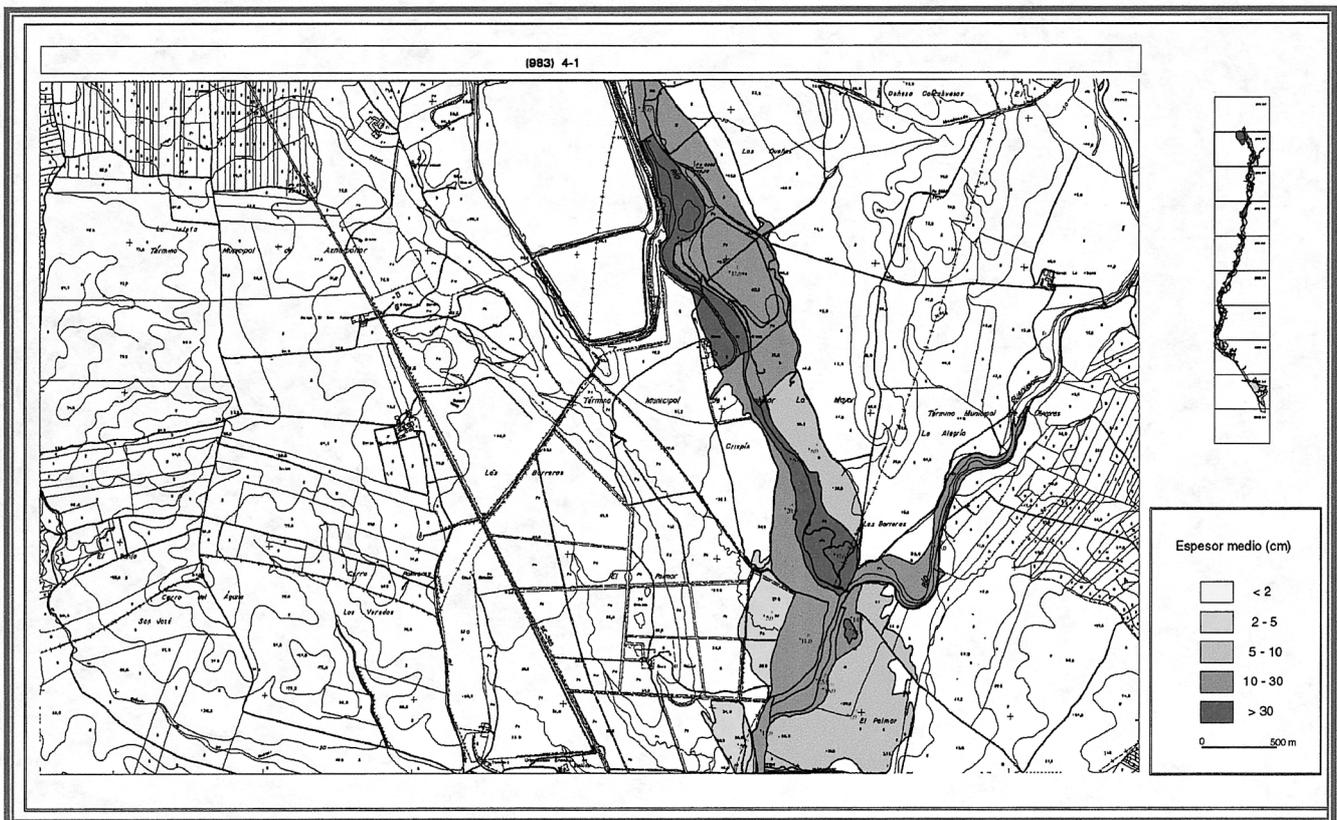


Figura 5.2 - Cartografía del lodo minero y sus espesores a escala 1:10 000 (reproducción reducida), sobre la base de una hoja del Mapa Topográfico de Andalucía.

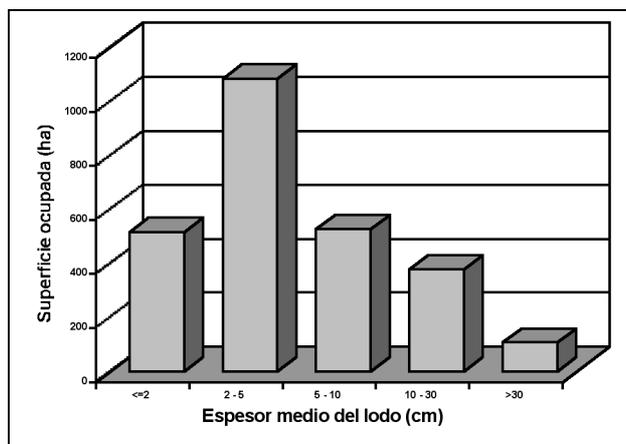


Figura 5.3 - Relación de la superficie ocupada por los lodos y rangos de espesor medio.

nuyendo de norte a sur, así se pasa desde 1560 m<sup>3</sup>/ha en el tramo I a 450 m<sup>3</sup>/ha en el tramo II, disminuyendo ligeramente esta relación en el tramo III (400 m<sup>3</sup>/ha).

En la Fig. 5.3 se ha representado la superficie ocupada por el lodo, expresada en hectáreas, en función de los rangos de espesor medio considerados. El mayor porcentaje de superficie ocupada (1086 ha) presenta una capa de lodos cuyo espesor medio se encuentra entre 2 y 5 cm. Prácticamente el mismo número de hectáreas (unas 500 ha) tienen espesores bien por debajo de 2 cm o comprendidos entre 5 y 10 cm. Aproximadamente otras 500 ha presentan espe-

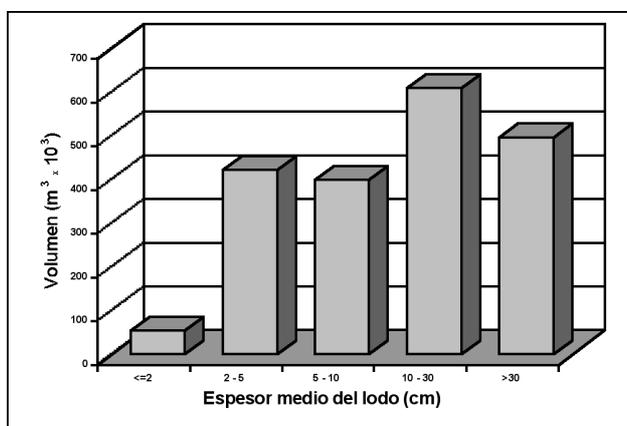


Figura 5.4 - Relación entre volumen de lodo y espesor medio.

sores superiores a 10 cm, de las cuales 107 ha superan los 30 cm.

La relación entre el espesor medio asignado a cada polígono o unidad y el volumen de lodos equivalente se ha representado en la Fig. 5.4. Como se deduce de la gráfica, cantidades comprendidas entre 400 000 y 600 000 metros cúbicos de lodos se encuentran repartidas entre los cuatro rangos superiores de espesor medio, y solamente unos 50 000 metros cúbicos de lodo se acumulan en zonas donde dicho espesor es menor de 2 cm.

### Caracterización química y mineralógica del lodo

La caracterización química y mineralógica del residuo minero se ha realizado con 27 muestras homogéneamente repartidas a lo largo de los lodos piriticos depositados tras el accidente de la balsa.

Los resultados de la difracción de rayos X (DRX) muestran que el residuo minero se compone fun-

Elemento	N	Media	Min.	Max	Cuartil Inf.	Cuartil Sup.	Desv. Est.
Ag	27	34	25	41	30	39	4,8
As	27	4692	3710	5290	4220	5070	451
Ba	27	27	17	61	23	27	8,4
Cd	27	33	21	50	28	36	7,8
Ce	27	28	13	50	22	31	9,1
Co	27	40	29	58	35	43	6,0
Cr	27	30	18	49	24	34	7,7
Hg	27	15	7	22	11	18	4,3
La	27	21	12	40	17	21	7,2
Sb	27	363	202	530	320	391	85,0
Tl	27	38	29	50	36	40	4,1
V	27	21	7	38	16	27	7,3
Cu	27	1323	880	1800	1080	1450	233
Pb	27	8091	4330	11710	6980	9250	1777
Zn	27	8832	6350	16060	6810	10050	2503
%Fe	27	36,92	30,36	42,56	34,5	39,38	3,35
%SiO <sub>2</sub>	27	12,94	7,16	19,38	9,73	15,81	3,64
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27	3,06	1,22	5,38	2,28	3,84	1,11
%CaO	27	0,58	0,15	1,68	0,3	0,81	0,37
%MgO	27	1,06	0,63	1,67	0,78	1,33	0,31

Valores por defecto expresados en ppm.

Tabla 5.2 - Estadísticos descriptivos de la composición química del lodo.

damentalmente de pirita, con un contenido medio del 75-80 %, además de galena y esfalerita, alcanzando entre los dos por término medio el 5 %. El restante 15-20 % es de naturaleza silicatada, estando compuesto por clinocloro como mineral principal, cuarzo, y arcilla de 15 Å tipo nontronita-montmorillonita, y algo de yeso (IGME, 1999). La composición mineralógica del lodo obtenida por DRX, empleando patrones de pirita, esfalerita y galena y en la que los filosilicatos se han determinado por diferencia, es compatible con el análisis químico total de los lodos realizado por fluorescencia de rayos X (FRX) y espectroscopía de emisión atómica (EEA-ICP).

Con el fin de detectar la forma en la que se encuentra el arsénico, dada su gran abundancia, se ha efectuado análisis por microsonda electrónica con un detector EDS acoplado (espectrómetro de energía dispersiva), de una pastilla compactada previamente metalizada, de una muestra con alto contenido en As (0,552 %). Se observó que los granos portadores de As son siempre muy pequeños (5 a 10 µm de diámetro máximo). Cada vez que en la búsqueda al azar por la superficie de la pastilla se evidenciaba la presencia de As, se efectuaba un análisis EDS, y en todos los casos los elementos acompañantes eran S y Fe principalmente, y algunas veces Zn o Pb. La intensidad de las líneas de As y Fe eran altas y del mismo orden de magnitud, lo que no es compatible con una pirita, donde el pico del Fe sería mucho más intenso que el del As.

Por otra parte se efectuó un análisis por DRX empleando una búsqueda programada con software específico, habiéndose encontrado como mineral de As más probable la arsenopirita.

La conjunción de los resultados de EDS y DRX, permiten asegurar que el mineral de arsénico más probable que existe en la muestra analizada es la arsenopirita, afirmación que sin duda es compatible con la paragénesis del yacimiento; ahora bien, los altos contenidos en arsénico del lodo se explicarían más bien por el elevado porcentaje que presenta la pirita para este elemento (Sierra, 1984; y Ayora, com. pers.), unido a que es el mineral más abundante.

Como se podía prever de su composición mineralógica, el lodo contiene una gran cantidad de

hierro (36,9 %), asociado básicamente a la abundante pirita (Tabla 5.2). Destaca también por sus contenidos en Zn, Pb y Cu, resultado de la incompleta recuperación de la esfalerita, galena y calcopirita durante el proceso mineralúrgico.

Composicionalmente se caracteriza de manera especial por su abundante contenido en arsénico, que alcanza un valor medio de 0,47 %. Otros elementos con concentraciones elevadas en el lodo, pero sin fase mineral propia, son el Cd, Hg y Tl, los cuales se encontrarán sustituyendo isomórficamente a otros elementos mayoritarios en los sulfuros. El Sb, con un valor medio de 363 ppm en el lodo, entra a formar parte de la composición de la bournonita ( $\text{PbCuSbS}_3$ ) presente en el yacimiento, además de estar contenido en la arsenopirita en proporciones variables (Sierra, 1984).

Las características composicionales del lodo son acordes con la paragénesis del yacimiento (Almodóvar *et al.*, 1998), y el proceso mineralúrgico empleado en su beneficio (Andaluz de Piritas, 1979), no habiéndose encontrado ningún elemento extraño que induzca a pensar en un uso de la balsa minera distinto de aquel para el que fue concebida.

#### *Variabilidad química del lodo a lo largo de la cuenca del Guadiamar*

Se ha realizado un análisis *cluster* sobre el conjunto de todas las muestras teniendo en cuenta todas las variables, y se han extraído dos clases. La primera clase agrupa todas las muestras tomadas en las once estaciones más cercanas a la balsa accidentada, representativas de los primeros 13 km de la colada de lodos; el resto de las muestras se agrupan en la segunda clase.

Químicamente la primera clase se singulariza por presentar mayores concentraciones en Zn, Cu, As, Fe y Sb que la segunda, estando esta última enriquecida en Pb, Ag, Si, Al, Ca y Mg. En base a las características químicas de cada clase, y a la situación de las muestras que componen las mismas, se puede afirmar que la sedimentación debió ser más rápida para las fases minerales que contienen los elementos Zn, Cu, As, Fe y Sb, empobreciéndose por tanto en estos minerales la

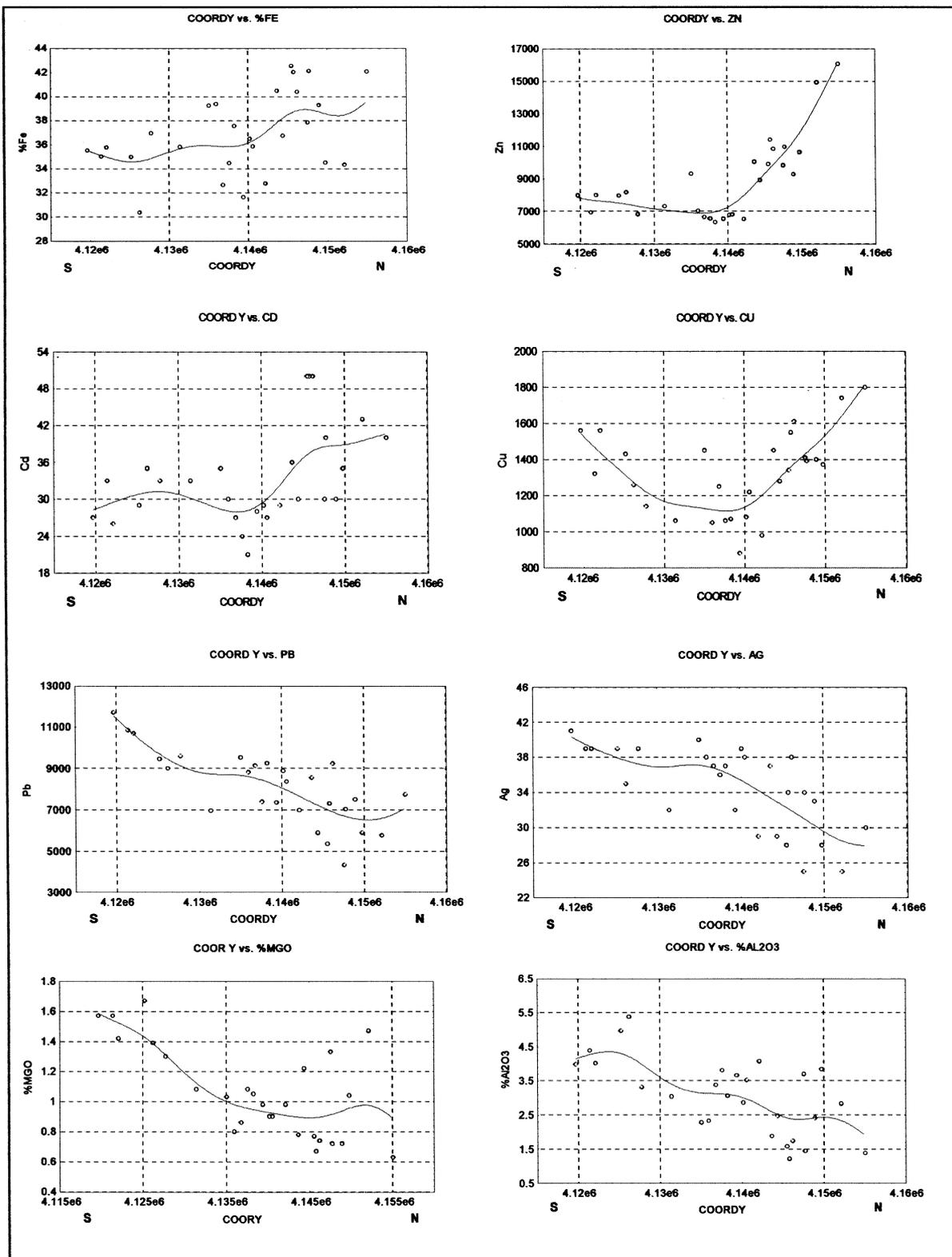


Figura 5.5 - Variabilidad espacial de la concentración de algunos elementos a lo largo de la colada de lodos.

carga sólida de la avenida según avanzaba está a lo largo de la cuenca. Por contra, ésta se enriquecía en Pb y Ag, y en los elementos que entran a formar parte en los minerales silicatados y carbonatados (Si, Al, Ca y Mg) del aluvial.

Así pues se puede afirmar que el lodo depositado en la cuenca del Guadiamar no es un material composicionalmente homogéneo, ya que la dinámica de la propia avenida provocó una sedimentación diferencial de las diferentes fases minerales que la componen. Esto puede estar relacionado con la progresiva disminución que presentaba el tamaño medio de las partículas del lodo según se avanza hacia el sur, hecho identificable en campo y constatado posteriormente mediante análisis granulométrico (Alastuey *et al.*, 1999; Gallart *et al.*, 1999), junto a posibles diferencias en la granulometría media de cada una de las fases minerales del lodo, diferencias que tendrían su origen en el distinto comportamiento de los minerales durante la etapa de molienda previa a su separación. El enriquecimiento progresivo de la carga sólida de la avenida en elementos relacionados con la fase silicatada y carbonatada puede deberse, además de a lo ya expuesto, a su menor densidad frente a los sulfuros y a la progresiva contaminación de la avenida por los sedimentos del aluvial englobados en la misma.

La variabilidad composicional del lodo, apuntada anteriormente mediante el análisis cluster, se pone de manifiesto también en la Fig. 5.5. Al tener la cuenca del Guadiamar una orientación básicamente norte-sur, en definitiva se está representando la variabilidad composicional del lodo a lo largo de toda la colada.

Del análisis de estas gráficas se deducen dos comportamientos diferentes para ciertos elementos; así por ejemplo, el Fe, Zn, Cd y hasta cierto punto el Cu ven como disminuyen sus concentraciones progresivamente hacia el sur, esto es según se hace menor la coordenada Y (Fig. 5.5). Por el contrario, el Pb, Ag, Al y Mg incrementan su concentración según que las muestras de lodo se tomen más alejadas de la balsa. Se confirma por tanto la heterogeneidad composicional de la colada de lodo en función de la distancia a la balsa.

## Conclusiones

El análisis de la cartografía de distribución espacial de los lodos muestra el desigual reparto del volumen de lodos piriticos ( $1,98 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), liberados en la rotura de la balsa, a lo largo de los más de 40 km de tramo fluvial en el que se depositaron, distribuyéndose una capa con espesores variables, desde centimétricos a superiores a 1 m, ocupando una superficie total de 2616 ha.

Se ha determinado también una variabilidad composicional del lodo piritico a lo largo de toda la superficie afectada, habiéndose puesto de manifiesto ciertas tendencias.

La cartografía de los lodos mineros vertidos en la cuenca del Guadiamar ha supuesto una herramienta básica para la toma de decisiones, diseño, planificación y control de las obras de retirada de lodo.

## 5.2. Retirada de los lodos en la zona afectada

J. Moreno y A. Silgado

### Introducción

Del conjunto de actuaciones llevadas a cabo en la zona del Guadiamar como consecuencia de la rotura de la balsa de residuos de la explotación minera de Aznalcóllar, la retirada de los lodos depositados en el cauce del río y tierras situadas a ambos lados de sus márgenes ha resultado una de las más complejas. Este calificativo obedece en principio a su novedad, al no existir antecedentes de situaciones similares, y además a un conjunto de factores como el tiempo disponible para su realización antes de las previsibles lluvias de otoño, características ambientales del medio afectado dada su proximidad al Parque Nacional de Doñana, importancia de la superficie en que era necesario actuar, orden de magnitud de los medios utilizados, medidas de seguridad en las diferentes operaciones, y sensibilidad de la población ante el material transportado dada la alarma social generada en la zona por el desconocimiento de los efectos de los lodos.

Por Acuerdo del Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía, la retirada de los lodos debía reali-

zarse con la máxima urgencia al objeto de minimizar el potencial riesgo que para la salud pública podría suponer su persistencia sobre el terreno.

#### *Características de la zona afectada*

La zona directamente afectada por los lodos tenía una longitud de 41 km que se iniciaba en la balsa siniestrada junto al río Agrio, continuando hasta su confluencia con el Guadiamar para, siguiendo el curso de éste, llegar hasta aproximadamente 1,5 km aguas abajo del llamado puente de Don Simón (Fig. 5.1). La superficie cubierta por los lodos fue de 2616 ha de las que 2099 correspondían a tierras agrícolas y el resto al cauce, arroyos y obras de infraestructura.

Las actuaciones de limpieza comprendieron también la denominada Zona de Entremuros, con una superficie inicialmente evaluada en 1500 ha correspondientes a 15 km de cauce con una anchura media de 1 km. A pesar de que a esta zona no llegaron los lodos, se vio afectada por las aguas ácidas que permanecieron embalsadas hasta finales de agosto.

#### *Técnica utilizada para la retirada de los lodos*

Tomando en consideración el posicionamiento de determinados colectivos, en el sentido de que los lodos, principalmente los de tierras agrícolas, se retiraran manualmente ya que de esa forma no sería necesario quitar nada de suelo, se analizaron como cuestión previa, una serie de factores, entre ellos: la gran magnitud del volumen de material a retirar y de la superficie de actuación; la limitación del tiempo disponible para realizar la operación, ya que debía finalizarse antes de las lluvias de otoño; la dificultad de disponer del número necesario de trabajadores declarados físicamente aptos después de ser sometidos a un reconocimiento médico especial; las condiciones climatológicas adversas: temperaturas extremas en el verano unidas al imprescindible equipo de protección (mono, gafas, guantes, botas y mascarilla), etc., llegándose a la conclusión de que el procedimiento más adecuado sería el de retirar los lodos con maquinaria y realizar manualmente

sólo las labores de afino y limpieza en zonas no accesibles mecánicamente.

Partiendo de esta base, en la técnica utilizada se distinguieron dos situaciones claramente diferenciadas:

**Lodos situados en el cauce.-** Como norma general se utilizó maquinaria de dimensiones y características adecuadas, en función de las condiciones edafológicas y topográficas de terreno y la vegetación a conservar. En relación al suelo se procuró no alterar los horizontes, no retirar tierra vegetal ni modificar los taludes, márgenes y cauce. Respecto a la vegetación, sólo se retiró la arbórea y arbustiva imprescindible, siguiendo un orden de prioridad preestablecido. Para conseguir la regeneración natural se optó preferentemente por talar en vez de desbrochar. Complementariamente se tuvo especial cuidado respecto a la nidificación de la avifauna, efectuándose también una estadística de los vertebrados silvestres que aparecían muertos.

Para la limpieza del cauce se procedió a desecarlo previamente construyendo desvíos provisionales, realizándose los trabajos preferentemente desde los tramos superiores hacia los inferiores. Respecto a las zonas de márgenes en que existían aguas acumuladas en pozas o balsas, se procedió a su desecado mediante bombeo si bien, cuando la calidad del agua no era adecuada, se sometía previamente a tratamiento. Para facilitar los trabajos en puntos del cauce de difícil acceso se construyeron plataformas transversales, utilizando para ello materiales de préstamo exentos de lodo. El material extraído del río se acopiaba en sus márgenes hasta alcanzar las condiciones de humedad adecuadas para su carga y transporte a la corta de Aznalcóllar.

**Lodos situados en suelos agrícolas.-** En relación al suelo, los lodos se encontraban de dos formas: sedimentados sobre el mismo, formando una capa superficial de espesor variable fácilmente identificable por su color negro, o bien mezclados con su estrato superior al haber penetrado a profundidades variables, dependientes de diversos factores, principalmente su textura y estructura.

En todo caso era necesario retirar totalmente los

lodos superficiales y el máximo posible de tierras impregnadas. Con carácter general se alcanzó un resultado satisfactorio rebanando, además del lodo, un espesor de suelo comprendido entre 5-8 cm.

La metodología seguida para la retirada de estos lodos fue distinta según los cultivos existentes. En tierras de barbecho o con cultivos herbáceos, dado su escaso porte, se retiraron junto con los lodos, acordonando el material con motoniveladoras. Las plantaciones de frutales fueron taladas, dado que su marco de plantación imposibilitaba la limpieza, acordonándose los lodos con retroexcavadoras. Una vez limpiadas las parcelas se procedió a la extracción de los tocones. En olivar y dehesa, existiendo posibilidad de su integración posterior en el Corredor Verde y su marco de plantación, aunque con dificultad permitía la limpieza, no fueron arrancados. Respecto a la zona de **Entremuros**, dedicada principalmente a pastos, una vez comprobado que existía contaminación en la parte aérea y radicular de la vegetación y estrato superficial del suelo, se procedió a la siega, arranque de raíces y retirada de una capa de 2-4 cm de espesor de suelo.

### Ejecución de los trabajos

**Distribución espacial.**- A efectos operativos la zona afectada se dividió en los tramos que se muestran en la Tabla 5.3. Dentro de estos tramos ejecutaron los trabajos diferentes empresas públicas y privadas.

Tramo	Límites	Longitud (km)	Ejecución limpieza	
			Cauce	Tierras agrícolas
Norte	Balsa - CN 431	12,5	Boliden	
Sur	CN 431 - Puente Don Simón	28,5	C.H.G. <sup>1</sup>	C.A.P. <sup>2</sup>
Entremuros	P.D. Simón - Fin zona afectada	15,0	C.A.P.	

<sup>1</sup>C.H.G. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

<sup>2</sup>C.A.P. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.

Tabla 5.3 - División en tramos de la zona afectada.

**Iniciación de los trabajos.**- La decisión de verter los lodos en la antigua corta, situada dentro del recinto de la mina de Aznalcóllar, fue aprobada

previamente al comienzo de los trabajos, después de analizar las distintas posibilidades, tras la información sobre la baja permeabilidad del terreno suministrada por el IGME.

La retirada de los lodos se inició el día 3 de mayo de 1998 en los tramos Norte y Sur del cauce por tratarse de terrenos de dominio público, dilatándose en las tierras agrícolas hasta el 9 de junio. Previamente fue necesario valorar los daños en cosechas y realizar una campaña de toma de muestras de los suelos afectados. Sin estos requisitos los propietarios no autorizaban la entrada en sus fincas ya que con estos trabajos se producía, realmente, una destrucción de pruebas respecto a posibles indemnizaciones por los daños ocasionados.

Los trabajos en la zona de Entremuros no pudieron iniciarse hasta el mes de octubre ya que, una vez limpiadas las aguas embalsadas y evacuadas, hubo necesidad de esperar a que los suelos se secaran por la imposibilidad de acceso de la maquinaria dado su carácter arcilloso.

**Jornada de trabajo.**- Para acelerar los trabajos, sobre todo en cuanto al transporte, se acordó inicialmente una jornada de 7,00 a 21,00 horas para la recepción de material en la mina.

**Transporte de material.**- Los vehículos utilizados en el transporte fueron de tres tipos: "carrileros" de 10 Tm, desde las parcelas inaccesibles hasta puntos de pequeños acopios, "bañeras" de 20 Tm, con caja estanca, para el transporte por carretera desde éstos, o parcelas accesibles, hasta el recinto minero y "dumpers" de 55-80 Tm dentro del recinto minero y en la zona Norte.

Inicialmente todos los camiones transportaban el material hasta el muelle de descarga de la corta. Posteriormente, con objeto de evitar saturaciones en tráfico y descarga, el itinerario seguido por el material fue diferente según los tramos: en el **Tramo Norte**, en que no era necesario utilizar carreteras, las bañeras lo transportaban hasta un acopio localizado en la confluencia de los ríos Agrio y Guadiamar, próximo al recinto minero, para allí, ser cargado y transportado en "dumper" hasta la corta, o bien, cargado en los tajos en "dumper" y transportado directamente a ella. En el **Tramo Sur**, las bañeras, utilizando caminos

rurales y carreteras, lo transportaban a una estación de transferencia construida a 150 m de la corta; desde allí era transportado y vertido en ella mediante grandes palas cargadoras.

Para realizar el transporte con una mayor fluidez se utilizaron tanto caminos rurales como carreteras, evitando siempre los núcleos de población. La seguridad y dificultades derivadas del gran número de camiones que intervinieron de forma simultánea en la operación obligaron a tomar una serie de medidas, tales como utilización de viales distintos para camiones y "dumper"; señalizaciones informativas y de prohibición en las carreteras; creación por la Guardia Civil de Tráfico de una Unidad de Vigilancia; construcción, como nuevas vías alternativas, de sendos caminos a ambos márgenes del río para facilitar el acceso a otros caminos y de éstos a las carreteras; acondicionamiento de caminos para adaptarlos en firme y anchura a las cargas e intensidad de tráfico que debían soportar; y colocación de vigilantes en los puntos de incorporación de los camiones a las carreteras. Para el mantenimiento de estos viales se asignó un equipo completo de maquinaria.

El verdadero factor limitante de la operación fue la disponibilidad de camiones. Durante la máxima actividad se utilizaron simultáneamente más de 500. Al no encontrarse en España en número suficiente se recurrió a complementarlos con contratos en Portugal. La distancia media recorrida por cada camión se estimó en 70 000 km.

**Retirada manual de lodos.**- Para la retirada de lodos en aquellos puntos del cauce en que por su valor ecológico, agresión al medio, etc., o de tierras agrícolas, no podía hacerse mecánicamente (pies de árboles, apoyos de líneas eléctricas, bases de tapias y paredes, instalaciones de bombeo, taludes de carreteras, etc.) se procedió a su limpieza manual, habiéndose empleado 1600 trabajadores.

**Finalización de los trabajos.**- Los trabajos de retirada de lodos fueron dados por finalizados el 23 de septiembre y 16 de diciembre de 1998 en **cauce y tierras agrícolas**, respectivamente, y el 15 de enero de 1999 en **Entremuros**. En la Fig. 5.6 se

refleja, por tramos, el desarrollo en el tiempo de la superficie limpiada y los volúmenes retirados en tierras agrícolas y cauce.

#### *Vigilancia y control de los trabajos*

**Partes de trabajo.**- Diariamente se cumplimentaban partes incluyendo las unidades de obra realizadas, número y tipo de maquinaria utilizada, trabajadores, etc.

**Control de camiones.**- Se asignó un número a cada uno de ellos que, junto con la matrícula, tramo de trabajo y empresa, servía de identificación. En un control situado a la entrada de la mina se introducían los datos en un computador manual que, además, almacenaba fecha y hora. El material transportado fue controlado mediante pesaje de camiones elegidos aleatoriamente.

**Control de Calidad.**- Un equipo representativo de todas las Entidades responsables de la limpieza inspeccionaba las diferentes zonas para comprobar la calidad de la limpieza realizada. Su decisión se consideraba vinculante.

**Calidad ambiental.**- Durante los trabajos de limpieza, para evitar la emisión al aire de partículas sólidas potencialmente contaminantes, se tomaron medidas como colocación de toldos en los camiones, rociado del material con cañones de agua durante la fase de descarga al fondo de la corta, continuo riego de los caminos utilizados por los camiones, etc. Se tomaban muestras en seis puntos, cinco fijos y uno móvil. Se comprobó que los valores estaban dentro de la normativa vigente medioambiental.

**Seguridad y salud laboral.**- El Plan se estableció coordinadamente por todas las empresas, definiéndose los equipos de protección a utilizar, evacuación y asistencia sanitaria en caso de accidente, etc. Tanto al inicio como a la finalización de los trabajos, los trabajadores fueron sometidos a un examen médico especial, sin que fuera detectada anomalía alguna. La Administración competente, además de celebrar reuniones informativas con empresas y trabajadores, realizaba 2-3 visitas semanales a los tajos en las que, además de controlar el cumplimiento de las normas, tomaba muestras ambientales. Para la circula-

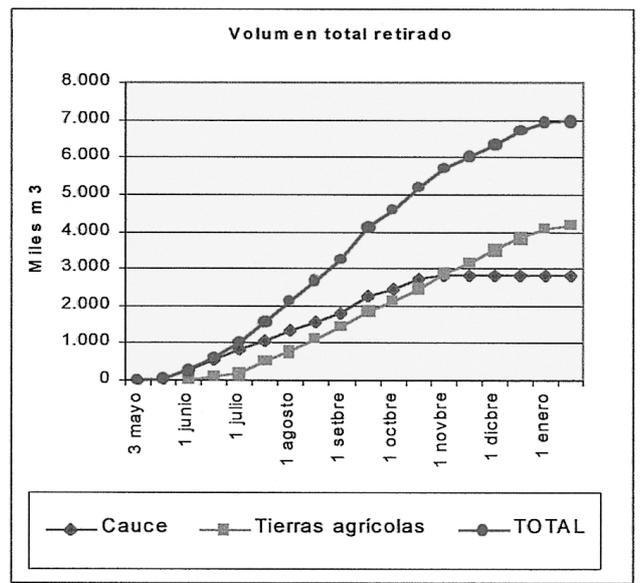
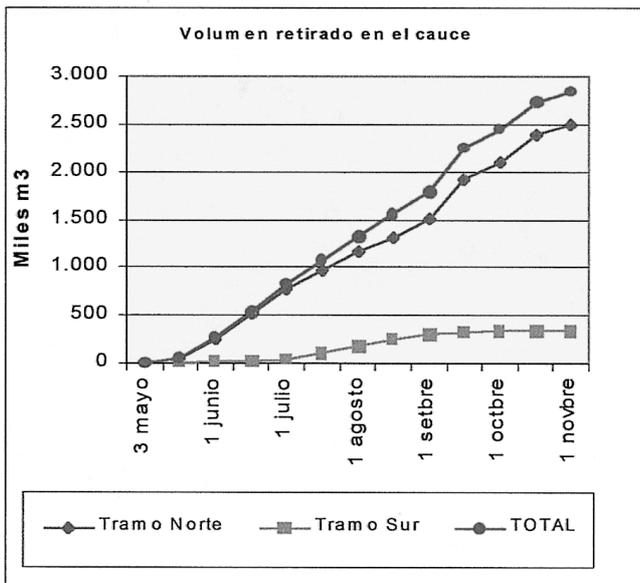
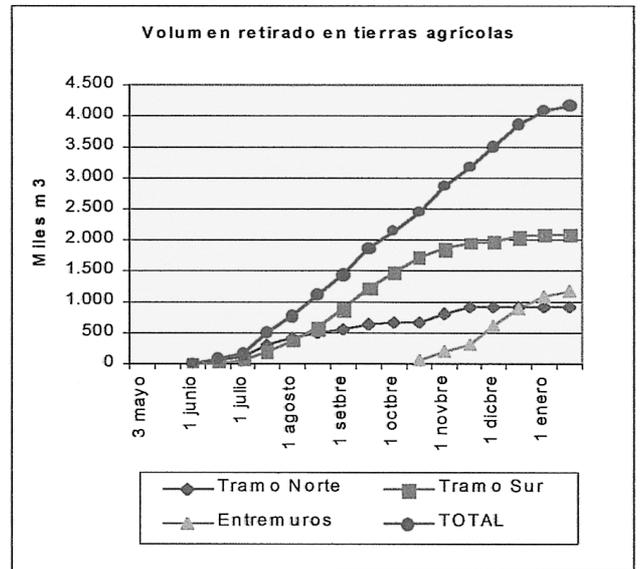
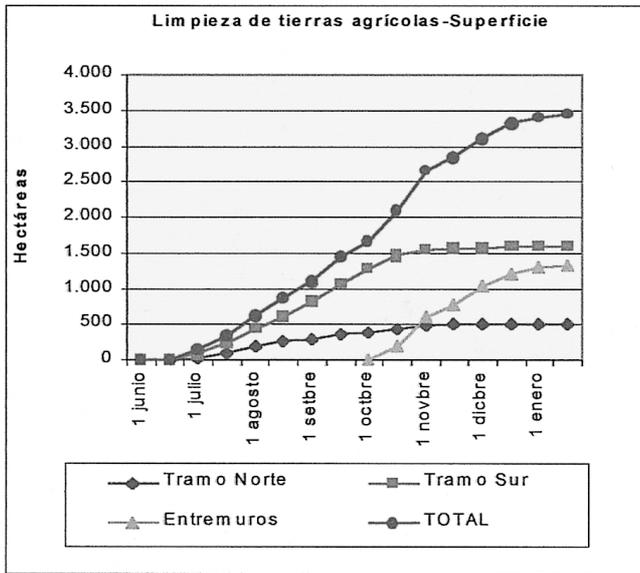


Figura 5.6 - Desarrollo en el tiempo de la obra de retirada de lodos en los diferentes tramos.

ción por caminos y recinto minero a los conductores de camiones se les entregaron normas especiales de obligado cumplimiento.

**Unidades realizadas.-** En la tabla 5.4 se refleja el resumen, por tramos, de los indicadores de producción.

#### Cuestiones destacables

Del conjunto de problemas y dificultades a superar durante la retirada de lodos, además de los expuestos, merecen destacarse: la vulnerabilidad de la operación ya que cualquier incidencia repercutía en el rendimiento de los trabajos (ave-

Localización	Cauce			Tierras agrícolas				Total
	Unidades	T. Norte	T. Sur	Total	T. Norte	T. Sur	Entremuros	
Superficie (ha)	297	300	597	512	1594	1328	3434	4031
Volumen (mill. m <sup>3</sup> )	2,50	0,34	2,84	0,91	2,07	1,18	4,16	7,00

Tabla 5.4 - Indicadores de producción de la obra de retirada de lodos.

rías en las palas de vertido en la corta, lluvias, saturación de las rutas al tener que simultanearse con los trabajos de reparación de la balsa, etc.); medidas correctoras del incremento de los factores de riesgo generados por la elevada intensidad de tráfico en las carreteras locales; y vigilancia de la calidad ambiental, especialmente la contaminación atmosférica.

#### Coordinación

Uno de los factores básicos en la ejecución de la operación ha sido el funcionamiento de los mecanismos de coordinación creados conjuntamente por las Administraciones Estatal y Autonómica.

La Comisión de Coordinación Gobierno Central – Junta de Andalucía realizó el seguimiento y coordinación de las actuaciones de los distintos Grupos de Trabajo y entre sus múltiples funciones merece destacarse, por cuanto respecta a la retirada de los lodos, la agilización en la realización de informes multisectoriales y la obtención de permisos y autorizaciones cumpliendo la normativa vigente en cuanto a plazos e informes.

Dentro de esta Comisión se constituyó el denominado **Grupo de Retirada de Lodos**, integrado por técnicos de Organismos, Instituciones y Empresas responsables de la retirada de lodos. Uno de estos técnicos, que actuaba como Coordinador del Grupo, era miembro de la citada Comisión. El Grupo de Retirada de Lodos se reunía al menos una vez por semana para analizar la ejecución de los trabajos y estudiar y proponer soluciones a las diferentes situaciones que iban planteándose, elaborando además un parte diario y un informe semanal para la **Comisión de Coordinación**.

#### Conclusión

La planificación y ejecución de las tareas de retirada de tan gran superficie de lodos en tan breve plazo de tiempo ha representado una innovación en la historia de accidentes mineros. Dada la poca experiencia acumulada en este tema, pensamos que pueden extraerse numerosas experiencias válidas a nivel internacional.

#### 5.3. Cartografía del lodo piritico remanente en la cuenca del río Guadiamar mediante imágenes Daedalus-1268 ATM

*C. Antón-Pacheco, M. Giménez, J. A. Gómez, J.C. Gumiel, E. López-Pamo, E. de Miguel, G. Ortiz y J.G. Rejas.*

#### Introducción

El uso de sensores multispectrales aeroportados para el estudio del impacto de actividades mineras es adecuado cuando la escala del impacto requiere resoluciones espaciales menores de 10 m. Los sensores con resoluciones espectrales moderadas, como es el caso del instrumento utilizado en este estudio, permiten realizar una discriminación cualitativa de la respuesta de los suelos y rocas observados aunque no una identificación mineralógica directa. Diversos radiómetros aeroportados han sido utilizados en estudios de esta índole (Mueller *et al.*, 1997).

Tras el accidente de la mina de Aznalcóllar, y a instancias de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas del Ministerio de Medio Ambiente, se creó un grupo de trabajo de teledetección constituido por el IGME y el INTA. El objetivo principal de este grupo fue planificar campañas sucesivas de vuelos multispectrales Daedalus-1268 ATM

Características	Resolución	Cobertura
Espaciales	7 m x 7 m a 3000 m altura vuelo	5,1 km ancho y longitud variable
Espectrales	ver Tabla 5.6	0,4 - 13 $\mu\text{m}$
Radiométricas	variable para bandas reflectivas 0,2 °C para banda térmica	variable para bandas reflectivas 10-50 °C para banda térmica
Temporales	12,5 líneas imagen/segundo $\cong$ 7-8 minutos/escena	

Tabla 5.5 - Características de los datos Daedalus-1268.

sobre las áreas afectadas por el vertido. El objeto de estos vuelos ha sido tanto el control y seguimiento de los trabajos de limpieza de los lodos vertidos en el cauce del río Guadiamar, como la detección de la contaminación remanente una vez finalizadas estas tareas. En este contexto, se han realizado tres campañas de vuelos. La primera el 7 de julio de 1998, al inicio de las labores de limpieza de los lodos; la segunda el 25 de noviembre de 1998, prácticamente finalizados estos trabajos, y una tercera el 9 de junio de 1999, con el fin de evaluar el lodo remanente y la formación de nuevas costras de sales. Una campaña adicional ha sido realizada el 14 de Junio del 2000, cuyos resultados no se incluyen por estar en elaboración en el momento de la redacción de este capítulo.

#### Características del sensor Daedalus-1268 ATM

Para la obtención de imágenes se ha utilizado un instrumento Daedalus-1268 ATM (Tablas 5.5 y

Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Equivalencia bandas Landsat TM
B1	0,433-0,453	
B2	0,480-0,500	TM1
B3	0,508-0,532	TM2
B4	0,543-0,577	
B5	0,580-0,630	TM3
B6	0,638-0,702	
B7	0,715-0,815	TM4
B8	0,830-0,940	
B9	1,550-1,750	TM5
B10	2,080-2,350	TM7
B12	8,500-13,00	temperatura

Tabla 5.6 - Configuración espectral Daedalus-1268.

5.6) instalado en un avión C-212 del INTA. En cada una de las campañas se han efectuado varias líneas de vuelo que cubren la totalidad del área afectada, y a varias alturas, con el fin de obtener información detallada de ciertas áreas, con resoluciones de hasta 1,7 metros a una altura de 680 metros.

Simultáneamente se ha registrado fotografía aérea convencional como apoyo a los trabajos de campo y a la corrección geométrica de las imágenes. En las mismas fechas de los vuelos se han adquirido datos de espectroradiometría de campo con un instrumento GER-1500 como soporte a la caracterización radiométrica de las superficies observadas

#### Correcciones Geométricas y radiométricas de las imágenes

Las imágenes correspondientes al valle del Guadiamar, registradas en las fechas citadas, se han corregido geoméricamente utilizándose para ello una transformación polinómica de tercer grado basada en puntos de control. Estos puntos se han obtenido tanto de cartografía convencional como de fotografía aérea ortorectificada (corrección de la actitud de la cámara y el efecto del relieve), para lo que se utilizó un modelo digital del terreno generado a partir de la altimetría 1:25 000 del IGN. Para obtener mayor precisión en la corrección se ha dividido la imagen correspondiente al valle del Guadiamar en 10 subescenas. Las transformaciones se derivaron independientemente para cada una de las subescenas (error cuadrático medio < 2 pixels tanto en x como en y), realizándose posteriormente mosaicos para obtener las imágenes finales.

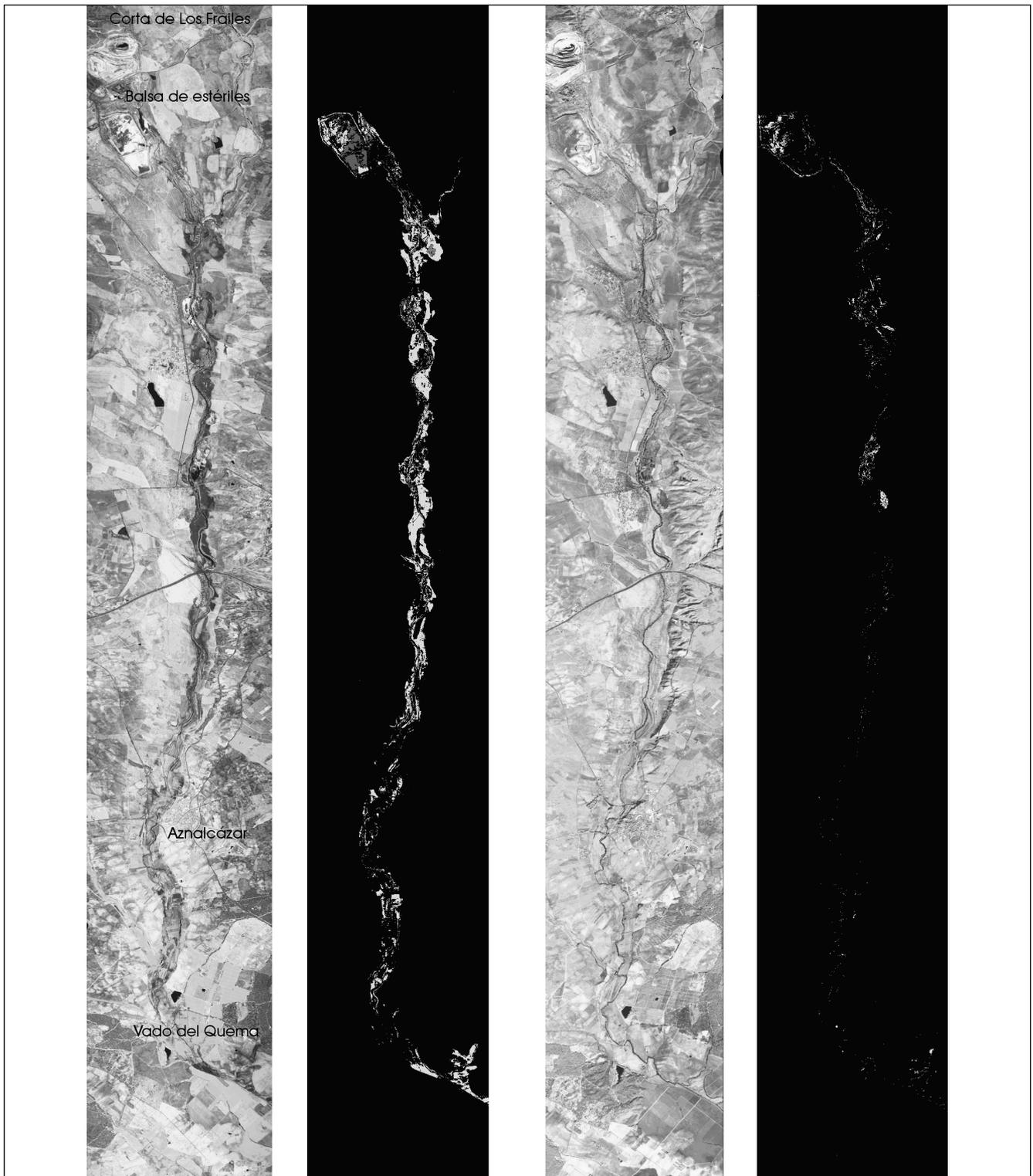


Figura 5.7 - A. Imagen ATM 971 de la cuenca del Río Guadiamar, 07/07/98.  
B. Lodos y sales clasificados a partir de la imagen A.  
C. Imagen ATM 971, 25/11/98.  
D. Lodos y sales remanentes clasificados a partir de la imagen C.

Con el fin de optimizar la comparación de las imágenes adquiridas en fechas sucesivas es conveniente transformar los niveles digitales originales a reflectividad. Para esta conversión, y en base a la hipótesis del comportamiento lambertiano de las superficies observadas, se puede optar por dos procedimientos: aplicación de un modelo analítico de transferencia radiativa, o mediante un modelo empírico, a partir de datos de reflectividad medidos en el terreno con correspondencia en la imagen. En este caso se han utilizado los datos registrados con el instrumento GER-1500 en 15 puntos distribuidos en el valle del Guadiamar, cubriendo un amplio rango de cubiertas. Estos datos se han utilizado para derivar las reflectividades para  $\lambda < 1$  mm. Para los canales 9 y 10 (1,55–1,75  $\mu\text{m}$ , y 2,08–2,35  $\mu\text{m}$ ), que se encuentran fuera del rango del GER 1500, se ha utilizado el código 6S (Vermote *et al.*, 1995).

#### *Análisis químicos, mineralógicos y de reflectividad*

Durante el trabajo de campo realizado simultáneamente a la ejecución de los vuelos, se tomaron muestras de lodos, de sus alteraciones y de suelos de referencia. El análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) muestra que el lodo se compone de pirita (75–80%), esfalerita y galena (5%), y un componente silicatado compuesto por clinocloro, cuarzo, y algo de yeso. El análisis químico da concentraciones elevadas de Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, As, Cd, Sb, Tl y Hg (ver apartado 5.1). La presencia mayoritaria de pirita en el lodo explica la baja reflectividad de este material en todo el rango espectral considerado. Las sales originadas por la progresiva alteración de los lodos piríticos son sulfatos complejos hidratados, formados principalmente por rozenita, boyleita, szomolnokita, halotrichita, hexahidrita y starkeyita (ver apartado 7.1). Estas fases sulfatadas presentan un elevado contenido en Zn (hasta un 10%), Cu, As, Sb y Cd. La disolución de las sales representa una de las principales vías de contaminación de los suelos, al movilizarse los metales pesados en épocas de lluvia (Nordstrom *et al.*, 1999). Sobre las mismas muestras se han realizado medidas de reflectividad en laboratorio en el rango entre 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ . Estos datos han confirmado la baja reflectividad y la ausencia de rasgos de absorción significativos en el lodo pirítico.

Los sulfatos hidratados muestran una reflectividad general alta, con picos de absorción característicos a 1,4  $\mu\text{m}$  y 1,9  $\mu\text{m}$ , que indican la presencia de agua molecular en estos compuestos, mientras que los suelos de referencia muestran una reflectividad media, con mínimos menos acusados que las sales a 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,9  $\mu\text{m}$  y 2,2  $\mu\text{m}$ .

#### *Cartografía de lodos piríticos y eflorescencias*

Las imágenes registradas en el vuelo realizado en julio de 1998 se utilizaron inicialmente para realizar una primera interpretación. La combinación de bandas ATM971 (RVA), que incorpora un canal del visible y dos del infrarrojo próximo, resultó ser la más adecuada para la discriminación de las áreas cubiertas por el lodo, que da una respuesta muy baja en todas las bandas, y las costras de sales, que exhiben valores altos en todo el rango espectral considerado (Fig. 5.7 A). Con objeto de clasificar digitalmente los datos multispectrales, se seleccionaron varias áreas correspondientes a superficies bien expuestas de lodos y eflorescencias a lo largo del valle del Guadiamar. Una vez establecidas las firmas espectrales para estas dos categorías, se procedió a clasificar la imagen mediante un algoritmo de máxima probabilidad. Los resultados permitieron determinar la situación de lodos y sales en esta fecha (Fig. 5.7 B) (Antón-Pacheco *et al.*, 1999; Lopez-Pamo *et al.*, 1999).

Del mismo modo se procedió con las imágenes registradas en noviembre de 1998 (Fig. 5.7 C), cuando los trabajos de limpieza estaban en su fase final. En la imagen clasificada (Fig. 5.7 D), las sales se restringen a pequeñas áreas en el interior de la balsa, y el lodo aparece en áreas todavía sin limpiar en esta fecha, aunque también puede identificarse en áreas en las que, a pesar de haberse efectuado los trabajos de limpieza, se observan superficies con firmas típicas del lodo, atribuibles por tanto a lodo residual.

Una de estas áreas aparecía dando una estructura de bandas claras y bandas oscuras muy netas en la imagen (Fig. 5.8 A). En el terreno, se confirmó que estas bandas están relacionadas con la sistemática seguida en la retirada del lodo. Para la caracterización de la naturaleza de estas bandas, se tomaron muestras de suelos a lo largo

de dos perfiles transversales a las mismas. En cada perfil se tomaron siete muestras de suelo correspondientes a cuatro bandas limpias y tres sucias, tal y como aparece en la figura 5.8 A.

Los resultados de los análisis químicos y mineralógicos muestran que los suelos de las bandas sucias presentan un alto contenido en Fe, Cu, Pb, Zn, As, Cd y Sb, apareciendo la pirita siempre como mineral mayoritario en la difracción de rayos X. En la figura 5.8 B puede observarse la marcada diferencia composicional del arsénico en las bandas limpias y sucias. Las bandas oscuras representaban, por tanto, bandas sucias con restos de lodo remanente en superficie. Por el contrario, en los suelos correspondientes a las bandas claras, el contenido en estos elementos es mucho menor, y la pirita o no aparece o lo hace como componente muy minoritario.

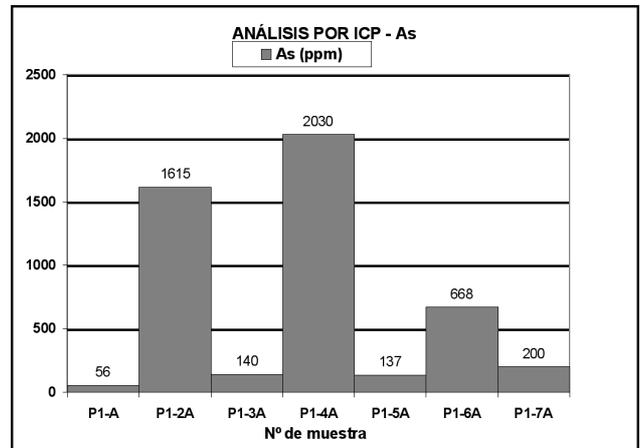


Figura 5.8 B. Concentraciones de arsénico en bandas claras y oscuras

Tomando como referencia las áreas sucias y limpias establecidas en este área, se procedió a realizar la clasificación digital de la imagen, obteniéndose como resultado un mapa del lodo remanente, tal como aparece en la Figura 5.8 C.

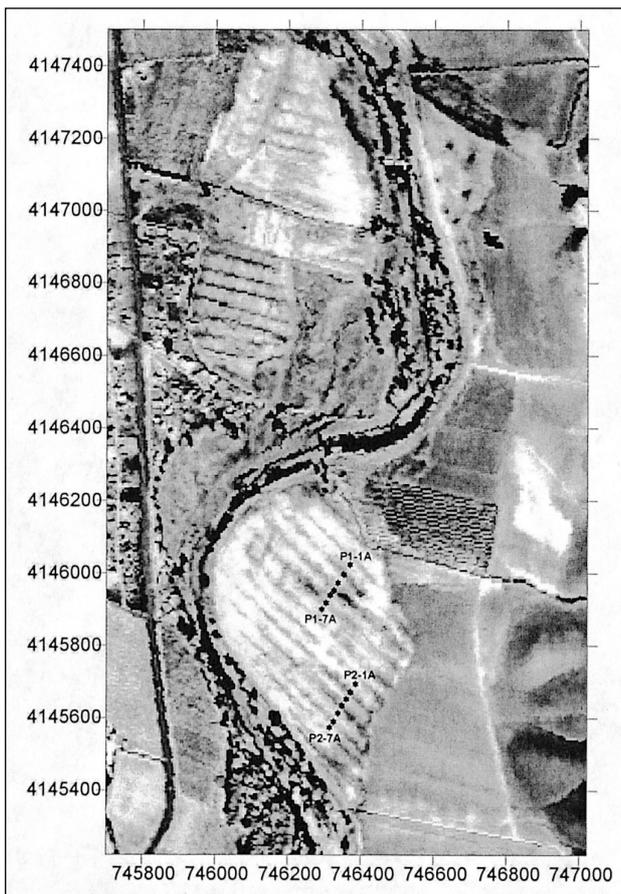


Figura 5.8 A. Subescena imagen ATM nov. 98 con situación de muestras en bandas claras y oscuras.

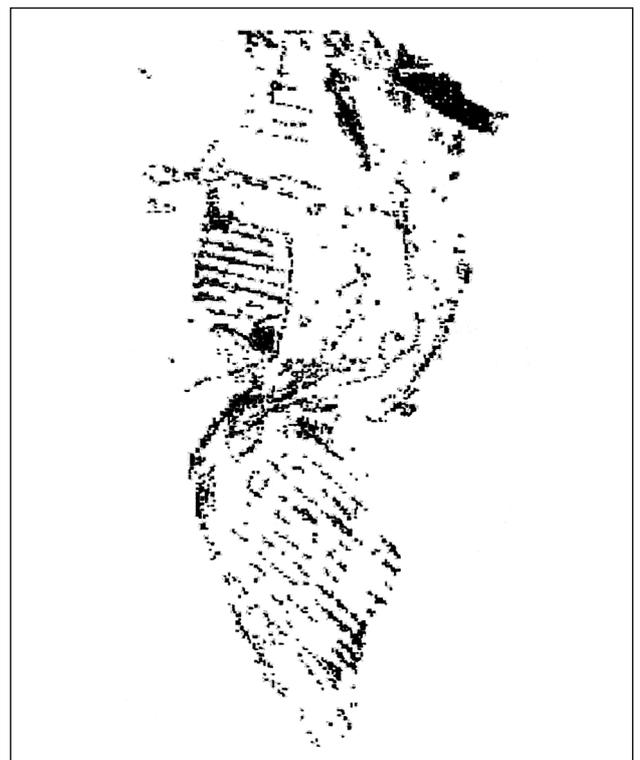


Figura 5.8 C. Clasificación digital de la imagen. En negro: suelos con lodo remanente en superficie.

El resto de los suelos de la zona afectada por el vertido, no incluidos en esta categoría, se consideraron suelos "limpios", es decir suelos que no presentan lodo significativo en superficie. Al decir limpios no quiere decirse que estos suelos no puedan presentar algún grado de afección por el lodo en profundidad, puesto que las técnicas de teledetección utilizadas en este estudio registran exclusivamente información referente a las superficies de las áreas observadas.

#### *Cartografía del lodo remanente*

A partir de la clasificación digital de las zonas sucias, con lodo en superficie, realizada sobre los datos registrados en noviembre de 1999, de los resultados de la campaña geoquímica realizada durante la primavera de 1999, de la evaluación de las imágenes registradas en junio de 1999 y del trabajo de campo, se generó una cartografía del lodo remanente en julio de 1999. Esta cartografía digital se ha compuesto sobre la base topográfica, a escala 1:10 000, del Instituto Cartográfico de Andalucía (ICA), realizándose un total de siete hojas que cubren los sectores afectados de los valles del Agrio y del Guadiamar, desde la balsa de la mina al Vado del Quema (ITGE, 1999). La Fig. 5.9 muestra una de estas hojas correspondiente al sector de los Ranchos del Guadiamar.

En la leyenda de los mapas se han considerado las siguientes unidades:

- **Suelos con abundante lodo en superficie.** Se han incluido aquellas áreas en las que a pesar de haberse realizado las labores de limpieza, persisten fragmentos del sedimento del lodo original. Generalmente se trata de zonas roturadas en las que los terrones de la costra de lodo no han sido retirados y han quedado mezclados con el suelo. En otros casos, se trata de amplios corredores utilizados para la circulación de los camiones que transportaban el lodo a la corta de Aznalcóllar por la margen izquierda del Guadiamar. Estas bandas presentan una mayor cantidad de lodo remanente, tal como se ha podido corroborar con la analítica. También pueden corresponder a estructuras relacionadas con el proceso de acordonamiento del lodo, previo a la carga a los camiones, como es el

caso que se observa en la imagen de la Fig. 5.8 A. En estas áreas con lodo es frecuente la aparición de pequeñas costras de sales en zonas deprimidas. Por último, se incluyen aquellas áreas donde la maquinaria de limpieza no ha podido actuar por mala accesibilidad o exceso de humedad.

- **Suelos con restos de lodo.** Representan áreas en las que el lodo aparece pulverizado y mezclado con el suelo, con algunos fragmentos de lodo dispersos.
- **Graveras.** Se han incluido las graveras de Los Ranchos del Guadiamar, en la margen derecha, y las situadas al norte del puente de Las Doblas, en la margen izquierda. Los análisis realizados muestran valores altos de lodo en la matriz de las gravas, aunque superficialmente la aparición de lodo compacto se restringe a algunas zonas localizadas. En estas áreas es frecuente la formación de costras de sales posteriormente a las labores de limpieza, lo que parece implicar la existencia de lodo remanente a cierta profundidad.
- **Gravas del cauce.** Se han considerado las gravas y arenas del canal principal del Guadiamar, donde es habitual encontrar lodo resedimentado.
- **Parcelas de experimentación.** Se trata de varias parcelas de pequeñas dimensiones, en las que se ha preservado la capa de lodo original con el fin de realizar estudios a medio y largo plazo por distintos organismos de investigación.

La superficie total de áreas con lodo remanente supone un 8% de la zona afectada por el vertido, tal y como se detalla en la Tabla 5.7.

Áreas con lodo remanente	Superficie
Suelos con lodo abundante en superficie	25 ha
Suelos con restos de lodo	64 ha
Graveras	62 ha
Gravas de cauce	63 ha
Parcelas de experimentación	0,75 ha
Total	214,75 ha

Tabla 5.7 - Distribución de lodo remanente en junio 1999.

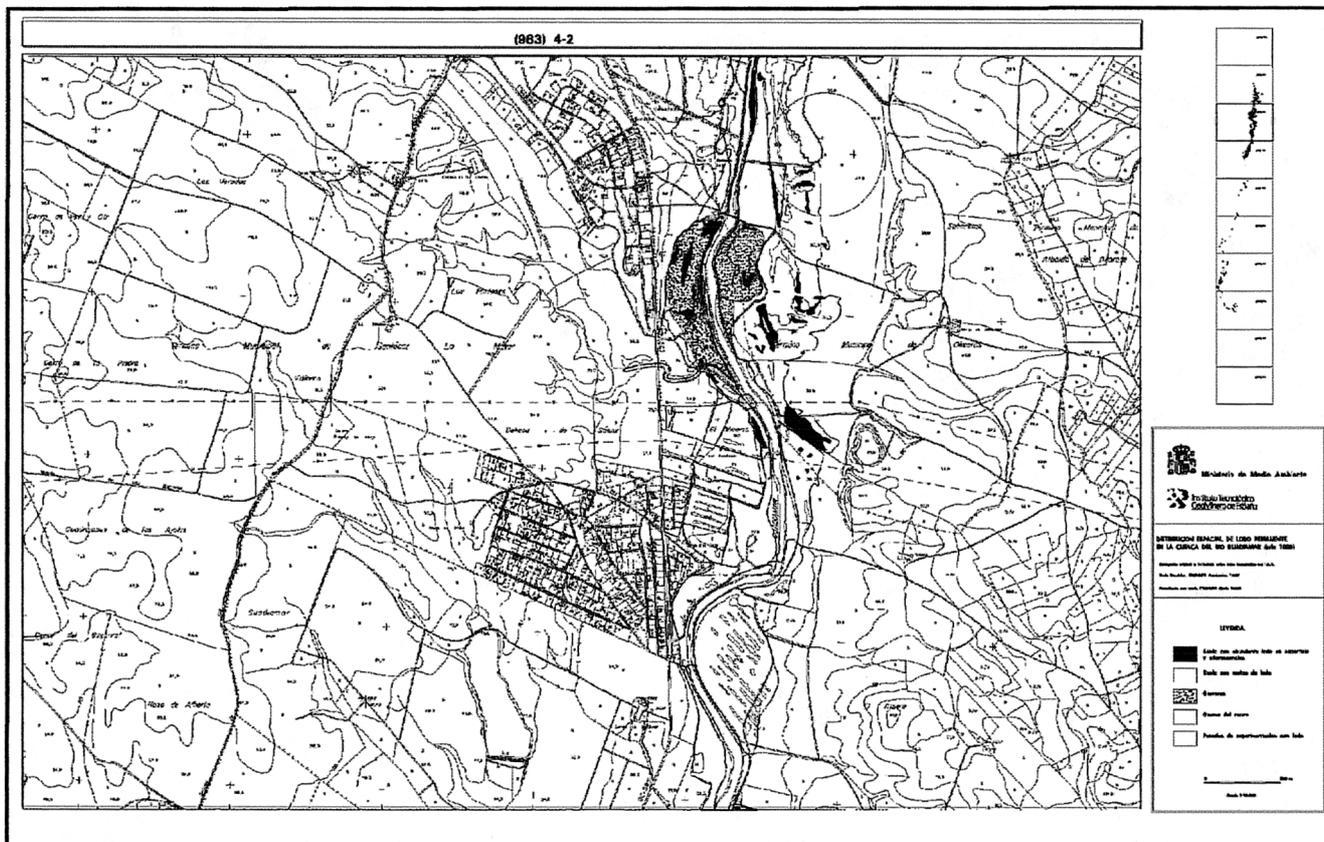


Figura 5.9 - Mapa de distribución espacial del lodo remanente en la cuenca del río Guadiamar. Hoja 983 (4-2).

### Nuevos datos hiperespectrales HyMap

Durante la última década se han desarrollado sensores aeroportados de alta resolución espectral (imaging spectrometers) que permiten identificar minerales específicos a partir de las características espectrales que presentan en las regiones visible e infrarrojo próximo del espectro electromagnético. Estas nuevas técnicas se basan en la detección de los rasgos de absorción diagnósticos que presentan los minerales con Fe en su composición en la región entre 0,4 y 1,2  $\mu\text{m}$ , y en los de los minerales con grupos hidroxilos entre 1,5 y 2,5  $\mu\text{m}$ . La identificación de óxidos, hidróxidos y sulfatos de Fe es particularmente importante en áreas mineras, porque a ellos se asocian los metales pesados (King, 1995). La identificación de los sulfatos complejos hidratados que se forman por meteorización de los lodos, y que contienen así mismo un elevado contenido metá-

lico, es también crítica por su alto potencial contaminante.

En el contexto de una campaña europea de vuelos HyMap realizada en el verano de 1999, se tuvo la posibilidad de incluir una línea en el valle del Guadiamar, y otra en las minas de Río Tinto. El HyMap es un sensor de alta resolución espectral que registra la radiación solar reflejada en 126 bandas espectrales contiguas, entre 0,4-2,5  $\mu\text{m}$ , con 18 nm de resolución espectral. La calibración, procesado e interpretación preliminar de los datos se está realizando en el marco de un proyecto de investigación conjunto IGME-USGS (Antón-Pacheco *et al.*, 2000). El análisis preliminar de estas imágenes ha permitido identificar la presencia de yeso, jarosita y sulfatos complejos hidratados en varias áreas del valle del Guadiamar, en relación con la alteración de los depósitos de lodo piritico remanente. En el área

de las minas de Río Tinto ha sido posible identificar minerales como pirita, jarosita, yeso, copiapita, coquimbita y óxidos de Fe en las escombrecas, y de yeso, copiapita, melanterita, rozenita y jarosita en los sedimentos aluviales del río Tinto.

### *Conclusiones*

Las imágenes multispectrales registradas por el sensor Daedalus-1268 han demostrado ser una herramienta muy eficaz para cartografiar el lodo pirítico a lo largo del valle del río Guadiamar, así como para la detección de la contaminación remanente y de las costras de sulfatos solubles cuyo control es crítico por su potencial contaminante. La realización de vuelos en junio y noviembre de 1998, y en junio de 1999, ha permitido evaluar la progresión de los trabajos de limpieza y cartografiar con gran detalle las áreas con lodo. Debido a la persistencia de cierta contaminación en el área afectada por el vertido, especialmente en el tramo superior del Guadiamar, se ha estimado conveniente el registro de nuevos datos a principios del verano del año 2000 que están siendo interpretados con objeto de actualizar la cartografía del lodo remanente en esas fechas.

La información hiperespectral registrada por el sensor HyMap parece confirmar la capacidad que ofrecen estas nuevas técnicas para identificar minerales secundarios con alto contenido en metales, resultantes de las actividades mineras, y cartografiar la distribución de escombrecas, depósitos de colmatación de balsas mineras, y aluviales contaminados por las aguas ácidas de mina.

### *Agradecimientos*

Las campañas de vuelos Daedalus ATM se han realizado en el marco de un convenio de cofinanciación IGME-INTA con fondos de ambos organismos. El estudio de los datos HyMap ha sido financiado por el Programa de Cooperación Científica y Tecnológica entre España y los EEUU. Agradecemos a L. Rowan y J. Crowley y J.C. Mars del U.S. Geological Survey (Reston, VA, USA), la realización de los análisis de espectrometría VNIR de las muestras de suelos, lodos y

eflorescencias. Así mismo, agradecemos a Juan Antonio Martín Rubí del IGME la rapidez en la ejecución de los análisis químicos y mineralógicos.

## **5.4. Restauración edáfica y morfológica de la llanura aluvial y ribera**

*G. Carrero y E.M. Vázquez*

### *Introducción*

La restauración y conservación de los recursos naturales del suelo y del agua comprenden un conjunto de principios y técnicas que por separado difícilmente llegan a obtener todo el efecto deseado.

La importancia de la vegetación en la conservación de los recursos que la hacen posible y la condicionan, el suelo y el agua, introduce una compleja casuística de interrelaciones y mutuas dependencias. Los suelos alterados y carentes de cobertura vegetal, como ocurre en la cuenca del Guadiamar afectada por el vertido, presentan graves problemas de erosión potencial, produciéndose un notable incremento de la carga de sedimentos hacia el cauce en los procesos de erosión laminar durante un episodio de lluvia. De ahí que cabe preguntarse si es esta vegetación la que motiva los recursos de suelo y agua, de la máxima calidad, y no a la inversa.

El estudio de la funcionalidad de la llanura aluvial y ribera conlleva un análisis detallado de los cambios y modificaciones del cauce, procesos de colmatación aluvial y conformaciones de sectores de inundación. Pero siempre bajo la filosofía de dejar actuar al río, que sea el río el que marque su propia dinámica y sólo cuando éste se haya definido, establecer las medidas oportunas para su consolidación y protección, manteniendo en todo momento su carácter mediterráneo.

### *Restauración edáfica*

El medio edáfico de la llanura aluvial del río Guadiamar afectado por el accidente minero de la balsa de estériles propiedad de Boliden Apirsa S.L., ha sufrido fundamentalmente dos agresiones. En primer lugar se ha producido una conta-

minación por metales pesados, procedentes del lodo minero, y cuya composición está muy condicionada por la paragénesis del yacimiento, y por el proceso mineralúrgico empleado en el beneficio del mineral. En segundo lugar, y como consecuencia de las actuaciones de retirada del lodo minero por medios de extracción física, se ha producido una pérdida de la capa fértil del suelo y una pérdida de la estructura del mismo, presentando diferentes grados de afección según la cercanía al punto del vertido y en función de la naturaleza del medio receptor (ver apartado 5.1). En las tareas de remediación del medio edáfico se ha seguido la filosofía de extracción física siempre que ha sido posible. En este caso la rapidez en la retirada del lodo ha sido fundamental, al haberse demostrado en diversos ensayos realizados en la zona, el incremento en la movilidad de los elementos contaminantes en los primeros 10 cm del suelo en función del tiempo. El mayor incremento lo presenta el arsénico, multiplicándose por 3,5 su contenido transcurrido un año.

Para evaluar la contaminación residual una vez concluida la retirada mecánica, y para poder diseñar estrategias de actuación, se ha procedido a un estudio de caracterización general de la zona afectada. Este estudio se ha basado en una campaña de muestreo sistemático, estratificado y compuesto, donde se han analizado más de 1700 muestras correspondientes a la llanura aluvial y a la ribera del Guadiamar.

Se han realizado análisis de contenidos totales metálicos (As, Cd, Cu, Pb y Zn), análisis granulométricos, determinación de pH, pH de oxidación,

contenido en carbonatos (%CO<sub>3</sub>) y en azufre pirítico (%S).

Sobre los resultados del análisis se generó una cartografía de niveles de contaminación, estratificando la zona según los niveles de intervención establecidos en la Orden de 18 de diciembre de 1998 de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Este estudio constató la presencia de altos niveles de contaminación residual en el tramo norte, especialmente en el caso del arsénico (186 ppm de media). Igualmente evidenció, concentraciones de zinc por encima del límite de intervención para zonas no sensibles, en un 19% de las muestras analizadas en el tramo denominado de "entremuros" (probablemente agravado por los niveles de fondo de esta zona, que históricamente se ha comportado como balsa de sedimentación de los lixiviados de la cuenca minera). Por último se constata una contaminación residual en forma de mosaicos a lo largo del resto de la zona afectada.

Delimitado el problema de la contaminación residual y una vez agotada la vía de extracción física materializada en 2 intervenciones (1998 y 1999), se han empleado tratamientos físico-químicos a base de adición de sustancias que fijen los contaminantes de una forma total o menos soluble.

Con el objetivo de poder determinar con mayor exactitud las medidas más adecuadas para la remediación de las zonas, se ha llevado a cabo una experiencia con horizontes de suelos de diferentes propiedades a los que se ha añadido un extracto de oxidación del lodo vertido (Tabla 5.8).

Suelo	MO %	Arcilla %	CCC Cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Fed %	pH	CaCO <sub>3</sub> %
1	4,5	13	12	1,0	7,5	0
2	1,5	13	5	2,2	5,0	0
3	2,0	12	6	1,5	7,5	0
4	0,8	50	14	3,0	7,0	0
5	0,4	5	3	0,6	8,5	0
6	0,5	5	3	0,4	8,5	18

MO : Materia orgánica (materia oxidable).  
 CCC : Capacidad de cambio catiónico.  
 Fed : Hierro disuelto.

Tabla 5.8. Características de los horizontes de suelos tratados con extracto de lodo (valores medios de 2 horizontes de características equivalentes).

Los resultados han puesto de relieve que los elementos relativamente solubles como el Zn y Cu sólo son retenidos en cantidades considerables en los suelos carbonatados, no reteniéndose más de un 20% en ninguno de los otros suelos. El As y el Pb, al ser mucho menos solubles, se retienen en mayor cantidad en todos los suelos muestreados, aunque de nuevo son los suelos carbonatados los que los retienen en una mayor proporción (casi el 100%), seguidos por los suelos más ricos en hierro y arcilla. Los suelos ácidos son los que retienen menos Pb y los más pobres en hierro y sin carbonatos los que menos retienen el As. De hecho existe un estrecho paralelismo entre la cantidad de hierro y de As retenido por los suelos, lo que indica que ambos van estrechamente ligados.

Por tanto, el  $\text{CaCO}_3$  es la única enmienda ensayada capaz de fijar conjuntamente los distintos contaminantes aportados al suelo por el vertido de la mina de Aznalcóllar. Una excepción la encontramos en el caso del arsénico, donde la baja eficiencia de fijación de la forma soluble mediante la adición de materiales de reacción alcalina se incrementa notablemente con la adición de compuesto ricos en hierro.

En vista de las consideraciones expuestas se han desarrollado diferentes estrategias para luchar contra la contaminación residual existente y para fijar de forma definitiva los contaminantes al suelo. Estas medidas han sido básicamente las siguientes:

- Tratamiento correctivo de la acidez para la estabilización de los metales pesados.
- Tratamiento inorgánico para la estabilización del arsénico.
- Tratamiento correctivo orgánico para la fertilización de los suelos degradados tras la limpieza mecánica.
- Técnicas complementarias de fitorremediación y fitoextracción.

#### ***Tratamientos correctivos de la acidez. Estabilización de metales pesados.***

En escenarios hiperácidos y ácidos se hace necesaria la incorporación de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  o

residuos no tóxicos de reacción alcalina. Los lodos de depuradoras de aguas residuales o cenizas de combustión con bajo contenido de metales pesados, espumas de remolacha azucarera, etc., son algunos de los subproductos que pueden ser utilizados en prevención de estas situaciones.

El resultado de la incorporación a los suelos de estos productos provoca una elevación del pH, lo que origina una precipitación del  $\text{Fe}^{3+}$  como  $\text{Fe(OH)}_3$ .

Tras realizar diversos ensayos para determinar la eficacia en la inmovilización de los contaminantes (Cd, Zn, Cu, y Pb) se llegó a la conclusión de que el poder de neutralización y la dinámica de la misma es muy similar de unos materiales a otros, recomendando el uso de la espuma de azucarera por las siguientes razones:

- a) Su distribución no produce tanto polvo como el  $\text{CaCO}_3$  que tendría que ser finamente molido.
- b) Su dosificación es más fácil al no compactarse con la humedad y al poder aplicarse con la maquinaria agrícola convencional.
- c) Su reacción en el suelo es más lenta que la del  $\text{CaCO}_3$  consiguiéndose una subida limitada del pH aún con un exceso de dosis.
- d) El contenido en materia orgánica de estas espumas resulta extraordinariamente beneficioso habida cuenta de la retirada de la capa fértil de los suelos durante el proceso de retirada de los lodos.

Por lo tanto, desde el equipo de edafología que trabaja en el tema de suelos dentro del programa científico del Corredor Verde se aconsejó la aplicación de tres cantidades diferentes de espumas de carbonatación de azucareras en los suelos (50, 30 y 20 Tm/ha) en función del grado de contaminación. Con estas aplicaciones se ha pretendido rebajar bajo la forma de carbonatos todos los contaminantes, con la excepción del arsénico. Igualmente, y dado que el proceso de oxidación de los lodos aún no ha finalizado (la falta de lluvia lo ha impedido), habrá que volver a realizar

alguna aplicación posterior, para lo cual se tomarán en los meses de Mayo-Junio las muestras correspondientes para poder diagnosticar el resto del proceso y conocer las cantidades a aplicar.

Una vez finalizada la primera enmienda (1999) se ha realizado una segunda enmienda con una dosis de hasta 60 Tm/ha en el tramo norte, tras las labores de extracción física selectiva.

### ***Tratamiento inorgánico. Estabilización del arsénico***

Como se ha visto en epígrafes anteriores, la inmovilización del arsénico por medio de enmiendas calizas no es todo lo completa que sería deseable. Además ha quedado demostrado que los suelos pobres en hierro y sin carbonatos son los que menos retienen el As, existiendo un estrecho paralelismo entre la cantidad de hierro y de As retenido.

En principio, y en función de los datos bibliográficos, los materiales más adecuados parecen ser los suelos rojos de la zona, ya que es bien conocido el efecto de absorción específica que presentan los óxi-hidróxidos de Fe y especialmente los amorfos o de bajo grado de cristalinidad sobre diferentes aniones. Sin embargo pueden aparecer otros materiales de préstamo de origen industrial (residuos) y, sin duda, hay materiales

naturales o de síntesis que podrían ser utilizados. Se han utilizado materiales de préstamo compuestos por suelos naturales con un alto contenido en óxidos de hierro amorfo (suelos rojos) lo que ha permitido mejorar las características edáficas del suelo y producir un efecto de dilución de la contaminación tras incrementar el espesor del suelo.

Al igual que en el caso anterior se han aplicado tres cantidades diferentes de tierras rojas a lo largo de la cuenca (900, 700 y 500 Tm/ha) en función del contenido en arsénico total.

### ***Tratamiento correctivo orgánico. Fertilización de los suelos***

En las zonas aptas para la regeneración y reforestación se han aplicado durante el otoño-invierno de 1999 las **enmiendas orgánicas** con la finalidad de mejorar las propiedades edafológicas y de fertilidad del suelo y favorecer así las actuaciones de plantación y siembra de la vegetación que contribuirá al establecimiento del Corredor Verde del Guadiamar. La reforestación se basa en nueve modelos de vegetación definidos tras un estudio del comportamiento hidrológico de la cuenca y de las características edáficas, y estos modelos se han estructurado de forma que reproduzcan el hábitat de gran parte de las especies presentes en la zona. El Proyecto de Restauración pretende fomentar un modelo territorial de elevada heterogeneidad ecológica y conectividad que favorezcan la transmisión de procesos y especies a través del Corredor Verde.

### ***Técnicas complementarias de fitorremediación y bioextracción***

La utilización de estas técnicas ha sido relegada a la última fase por presentar varios problemas. Además de las dificultades derivadas del elevado tiempo requerido para producir efectos, existe dificultad para seleccionar plantas que tengan avidez por varios contaminantes simultáneamente, a lo que se une los problemas del destino de los residuos y el peligro de la incorporación a la cadena trófica por la ingesta de los animales.



Figura 5.10. Adición de enmiendas calizas (con espuma de carbonatación de azucarera).

## Restauración morfológica

El río Guadiamar se enmarca en el Macizo Ibérico o Hespérico, en las estribaciones de la Sierra de Aracena, descendiendo hasta el borde de la Depresión Post-Orogénica del Guadalquivir en el Parque natural de Doñana. Con una superficie de cuenca aportadora de 1281 km<sup>2</sup>, presenta un perfil longitudinal típico parabólico cóncava, el cual influye, de forma parcial, en las características de evacuación de las escorrentías.

La cuenca ha sufrido serias modificaciones a lo largo de la historia. Desde las alteraciones de la cubierta vegetal como consecuencia de la actividad minera y de la transformación a usos agrícolas de masas forestales, hasta las últimas modificaciones en su tramo bajo. Estas últimas se iniciaron entre los años 1960 y 1970 con la construcción de dos muros para el control de los caudales de avenidas en la zona denominada de "Entremuros".

En la actualidad y como consecuencia del movimiento de tierras realizado durante las labores de retirada de lodos vertidos en el accidente de las minas de Aznalcóllar, se ha producido una importante modificación del aluvial de inundación y de la ribera en una extensión de 62 km en el río Guadiamar y de 5 km en el río Agrio.

El grado de afección es variable según las zonas. La mayor alteración se localiza en el tramo norte, donde la metodología utilizada para la retirada del lodo y el uso de maquinaria pesada obligó a realizar una sobreescavación del terreno. Esto ocasionó una drástica modificación de la morfología del cauce y su llanura de inundación. La actual configuración de la sección media carece de cauce, encontrándose únicamente vestigios de su antiguo trazado mediante la vegetación actualmente existente, que consiste en alineamientos de *Eucalyptus globulus*, que han quedado en pie tras la corta de la mayor parte de la vegetación de ribera afectada por el vertido de lodos. En el resto del cauce, si bien los problemas de alteración del perfil del río son menores, la pérdida de la masa vegetal en la llanura aluvial ha aumentado el potencial de erosión del suelo, aumentando la carga de sedimentos al río originados por la acción de la escorrentía superficial.

Las primeras medidas adoptadas estaban encaminadas a disminuir la aportación excesiva de materiales provenientes del aluvial y la ribera, poco o nada consolidados, y cuya disgregación y posterior transporte podía elevar considerablemente las tasas de elementos en suspensión en los tramos inferiores. Para controlar la carga de materiales del lecho se diseñaron y ejecutaron una serie de estructuras transversales de retención de sedimentos, distanciadas cada 400 metros, a lo largo del tramo medio del río Guadiamar (Fig 5.11). Estas estructuras, por su diseño, sólo eran útiles para retener la fracción gruesa de los sedimentos, no siendo eficaces para la fracción fina característica del lodo. Durante la segunda limpieza del cauce, acaecida en el verano 1998, se rompieron gran parte de dichas estructuras transversales, sobre las cuales se decidió no reconstruirlas con objeto de no interferir en el carácter mediterráneo del río y facilitar el movimiento de la fauna a lo largo de todo su perfil longitudinal.

Para controlar la carga de lavado, debida fundamentalmente a los procesos de erosión laminar, que a efectos prácticos se corresponde con la fracción menor de 0,06 mm, donde se incluye el lodo vertido, se procedió a la protección de los taludes poco consolidados mediante técnicas de hidrosiembra, con el objeto de incrementar la cobertura vegetal sobre el suelo disgregado.

Una vez controlado el problema inicial frente a la erosión se ha procedido a la restauración



Figura 5.11. Estructura transversal para la retención de sedimentos.

ambiental de la cuenca del Guadiamar afectada por el vertido, fundamentada en el conocimiento de la dinámica geomorfológica del río. Para ello se ha procedido al estudio detallado de la llanura aluvial, tanto en sentido longitudinal como transversal, y sus cambios temporales.

En el estudio se ha prestado una atención especial a los siguientes aspectos:

- Dinámica de cauces y procesos de colmatación.
- Formación y evolución de bancos intermedios en la llanura aluvial.
- Caracterización de tramos de llanuras de inundación.
- Dimensión temporal de cambios geomorfológicos en el sistema fluvial.

El resultado, expuesto en forma de transversales y mapas ecodinámicos, tiene como objetivo la

identificación de unidades morfodinámicas y fisiográficas, procesos sedimentarios, hidromorfos e hidromorfológicos, para evaluar la capacidad funcional del valle fluvial del Guadiamar.

El estudio de la funcionalidad conlleva un análisis detallado de los cambios y modificaciones de cauces, procesos de colmatación aluvial y conformación de sectores de inundación. Para mostrar dichos cambios temporales se levantaron transversales de la llanura aluvial marcada entre las unidades de terrazas fluviales y ladera de la vertiente occidental del Aljarafe. Las referencias geomorfológicas de estos cambios se han elaborado mediante una Jerarquía de Unidades (llanura de inundación distal y proximal, cauce activo, abanico aluvial, banco intermedio, etc.), que aglutinan elementos funcionales de rango progresivamente menor (cauce colmatado, levée, cubeta de decantación, etc.). Estas unidades

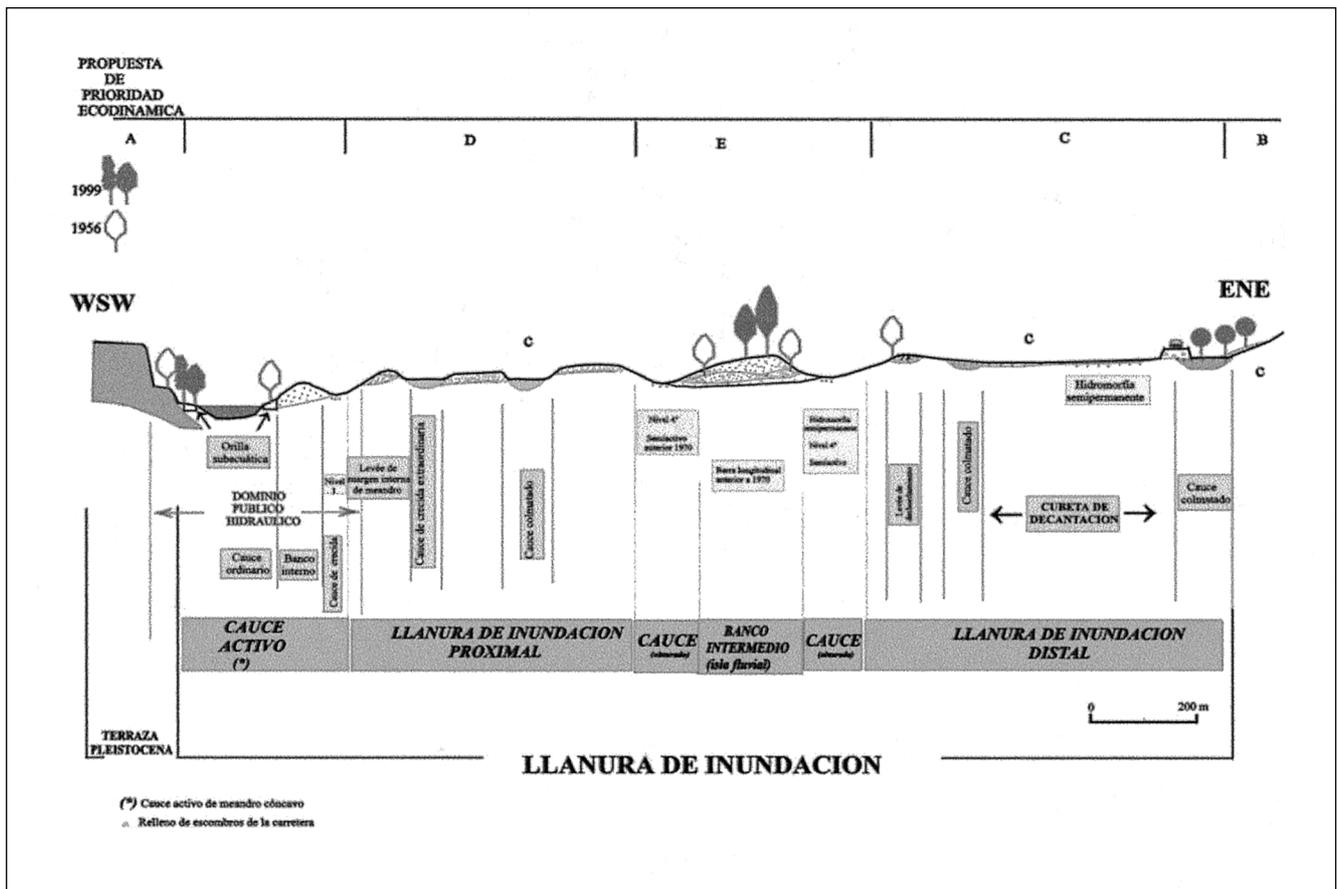


Figura 5.12. Esquema de sistema ecodinámico.

constituyen los ecosistemas funcionales mínimos que acogen la restauración ambiental.

Los modelos de vegetación definidos para la revegetación de la llanura aluvial y su protección frente a fenómenos erosivos proceden de los existentes en la cuenca fluvial del Guadiamar, así como del segmento mesófilo del curso fluvial, considerándose el mantenimiento de la vegetación forestal y matorral existente en la actualidad.

Por último, cabe resaltar la filosofía de este proyecto de restauración morfológica, basado en la idea de dejar que el río "hable", que se consolide una vez que han terminado las primeras actuaciones de emergencia, y sólo cuando la dinámica del río marque su trazado, como está ocurriendo tras las lluvias de la primavera de 2000, realizar todas las medidas necesarias para su consolidación y protección, pero siempre bajo la perspectiva de conservar su carácter mediterráneo.

### Conclusiones

El medio edáfico de la llanura aluvial del río Guadiamar ha sufrido una importante afección como consecuencia del accidente minero, principalmente contaminación por metales pesados y pérdida de la capa fértil y estructura por las tareas de retirada de lodos.

Para remediar la contaminación se han realizado tratamientos correctivos de la acidez y tratamientos inorgánicos. En las zonas donde los niveles de contaminación residual permanecían por debajo de los niveles aceptables, se han realizado enmiendas orgánicas para mejorar la estructura y fertilidad de los suelos, facilitando las actuaciones de plantación y siembra de vegetación que contribuirá al establecimiento del Corredor Verde del Guadiamar. El Proyecto de Restauración pretende fomentar un modelo territorial de elevada heterogeneidad ecológica y conectividad.

Respecto a la restauración morfológica, la filosofía es dejar al río que hable, que marque su trazado, y entonces realizar las medidas necesarias para su consolidación y protección, conservando su carácter mediterráneo.

### REFERENCIAS

Alastuey, A., García-Sánchez, A., López, F. y Querol, X. 1999. Evolution of pyrite mud weathering and mobility of heavy metals in the Guadiamar valley after the Aznalcóllar spill, south-west Spain. *The Science of the Total Environment*, 242 (1-3): 41-55.

Almodóvar, G.R., Sáez, R., Pons, J.M., Maestre, A., Toscano, M. y Pascual, E. 1998. Geology and genesis of the Aznalcóllar massive sulphide deposits Iberian Pyrite Belt, Spain. *Mineralium Deposita*, 33: 111-136.

Andaluz de Piritas, S.A. 1979. Las piritas de Aznalcóllar. Catálogo editado por Andaluz de Piritas, S.A.; Aznalcóllar (Sevilla).

Antón-Pacheco, C., Gumiel, J.C., de Miguel E., López, E., Gómez, J.A., Giménez, M., Rejas, J.G., Barettino, D., y Ortiz, G. 1999. Cartografía del vertido de lodos de la mina de Aznalcóllar mediante imágenes Daedalus ATM. *Revista de Teledetección*, 12: 13-19.

Antón-Pacheco, C., Rowan, L.C. y Mars, J. C. 2000. Analysis of HyMap data on the Aznalcóllar and Rio Tinto Mining Districts, Andalucía, Spain for Mapping Mine-Waste Materials and Hydrothermally Altered Rocks. *XIV Geologic Conference on Remote Sensing. ERIM*, Nov. 2000, Las Vegas. USA.

Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) 1998. Accidente minero de Aznalcóllar situación actual de los trabajos de restauración en diferentes zonas. Propuestas de actuaciones para la recuperación de la cuenca del Guadiamar. Sevilla. CD-ROM. Noviembre 1998.

Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) 1998. Disposiciones de la Junta de Andalucía relativas a la rotura de la balsa de decantación de la mina de Aznalcóllar. Sevilla. Julio 1998.

Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) 1999. Corredor Verde del Guadiamar balance de actuaciones para la corrección de los efectos del vertido minero de Aznalcóllar. Sevilla. CD-ROM. Abril 1999.

Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) 1999. La Estrategia del Corredor Verde del Guadiamar. Fundamentos de la estrategia. Sevilla. Junio 1999.

Gallart, F., Benito, G., Martín-Vide, J.P., Benito, A., Prió, J.M. y Regües, D. 1999. Fluvial geomorphology and hidrology in the dispersal and fate of pyrite mud particles released by the Aznalcóllar mine tailings spill. *The Science of the Total Environment*, 242 (1-3):13-26.

ITGE 1998. Cartografía y cubicación de lodos mineros en la cuenca del río Guadiamar. Aznalcóllar-Entremuros. Informe ITGE: RM-001-98.

ITGE 1999. Contribución a la caracterización química de los lodos mineros vertidos al cauce del río Guadiamar. Informe ITGE: RMMA-20-99.

ITGE 1999. Cartografía del lodo piritico remanente (Julio 1999) en la cuenca del río Guadiamar. Informe interno. GTB 06/99, 22 p, 7 mapas.

- Junta de Andalucía – Administración General de Estado 1999. Memoria de Actuaciones. Comisión de Coordinación para la recuperación de la cuenca del Guadiamar. Administración General del Estado y Junta de Andalucía. Abril 1999
- King, T. V. V. 1995, Environmental considerations of active and abandoned mine lands: *U. S. Geological Survey, Bulletin* 2 220, 38p.
- Kollewe, M., Bienlein, J., Kollewe, T. y Spitzer, H. 1996, Comparison of multispectral airborne reflectance images with ground surface measurements. *Proc. of the Second International Airborne Remote Sensing Conference*, San Francisco, California, 1996. Ed. ERIM.
- López-Pamo, E., Baretino, D., Antón-Pacheco, C., Ortíz, G., Arranz, J., Gumiel, J. C., Martínez-Pledel, B., Aparicio, M., Montouto, O. 1999. The extent of the Aznalcóllar Pyritic Sludge Spill and its Effects on Soils. *The Science of the Total Environment*, 242 (1-3): 57-88.
- Mueller, A., Strobl, P., Lehmann, G. y Reinhaeckel, G. 1997. Case studies of airborne remote sensing for the assessment of mining impacts. *Proc. of the third International Airborne Remote Sensing Conference*, Copenhagen, Denmark, 1997. Ed. ERIM
- Nordstrom, D.K. y Alpers, C.N. 1999. Geochemistry of Acid Mine Waters. En: Plumlee, G. and Logsdon, M. (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Rev. Econ. Geo.*, 6 A: 133-160.
- Ortíz Figueroa, G. 1999. El SIG en el estudio de la distribución espacial del vertido de lodos de la balsa minera de Aznalcóllar. En: Laín, L. (ed.), *Los Sistemas de Información Geográfica en los Riesgos Naturales y en el Medio Ambiente*, Publicaciones ITGE, Madrid, 167-173.
- Sierra, J. 1984. Geología, mineralogía y metalogenia del yacimiento de Aznalcóllar (Segunda Parte: Mineralogía y Sucesión mineral). *Boletín Geológico y Minero*, 95: 553-568.
- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J. L., Herman, M. y Morcrette, J.J. 1995. *6S Users Guide, version 1* ([http://loasy.unin-lille1.fr/informatique/sixs\\_qb.html](http://loasy.unin-lille1.fr/informatique/sixs_qb.html))