

# ANÁLISIS DEL RIESGO DEL TRANSPORTE FLUVIAL DE LOS LODOS MINEROS RESIDUALES DEL VERTIDO DE AZNALCÓLLAR EN EL VALLE MEDIO-BAJO DEL RÍO GUADIAMAR

A. Benito Calvo<sup>1</sup>, G. Benito Ferrández<sup>2</sup>, F. Gallart<sup>3</sup>, J. P. Martín-Vide<sup>4</sup>, D. Regües<sup>3</sup> y E. Bladé<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, U. Complutense de Madrid, 28040 Madrid, (alffonso@eucmax.sim.ucm.es).*

<sup>2</sup>*Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Serrano 115bis, 28006 Madrid.*

<sup>3</sup>*Institut des Ciències de la Terra "Jaume Almera", CSIC, Solé Sabaris s/n, 08028 Barcelona.*

<sup>4</sup>*Departament Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, ETSECCP, U. Politècnica de Catalunya, Gran Capità s/n, 08028 Barcelona.*

**Resumen:** Tras la rotura de la balsa minera de Aznalcóllar (Sevilla, España) que provocó el derrame de 4,5 hm<sup>3</sup> de agua ácida, se procedió a la rápida limpieza de los lodos mineros en las llanuras aluviales de los ríos Agrio y Guadamar. Sin embargo, pese a la efectividad de dicha limpieza, aún quedan lodos mineros residuales en una fina película superficial y como contaminantes en los suelos, susceptibles de ser movilizados por la erosión hídrica y que pueden llegar a afectar a los valiosos ecosistemas del Parque Nacional de Doñana y las Marismas del Guadalquivir. En este trabajo se ha realizado una valoración del riesgo de movilización de los lodos mineros residuales mediante un análisis geomorfológico detallado que indique las áreas potenciales de erosión-sedimentación y la dinámica presumible que seguirán los lodos residuales en las llanuras aluviales de los ríos Agrio y Guadamar y por medio de un análisis de la dispersión de los lodos mineros residuales por efecto de las avenidas, mediante la modelización del flujo durante las avenidas y el análisis textural de los lodos, que proporcione los valores críticos de transporte y sedimentación. Estos estudios sugieren que las partículas contaminantes de los lodos mineros residuales son susceptibles de ser transportadas y sedimentadas en el Parque Nacional de Doñana durante los períodos de avenidas.

**Palabras clave:** dinámica fluvial, avenidas, río Guadamar, lodos mineros, accidente minero de Aznalcóllar, Parque Nacional de Doñana

**Abstract:** After the Aznalcóllar pyrite mine disaster (Seville, Spain) which caused the spilling of some 4.5 hm<sup>3</sup> of acid water, the floodplains of the rivers Agrio and Guadamar were rapidly cleaned of waste sludge. However, despite the efficiency of cleaning activities, there is still evidence of a fine superficial layer of sludge and some soil contamination, with the consequent risk of remobilisation of the pollutants by water erosion. There is much concern that these contaminated sediments may affect the precious ecosystems of the Doñana National Park and the Guadalquivir marshlands. This report describes the evaluation of the risk of mobilisation of the waste sludge through: 1) detailed geomorphological analysis, indicating potential areas of erosion-sedimentation on the floodplains of the rivers Agrio and Guadamar, and predicted dynamics of the waste sludge, and 2) evaluation of the potential dispersion of the waste sludge provoked by future flood events, including hydraulic calculations to model channel flow and the analysis of the texture of the sludge to obtain critical transport and sedimentation values. Findings suggest that the waste sludge is likely to be transported and deposited within the Doñana National Park during future flood events.

**Key words:** Fluvial dynamics, floods, Guadamar river, waste sludge, mining accident of Aznalcóllar, Doñana National Park.

Benito Calvo, A., Benito Ferrández, G., Gallart, F.; Martín-Vide, J. P., Regües, D., y Bladé, E. (2001): Análisis del riesgo del transporte fluvial de los lodos mineros residuales del vertido de Aznalcóllar en el valle medio-bajo del río Guadamar. *Rev. Soc. Geol. España*, 14 (1-2): 89-100.

La rotura de la balsa de lodos situada en la corta minera de la población de Aznalcóllar el día 25 de Abril de 1998, produjo el vertido de 4,5 hm<sup>3</sup> de agua ácida y lodos piríticos de tamaño medio de 12 µm con altas concentraciones en metales pesados. La rotura generó una

avenida que circuló por las llanuras aluviales de los ríos Agrio y Guadamar hasta la entrada de las marismas del Guadalquivir, donde pudo ser contenida, poniendo en peligro los valiosos ecosistemas del Parque Natural y Parque Nacional de Doñana. El flujo derramado provo-

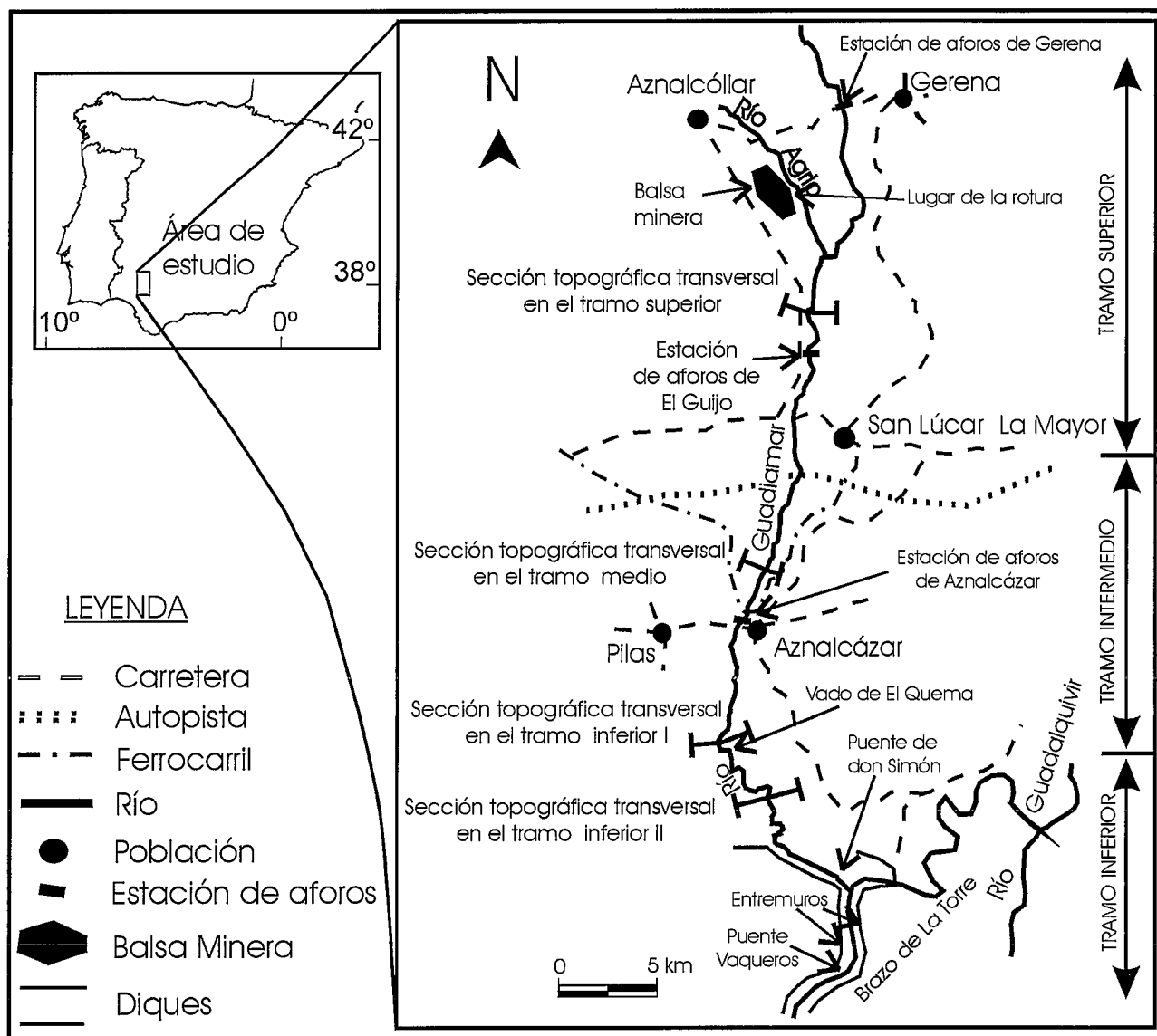


Figura 1.- Localización del río Guadamar en el tramo afectado por el accidente de Aznalcóllar, división del valle en tramos y situación de los perfiles transversales.

có la sedimentación de una capa de lodos en el cauce y en la llanura aluvial de los ríos Agrio y Guadamar que ocupó 2.616 hectáreas, desde la balsa minera hasta la entrada en las Marismas del Guadalquivir, con un volumen total de 1.981.844 m<sup>3</sup> de lodo pirítico (ITGE, 1998). Las cantidades medias estimadas de partículas tóxicas vertidas de la balsa minera de Aznalcóllar son del orden de 16.000 toneladas de zinc, 10.000 toneladas de arsénico, 4.000 toneladas de cobre, 1.000 toneladas de antimonio, 120 toneladas de cobalto, 1.000 toneladas de talio y bismuto, 50 toneladas de cadmio y plata, 30 toneladas de mercurio, 20 toneladas de selenio y otros metales (Grimalt *et al.*, 1999). La contaminación por metales pesados afectó a la capa superficial del suelo en la llanura de inundación (0-20 cm) y en algunos casos penetró hasta los 50-80 cm (Cabrera *et al.*, 1999). Los contaminantes principales del suelo (Zn, Pb y Cd), penetraron principalmente en fase de la solución de los lodos, mientras que otros contaminantes

(Cu, As, Sb, Bi, Tl) penetraron en fase sólida. Unas muestras de agua tomadas 20 km aguas abajo de la balsa minera pocas semanas después indican un pH de 3,8, que contrasta notablemente con la tendencia general que es de aguas alcalinas (pH de 8), muestreadas aguas abajo y en el río Guadalquivir (Van Geen *et al.*, 1999).

Una vez que la avenida pudo ser contenida en la canalización de Entremuros, a la entrada de las Marismas del Guadalquivir, comenzaron las tareas de limpieza, que se prorrogaron hasta el mes de noviembre de 1998 y en las que se invirtió cerca de 5.000 millones de pesetas. Aunque los trabajos de limpieza fueron de una gran efectividad y se consiguió retirar prácticamente la totalidad de los lodos vertidos durante el accidente, aún han quedado trazas de lodos en forma de una fina película superficial y asociados a los suelos contaminados. El análisis de alrededor de 100 muestras de suelos recogidas a lo largo del valle del río Guadamar, realizado por

el Ministerio de Medio Ambiente y la Junta de Andalucía, mostró que en un 73% de las muestras del cauce se excedían concentraciones de  $52 \text{ mg kg}^{-1}$  para el As (con el 53% por encima de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que en el 83 % de las muestras el Zn superaba concentraciones de  $700 \text{ mg kg}^{-1}$ , donde el 61% estaba por encima de  $1200 \text{ mg kg}^{-1}$ . En la llanura de inundación los resultados fueron que el 53 % de las muestras tenían concentraciones de As superiores a  $52 \text{ mg kg}^{-1}$ , (con el 37% sobre los  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ), el 57% excedía los  $700 \text{ mg kg}^{-1}$  de contenido en Zn (con el 29% superando los  $1.200 \text{ mg kg}^{-1}$ ), el 28% tenía concentraciones de Pb superiores a  $350 \text{ mg kg}^{-1}$  (con el 19% sobre los  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y el 28% excedía concentraciones de Cu de  $250 \text{ mg kg}^{-1}$  (con el 3% por encima de los  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Estos resultados junto con las profundas modificaciones introducidas en el cauce y llanura aluvial de los ríos Agrío y Guadamar derivadas de la utilización de maquinaria pesada durante la limpieza, hacen presumible la movilización de los lodos mineros residuales por reajustes de los sistemas fluviales y por efecto de las avenidas naturales (Gallart *et al.*, 1999). Este accidente reavivó el debate ya existente sobre el estado de degradación de las Marismas del Guadalquivir y la necesidad de regenerar hidrológicamente la cuenca, restaurando los principales ríos y arroyos que alimentan las marismas.

La mayor parte de los metales pesados producto de las actividades mineras se transportan en fase sólida, por lo que los procesos geomorfológicos de la dinámica fluvial tienen una importancia fundamental en el transporte y sedimentación de los metales pesados (Lewin y Macklin, 1987; Miller, 1997). Por consiguiente, el análisis geomorfológico e hidrológico se muestra como una herramienta fundamental en el estudio de la dispersión de contaminantes en estas áreas de gran valor medioambiental como son el Parque Nacional de Doñana y las marismas del Guadalquivir.

### Objetivos y método

Los objetivos que han llevado a la realización de este trabajo son: el estudio de la evolución de la dinámica fluvial del río Guadamar, mediante un levantamiento de un mapa geomorfológico detallado, que aborde tanto las condiciones existentes en régimen natural (anterior a 1950) como las distintas modificaciones antrópicas a que ha sido expuesta su llanura aluvial; estudiar la incidencia del régimen hidrológico e hidráulico del río Guadamar como agente de transporte, dispersión y sedimentación de los lodos remanentes después de la limpieza del Guadamar; emitir las recomendaciones adecuadas para prevenir la difusión de los contaminantes a corto y medio plazo; y valorar las medidas propuestas en el plan de restauración "Doñana 2005" y el proyecto de restauración del río Guadamar.

Para la realización de este estudio se ha realizado un análisis geomorfológico e hidrológico del tramo afectado por el vertido. En el análisis geomorfológico, se

ha llevado a cabo el levantamiento de cartografías geomorfológicas seriadas, dando lugar a dos series cartográficas geomorfológicas a escala 1:10.000 del área afectada, la primera para régimen natural (anterior a 1956), y la segunda incluyendo las actuaciones antrópicas (1956-1998). Para ello se han utilizado fotografía aérea secuencial, utilizando vuelos de 1956 (escala 1:30.000), de 1993 (escala 1:20.000) y de 1998 (escala 1:15.000), así como datos puntuales del vuelo de 1998 (escala 1:10.000) en color. En el análisis hidrológico, los datos de las estaciones de aforos de la Confederación hidrográfica del Guadalquivir (1998b) y el levantamiento de secciones topográficas transversales en tramos característicos del río Guadamar, junto con el estudio sedimentológico de muestras de lodos, han proporcionado datos sobre el riesgo de movilización de los lodos mineros remanentes. También se ha realizado una modelización bidimensional en el tramo final del río Guadamar en régimen de avenidas, identificando las zonas potenciales de sedimentación. Los datos del registro de aforos y las secciones topográficas transversales, han servido para caracterizar las unidades geomorfológicas con caudales y periodos de retorno para avenidas futuras, dando como resultado una tercera serie cartográfica, a escala 1:10.000, del riesgo de inundación del río Guadamar.

### Área de estudio

La cuenca del río Guadamar está situada en el suroeste de la Península Ibérica y discurre entre Sierra Morena, lugar de nacimiento del río Guadamar, hasta alcanzar la depresión del Guadalquivir donde desagua en las Marismas del Guadalquivir. El área afectada corresponde al tramo final del río Agrío, y al curso medio-bajo del Guadamar, que se localiza desde la confluencia del río Agrío en el río Guadamar hasta la unión del río Guadamar con el Brazo de la Torre en las Marismas del Guadalquivir (Fig. 1). Administrativamente el área se localiza en la parte occidental de la provincia de Sevilla, ya cerca del límite con la provincia de Huelva.

El vertido de lodos contaminantes se produjo en el tramo final del río Agrío, principal afluente del Guadamar, justo antes de la confluencia entre ambos. El río Guadamar representaba uno de los principales aportes hídricos a las marismas del Guadalquivir y al Parque Nacional de Doñana en condiciones naturales, antes de que se vieran modificadas por la canalización del río desde su llegada a la marisma hasta su desembocadura en el Brazo de la Torre.

El tramo afectado del río Agrío-Guadamar drena los materiales terciarios y cuaternarios de la depresión del Guadalquivir, excepto en su extremo norte, donde discurre por los materiales devónicos y carboníferos de la Zona de Ossa-Morena del Macizo Ibérico (Coullaut *et al.*, 1978; Leyva *et al.*, 1976a, 1976b; Muelas *et al.*, 1976; Torres *et al.*, 1975). El río Guadamar forma un valle amplio con la llanura aluvial encajada entre 80 y 60 metros en una su-

perficie poligénica. El valle es claramente asimétrico, con una secuencia de terrazas en su margen izquierda y abanicos aluviales en su margen derecha.

En la cuenca del río Guadiamar (1.879 km<sup>2</sup>) hay tres estaciones de aforo localizadas en el puente de la carretera a Gerena, aguas arriba de la zona afectada (la cuenca hasta ese punto es de 92,5 km<sup>2</sup>), en el Guijo (cuenca de 574 km<sup>2</sup>), y en Aznalcázar (cuenca de 1.319 km<sup>2</sup>), mientras que la subcuenca del río Agrio (228 km<sup>2</sup>) se encuentra regulada por una presa de unos 40 hm<sup>3</sup> de capacidad, a pocos kilómetros aguas arriba de la corta de minera de Aznalcóllar, que causa una alteración importante en su régimen hidrológico.

Según la información hidrológica existente, procedente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (1998b), los principales datos sobre el río Guadiamar en la estación de aforos de Aznalcázar son los siguientes: el caudal medio es de 6,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (volumen anual de 209 hm<sup>3</sup> y precipitación media anual de 667 mm) con una desviación estándar de hasta 5,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, lo que señala la elevada irregularidad interanual. El período de aguas altas se concentra entre enero y marzo (caudal medio de 13 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) mientras que el período de aguas bajas se produce entre junio y octubre (caudal medio de 3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Según las mismas fuentes, los caudales punta de avenida son de 2.160 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para un periodo de retorno de 500 años, 1.520 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para 50 años y 860 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para 5 años.

## Resultados

### *Características geomorfológicas*

El análisis de las cartografías geomorfológicas de la dinámica del río Guadiamar en régimen semi-natural (Fig. 2a), realizadas a escala 1:10.000 obtenidas a partir de la fotointerpretación de fotogramas aéreos de 1956, ha dado como resultado la separación de tres sectores o tramos diferentes:

*Tramo Superior.* Este tramo corresponde a la parte superior de la vega del río Guadiamar y a la parte final del río Agrio. Se caracteriza por una llanura de inundación que presenta zonas de escaso desarrollo lateral (200-300 m), tanto en el río Agrio como en el Guadiamar, producidas por la proximidad del curso actual con las terrazas fluviales más bajas. En la llanura de inundación se han observado diversos depósitos de derrame (*crevasse splay*), además de numerosos cauces abandonados de escasa funcionalidad durante avenidas. Este tramo presenta un cauce fluvial ancho, bastante rectilíneo (sinuosidad 1,13), con una pendiente media del 0.146%, por donde en época de aguas bajas el río se divide en varios canales y divaga entre barras de arenas y gravas.

*Tramo Medio.* Este segundo tramo se sitúa desde el puente de la carretera de Sanlúcar la Mayor, hasta el Vado de Quema. Dentro de este tramo el río Guadiamar recibe, por su margen derecha, aportes de arroyos laterales con fondos de valle plano, como los arroyos Ar-

danchón, Molinero, de San Cristobal y Arcarayón. Respecto al tramo anterior hay una fuerte disminución de la pendiente media (0,06%), y un aumento de la sinuosidad (1,30). En esta zona del río Guadiamar la anchura de la llanura de inundación está en torno a los 450-800 m, limitada por terrazas bajas en su margen derecha y por abanicos aluviales en su margen izquierda. La llanura está surcada por cauces abandonados de poca entidad, similares a los del tramo anterior; y por cauces de alta conectados hidráulicamente al cauce principal que funcionan claramente durante períodos de avenida. Asociados a la curvatura cóncava de los meandros y a zonas deprimidas entre diques naturales (*levées*), se localizan depósitos de derrame o *crevasse splay*. El cauce fluvial es más meandriforme, de menor anchura que en el tramo superior, situándose entorno a los 50 m. Las barras de arenas se forman asociadas a los aportes laterales de los arroyos de la margen derecha.

*Tramo inferior.* Este tramo corresponde a la parte baja del río Guadiamar, localizada entre el Vado de Quema y su confluencia con el Brazo de la Torre del río Guadalquivir. El régimen natural de la dinámica fluvial de la parte baja del río Guadiamar tiene como característica más relevante el aumento de la anchura de la llanura aluvial, dando paso progresivamente a amplias superficies de topografía casi plana y a zonas de marcado endorreísmo (lagunas y zonas húmedas), que indican el inicio de la marisma. En esta zona la pendiente media del río disminuye respecto al tramo anterior, situándose en 0,015%, mientras que la sinuosidad se mantiene, o incluso aumenta ligeramente. En la llanura aluvial siguen presentes los dos tipos de cauces abandonados: los de morfología difusa y poca funcionalidad; y cauces de alta con trazado neto, funcionales durante avenidas y que en condiciones naturales constituirían los emisarios que alimentaban la marisma, como es el caso del Caño Guadiamar. El cauce principal mantiene las características del tramo medio, con unas dimensiones que se sitúan entre los 30-50 m de ancho y encajado en la llanura aluvial en torno a los 3 m. En este tramo el cauce fluvial del río Guadiamar no presenta barras de arena. Asociados al cauce principal, y a los de alta, se localizan depósitos de derrame.

Las variaciones observadas en la dinámica fluvial debidas a procesos naturales, entre 1956 y 1998, son de escasa magnitud en toda la cuenca estudiada del río Guadiamar. Los únicos cambios naturales destacables observados entre 1956-1998 se producen en el tramo superior, y están relacionados con la creación-destrucción de las barras fluviales. Estos escasos cambios naturales contrastan con las variaciones en la morfología fluvial debida a la actividad humana. Los cambios antrópicos (Fig. 2a) previos al vertido minero se pueden sintetizar en una actividad extractiva asociada a la corta minera de Aznalcóllar y a las areneras que explotan áridos de la llanura y terrazas fluviales, centradas en el tramo superior, donde han producido importantes variaciones en el curso de los ríos Agrio y Guadiamar, en la canalización del río Guadiamar

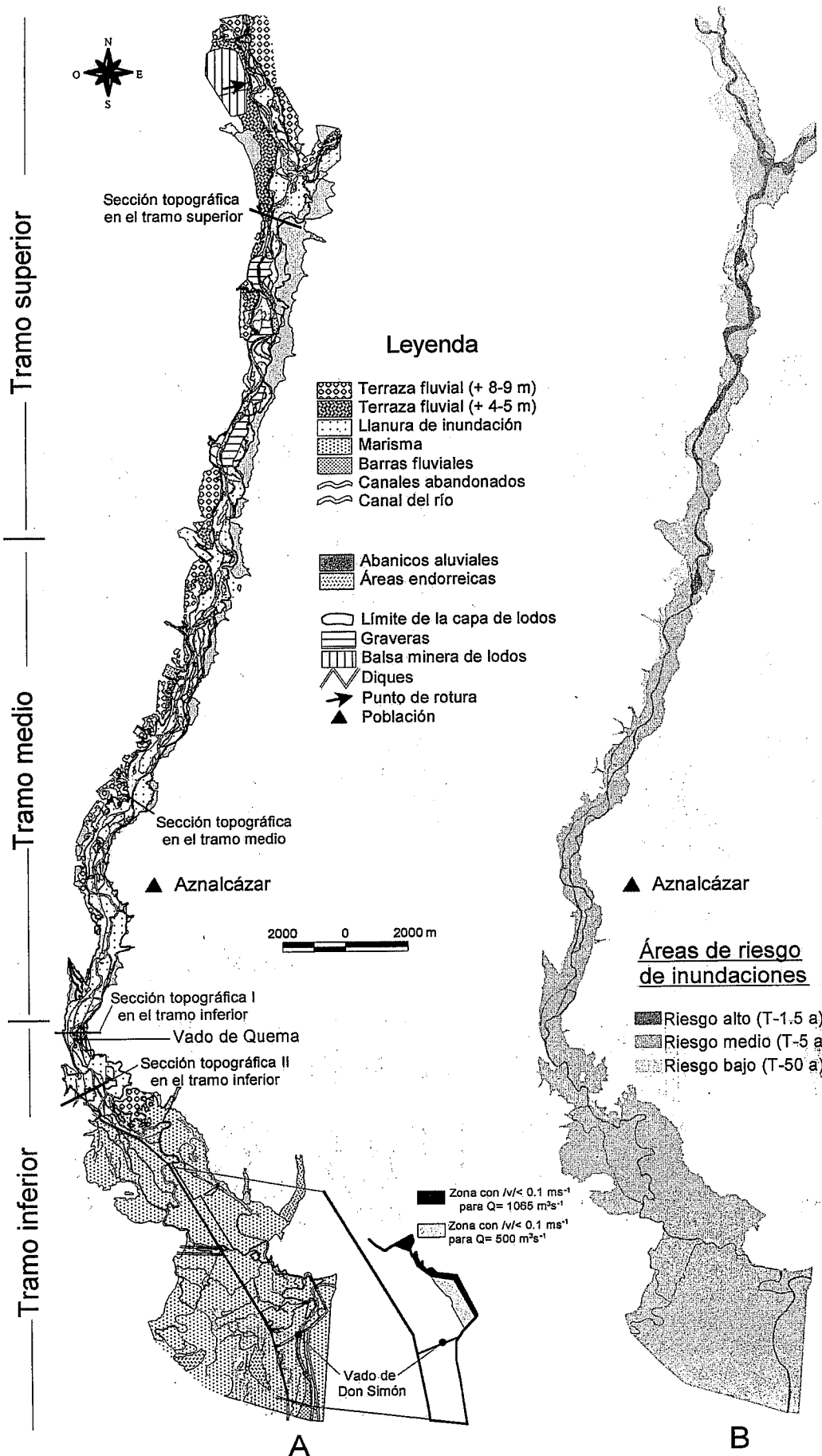


Figura 2.- (A) Mapa geomorfológico del valle del río Guadamar, con la situación de los perfiles topográficos transversales y las áreas de sedimentación potencial de partículas contaminantes en el sector de Entremuros para avenidas de  $Q = 1.065 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $Q = 500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . (B) Mapa de riesgo de inundación en el valle del río Guadamar en régimen natural (anterior a 1956).

en su tramo final (Entremuros), dando lugar al abandono del cauce principal en ciertos tramos y la desconexión hidrológica del Guadiamar con las marismas del Guadalquivir y en el aumento de la actividad agraria, principalmente cultivos de regadío en la vega del Guadiamar.

#### *Efectos de la limpieza de lodos*

*Procesos en el cauce del río Guadiamar.* En el caso de un medio fluvial sin modificar, la dispersión de los restos de lodo pirítico en el cauce está directamente relacionada con la pendiente del río y la profundidad o nivel del agua. La sedimentación de los lodos piríticos residuales resulta más improbable en los tramos superior y medio, debido a la alta capacidad de transporte sólido, que en el tramo inferior, donde podría producirse acreción.

Aunque la dinámica fluvial natural no ha producido importantes cambios en la morfología entre 1956 y 1998, la actual falta de protección del lecho y márgenes del cauce, después de los trabajos de limpieza, se traduce en un elevado riesgo de erosión y sedimentación del curso fluvial, que estaría destinado a restaurar las formas fluviales naturales.

Algunos de los cambios en los procesos que operan en el río como resultado de la limpieza de los lodos pueden anticiparse a partir de algunas relaciones geomorfológicas bien conocidas (e. g. Lane, 1955), basadas en el concepto de equilibrio del sistema fluvial,

$$Q_s d \approx QS$$

donde  $Q_s$  es el caudal sólido,  $d$  es el tamaño medio del sedimento,  $Q$  es el caudal de agua y  $S$  la pendiente del río. El cauce del río, en respuesta a un posible incremento en el aporte de sedimento, como se puede prever después de los trabajos de limpieza, normalmente genera una acreción del fondo, lo que lleva a una pendiente  $S$  mayor que trata de establecer un nuevo equilibrio en la relación anterior.

Si consideramos que los trabajos de limpieza con maquinaria tanto del cauce principal como de las áreas de llanura aluvial pueden producir una aceleración de la erosión de las márgenes y un incremento del caudal de material del lecho, otra conocida relación geomorfológica, de Schumm (1969), propone lo siguiente:

$$Q_s^+ \approx B^+ D^- F^+ \ddot{e}^+ S^+ P^-$$

donde  $B$  es la anchura del cauce,  $D$  es la profundidad,  $F$  es la relación anchura-profundidad,  $\ddot{e}$  en la longitud de onda de los meandros, y  $P$  es la sinuosidad.  $+/-$  indica incremento o descenso, respectivamente, previsto para cada variable, frente al aumento del caudal sólido. Además de los cambios previstos por la relación de Lane (acrección y aumento de pendiente), la función de Schumm indica un incremento de la anchura del cauce, de la longitud de onda de los meandros, así como un descenso de la profundidad y de la sinuosidad, es decir el cauce desarrollará un curso más rectilíneo. La acreción puede tener lugar como acumulación del lodo pirítico junto con los sedimentos naturales a lo largo del canal, especialmente en los tramos intermedios e inferiores del río Guadiamar. La relación de Lane (1955) también predice que este sedimento sea más

fino que el original, en busca de establecer un nuevo equilibrio. A largo plazo, el cauce en sí mismo no debería de considerarse como una trampa permanente para las partículas de pirita debido a que el rebrote de la vegetación y el acorazamiento del lecho harían descender el aporte de sedimentos desde aguas arriba y con ello restauraría la capacidad de acarreo del caudal para estas partículas finas.

*Procesos en la llanura aluvial.* Los procesos relacionados con la llanura aluvial incluyen la erosión de las márgenes debida a la migración lateral de los cauces y la deposición del sedimento en suspensión. En el río Guadiamar, la sedimentación en la llanura ha estado dominada tanto por los derrames que se producen cuando el agua supera las orillas del canal, asociados a las márgenes exteriores y unión de canales, como por los depósitos de acreción vertical. En los trabajos de limpieza de la llanura aluvial se ha rellenado parcialmente los canales de avenida, modificando los procesos de erosión y sedimentación en la llanura aluvial. Sin embargo las mayores tasas de sedimentación de la fracción en suspensión de lodos piríticos probablemente ocurran en la llanura aluvial debido a la escasa profundidad de las aguas de avenida, incluso durante estadios de caudal punta. Por tanto, aunque los trabajos de limpieza han modificado la llanura aluvial, su restauración hacia condiciones naturales, (de vegetación y morfología), resulta crítica para promover una de las funciones más importantes de la misma como es la de ejercer de trampa de sedimentos, lo que puede evitar el transporte y dispersión de los lodos contaminados hacia las marismas de Doñana y el estuario del Guadalquivir. Esta restauración debería basarse en la regeneración de la vegetación

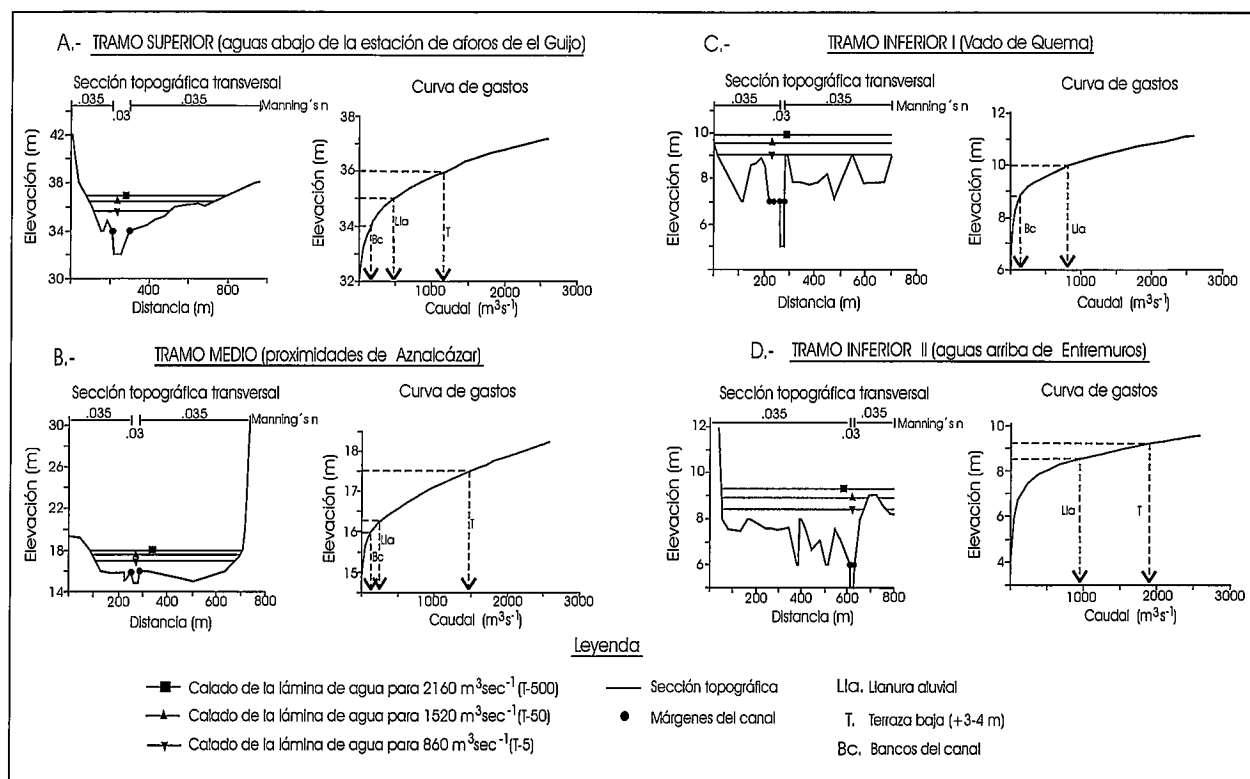
#### *Inundabilidad y cambios geomorfológicos potenciales*

Los trabajos de limpieza con maquinaria pesada y las nivelaciones realizadas pueden dar lugar a algunos efectos de carácter hidrológico. A corto plazo, el descenso de la rugosidad del cauce y la llanura de inundación debido a la falta de vegetación y la supresión de formas en el cauce, pueden aumentar la velocidad en avenida y por tanto el poder erosivo de las crecidas. A largo plazo, los restos de lodos piríticos que no han sido limpiados formarán parte del sistema geomórfico, siendo erosionados y transportados junto con los sedimentos naturales.

Un primer paso en el análisis predictivo del comportamiento hidrológico tanto de la dispersión de sedimentos como de los cambios del río requiere de un mapa de riesgos de inundabilidad. Se han elaborado esta cartografía en la que se han diferenciado tres zonas con riesgo de inundabilidad elevado, medio y bajo, como se indica a continuación.

#### *Criterios hidrológicos y geomorfológicos utilizados en la delimitación de las zonas inundables.*

La carencia de una topografía de detalle de la zona afectada por los vertidos durante las primeras fases de este



**Figura 3.-** Profundidades de calado de la lámina de agua para avenidas de periodo de retorno de 500 años (T-500 a,  $Q = 2.160 m^3s^{-1}$ ), 50 años (T-50 a,  $Q = 1.520 m^3s^{-1}$ ) y 5 años (T-5 a,  $Q = 860 m^3s^{-1}$ ), y curvas de gastos obtenidos del análisis hidrológico de las secciones topográficas transversales del tramo superior aguas debajo de la estación de aforos de "El Guijo" (A), del tramo medio en las proximidades de Aznalcázar (B) y del tramo inferior en el "Vado de Quema" (D) y antes de la entrada en Entremuros (C).

estudio ha determinado que las zonas inundables para diferentes periodos de retorno se hayan obtenido basándose en criterios geomorfológicos (Fig. 2b), apoyados mediante cálculos hidráulicos elementales. Las áreas inundadas para algunas de estas avenidas se han contrastado con las áreas inundadas observadas en imágenes de satélite (Landsat 5 TM) tomadas durante una avenida de caudal conocido. Los valores de caudal punta utilizados en este estudio de áreas inundables corresponden a los establecidos en el "Proyecto de Control y Permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir, al Brazo de la Torre y Entremuros" (Cuenca hidrográfica del Guadalquivir, 1998a). Para el cálculo hidráulico, se han elegido cuatro secciones del río Guadamar localizadas una en el tramo superior, aguas arriba de la estación de aforos de El Guijo, otra en el tramo medio, cerca de Aznalcázar, y dos en el tramo bajo, próximo al vado de Quema y justo aguas arriba de Entremuros respectivamente (Fig. 1). Los cálculos en estas secciones se han realizado aplicando régimen uniforme, con coeficientes de rugosidad de Manning de 0,030 para el cauce principal y de 0,035 para la llanura de inundación, obteniendo de esta forma las curvas de gasto y los calados resultantes para los periodos de retorno de 5 años (T-5:  $860 m^3 s^{-1}$ ), de 50 años (T-50:  $1.520 m^3 s^{-1}$ ), y de 500 años (T-500:  $2.160 m^3 s^{-1}$ ) (Fig. 3).

En el tramo superior del Guadamar, el cauce lleno tiene capacidad para desaguar caudales punta de hasta  $175 m^3 s^{-1}$  (Fig. 3a). La llanura queda cubierta total-

mente para un caudal de  $500 m^3 s^{-1}$ . Por tanto, ambos elementos morfológicos aparecen inundados para los caudales estimados como de periodo de retorno de 5 años. El siguiente escalón morfológico corresponde a la terraza baja que se inunda con caudales punta de  $1.175 m^3 s^{-1}$ . Por tanto este elemento morfológico aparece cubierto por los caudales estimados con periodo de retorno de 50 años.

En el tramo medio del Guadamar (Fig. 3b), el cauce lleno desagua  $140 m^3s^{-1}$ , a partir de lo cual se derrama el agua de avenida hacia la llanura de inundación, que queda totalmente cubierta con caudales punta del orden de  $200-250 m^3s^{-1}$  y periodos de retorno inferiores a los 5 años. El escalón morfológico correspondiente a la terraza baja se alcanza para caudales punta de  $1.450 m^3 s^{-1}$ , encontrándose por tanto inundada para periodos de retorno de 50 años.

En el tramo bajo del Guadamar, los cálculos se han realizado en dos secciones diferentes dando en ambos casos resultados similares (Figs. 3c y 3d). En el caso del cauce, el caudal de cauce lleno es de  $175 m^3s^{-1}$ , a partir del cual se desborda el agua de avenida hacia la llanura. Este caudal punta correspondería a periodos de retorno de entre 1 y 2 años. La inundación total tanto de la llanura como de los diques naturales, se produce para caudales punta comprendidos entre  $825$  y  $940 m^3s^{-1}$  y, por tanto, su inundación total se produce para caudales punta con periodos de retorno de 5 años. En este tramo

la terraza más baja se inunda con caudales de  $1.940 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , para periodos de retorno entre 50 y 500 años.

#### *Zonas de riesgo de inundación del río Guadamar.*

En este análisis de inundabilidad se pone de manifiesto la consistencia de los diferentes escalones geomorfológicos con los cálculos hidráulicos a lo largo del curso del Guadamar, otorgando fiabilidad a los mapas de inundabilidad realizados a partir de criterios geomorfológicos. En las cartografías se han distinguido las siguientes zonas (Fig. 2b):

*Zona de riesgo de inundación bajo.* La zona que presenta un riesgo de inundación bajo se caracteriza por periodos de recurrencia de 50 años (T-50), para caudales que superan los  $1.175\text{-}1.450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Este nivel de inundabilidad corresponde a la terraza más baja del Guadamar, que se sitúa 4-5 m por encima del cauce del río.

La avenida producida por el vertido de lodos sólo alcanzó esta zona en áreas donde la escasa anchura de la llanura aluvial del Agrío-Guadamar produce un aumento de la altura de la lámina de agua y reflujos, como sucede inmediatamente aguas abajo de la confluencia del Agrío y el Guadamar, o en zonas donde la terraza se encuentra degradada. Dado el bajo riesgo de inundabilidad, el principal peligro de movilización de los lodos residuales estaría producido por los procesos de arroyada durante periodos de precipitación, que aumentan su eficacia en aquellas zonas donde la limpieza de los lodos ha eliminado la protección que proporciona la cobertura vegetal.

*Zona de riesgo de inundación moderado.* La zona de riesgo moderado tiene unos periodos de recurrencia de 5 años (T-5), y corresponde a la llanura aluvial del sistema Agrío-Guadamar. Aunque es cierto que el cauce principal excede su capacidad a partir de caudales punta de  $175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  la inundación total de la llanura se produce con caudales superiores a  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Debido a la menor altura de la lámina de agua, la laminación de las avenidas y la alta rugosidad que proporciona la vegetación, las llanuras de inundación constituyen una trampa de sedimentos natural, por lo que los procesos dominantes en la llanura aluvial son procesos sedimentarios. A partir del estudio secuencial y comparativo de la geomorfología del tramo medio-bajo del río Guadamar, se han observado zonas donde se han producido repetidas veces procesos sedimentarios y que es presumible que vuelvan a actuar como zonas de acumulación en avenidas futuras.

Pese al dominio de los procesos sedimentarios en la llanura de inundación, también se producen importantes procesos erosivos capaces de movilizar los lodos residuales. Estos procesos erosivos pueden estar relacionados con la movilidad del cauce a través de la llanura como la migración lateral (*cut off* y *chutes*), que aunque no se han observado en la dinámica natural du-

rante la secuencia de años observados, podrían producirse inducidos por las modificaciones antrópicas durante periodos de avenida. Los procesos erosivos pueden verse aumentados por la disminución de la rugosidad, debido a la eliminación de las formas naturales y de la vegetación, que producirá un aumento de la velocidad del flujo durante avenidas.

*Zona de riesgo de inundación alto.* La zona de riesgo de inundación alto, donde la movilización de los lodos residuales es más elevada, corresponde al cauce principal del río Agrío-Guadamar, así como a algunos canales de alta de elevada funcionalidad. A esta zona le corresponde un periodo de recurrencia de 1,5 años (T-1,5) para unos caudales a cauce lleno de  $140\text{-}175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Así como la llanura de inundación constituya una trampa natural de sedimentos, el cauce fluvial se caracteriza por una constante movilización de los sedimentos que hace variar su morfología y geometría continuamente. La variación de la dirección del cauce fluvial del río Guadamar durante la secuencia de años estudiada ha sido baja o muy baja, aunque como ya se ha indicado en el apartado anterior avenidas fuertes junto con las modificaciones inducidas por las actividades humanas podrían variar esta dinámica. Por otra parte, las variaciones dentro del cauce son continuas y afectan principalmente a las morfologías del lecho (*pool* y *riffles*) y de los taludes del cauce. Los cambios potenciales más importantes se centran en el tramo superior estudiado, donde la migración de los canales múltiples genera un proceso continuo de construcción y destrucción de las barras fluviales que produce una gran variabilidad en las formas dentro de cauce.

#### *Evaluación de la dispersión de lodos residuales por transporte fluvial.*

*Propiedades sedimentológicas de las partículas de lodos piríticos.* Aplicando el método de la dispersión de rayos láser al estudio de la granulometría de los lodos piríticos, se ha obtenido que el diámetro medio varía entre las 6 y 13  $\mu\text{m}$ , situándose el 90% de las partículas por debajo de 60  $\mu\text{m}$  de diámetro. La elevada densidad de las partículas de pirita produce que su velocidad de decantación sea mayor que en los sedimentos naturales con estos mismos tamaños. Utilizando la ley de Stokes, que resulta adecuada para este rango de tamaños de partículas, la comparación con el comportamiento de los sedimentos naturales puede realizarse mediante el cálculo de la relación de diámetros equivalentes para la misma velocidad de caída:

$$\frac{d_p}{d_q} = \sqrt{\frac{\delta_q - \delta_w}{\delta_p - \delta_w}}$$

donde  $d_p$  y  $d_q$  son los diámetros de partículas de pirita y cuarzo y  $\delta_p$ ,  $\delta_q$  y  $\delta_w$  las densidades de pirita, cuarzo y agua respectivamente. Los resultados muestran que los diámetros de las partículas de pirita deben multi-



Contenido en agua (%)	Tensión de arrastre crítica (Nm <sup>-2</sup> )	Profundidad del flujo erosivo (m)	
		Pendiente = 0,0015	Pendiente = 0,0006
25,6	8,2	0,55	1,39
34,6	12	0,82	2,05
37,6	4,2	0,28	0,7

**Tabla I.-** Tensión tangencial de arrastre crítica para la erosión de los lodos, según la profundidad del flujo erosivo obtenida para diferentes contenidos en agua de una muestra de lodos piríticos recogida en las proximidades del Vado de don Simón (Gallart *et al.*, 1999). El flujo erosivo ha sido obtenido para dos valores característicos del valle del río Guadiamar.

plicarse por un factor de 1,75 para poderse comparar con los granos de cuarzo, y demuestran que, incluso después de esta corrección de la densidad, los lodos piríticos pertenecen a tamaños de grano de la clase limos.

A partir del trabajo de Hjulström (1935) se sabe que los sedimentos de tamaño limo resultan mucho más fácilmente transportables que erosionables o puestos en movimiento debido a su comportamiento cohesivo, siendo las velocidades típicas del flujo para la erosión de limos de dos órdenes de magnitud mayores que los que requeriría para su depósito. En sistemas fluviales, los limos son transportables en suspensión y se depositan generalmente sobre las llanuras de inundación, donde el movimiento del agua es suficientemente lento como para permitir la decantación de pequeñas partículas.

Las condiciones para la erosión de los sedimentos mediante el flujo de agua se obtiene normalmente mediante el cálculo de la tensión tangencial de arrastre en el contacto entre la masa que fluye y el lecho (Lane, 1955)

$$\tau = \gamma D S$$

donde  $\tau$  es la tensión de arrastre,  $\gamma$  es el peso específico de la masa que fluye,  $D$  es la profundidad del flujo y  $S$  es la pendiente.

La tensión tangencial de arrastre crítica  $\tau_c$  para la erosión de los lodos piríticos se ha estimado aplicando un factor de 0,0001 a la fuerza de corte de las muestras medidas con un instrumento de ensayo de cizalla (Torri *et al.*, 1987). Los resultados obtenidos para diferentes condiciones de contenido de lodo en el agua, junto con el umbral de profundidad de flujo necesario para iniciarse la erosión en dos pendientes del valle del río (Tabla 1) confirman el elevado riesgo de erosión para las partículas de lodo remanentes en los lechos y márgenes del río Guadiamar, debido a que la profundidad de flujo capaz de producir erosión se supera durante muchos días al año. Los riesgos de erosión para los lodos piríticos en la llanura de inundación serían mucho menores, aunque la erosión de los lodos piríticos residuales depende de la erosión de los materiales donde se albergan.

*Hidráulica y transporte de partículas de lodo a lo largo del río Guadiamar.* Debido a la falta de una topografía de detalle que permita la modelación hidráulica continuada a lo largo del Guadiamar, se han establecido unas zonas de control representativas de los distintos tramos del río Guadiamar, donde se analizará la capacidad de transporte del lodo residual por parte de río y para avenidas de diferentes periodos de retorno. Estas

zonas de control corresponden a los tramos descritos en el apartado de inundabilidad. En estas secciones se ha utilizado la fórmula de Manning. En la parte baja del Guadiamar, y concretamente en las zonas donde se han realizado estructuras de encauzamiento del río, la componente dominante bidimensional del flujo ha requerido la aplicación de modelos bidimensionales del movimiento del agua, resueltos por la técnica numérica de volúmenes finitos.

*Tramo superior del Guadiamar.* Las estimaciones hidráulicas (Tabla II) en el tramo alto del Guadiamar para los periodos de retorno considerados (T5, T50 y T500), reflejan calados importantes en la zona del cauce que varían entre los 3,6 y 4,9 m. El caudal se concentra en un 70% en la zona del cauce principal donde se alcanzan velocidades de entre 2,2 y 2,8 m s<sup>-1</sup>, y en un 30% en las llanuras de inundación con velocidades entre 0,8 y 1,4 m s<sup>-1</sup>. La tensión tangencial de arrastre generada por estos calados de avenida varía entre 31,2 y 45,2 Nm<sup>-2</sup> para el cauce principal y entre 9,7 y 19,9 Nm<sup>-2</sup> para la llanura, en todos los casos suficientes para transportar las partículas de lodo residual. Solamente en las zonas de la llanura aluvial con calados inferiores a 0,5 m donde las velocidades pueden ser inferiores a los 10 cm s<sup>-1</sup>, se podrían generar procesos de sedimentación del lodo. En todos los casos, estas zonas se localizan próximas a los límites de las zonas cubiertas por la lámina de avenida.

*Tramo medio del Guadiamar.* Los calados de las avenidas utilizadas en las estimaciones varían entre 2,2 y 3,2 m para la zona del canal (Tabla II). En el cauce principal se concentra hasta un 10 % del caudal con velocidades que oscilan entre 1,7 y 2,2 m s<sup>-1</sup>, mientras que en la llanura aluvial acarrea hasta un 90 % del caudal con velocidades de entre 1 y 1,6 m s<sup>-1</sup>. La tensión de arrastre presenta valores inferiores al tramo anterior, entre 20,3 y 31,5 Nm<sup>-2</sup> para el canal y de 11,4 y 23,5 Nm<sup>-2</sup> para la llanura, siendo igualmente suficientes para transportar las partículas de lodo tanto en la zona de canal como en la llanura.

*Tramo inferior del Guadiamar.* En este tramo se han estudiado dos secciones, con resultados en las estimaciones hidráulicas similares (Tabla II). En este tramo los calados de avenida para el cauce principal varían entre 4,4 y 4,9 m. Los caudales en el cauce principal alcanzan un 10% del total, con velocidades de 2,5-2,9 m s<sup>-1</sup>, mientras que en la llanura representan un 90%, con velocidades de entre 0,9 y 1,4 m s<sup>-1</sup>. Igualmente, la tensión de arrastre para el canal varía entre 35,8 y 45,8 Nm<sup>-2</sup>, y para la llanura entre 10,4 y 20,5 Nm<sup>-2</sup>, lo que capacita al flujo para transportar las partículas de lodo contaminado hacia tramos situados aguas abajo.

*Modelización bidimensional de un tramo del río Guadiamar aguas arriba del Puente de Don Simón.* Se ha realizado una modelación bidimensional del flujo de agua en un tramo del río Guadiamar justo aguas arriba

del Puente de don Simón. Para ello se ha utilizado un programa de desarrollo propio, basado en la resolución de las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant, que permiten obtener distribuciones espaciales de la profundidad y de las dos componentes de la velocidad en el plano horizontal, velocidad que es promediada en la profundidad. Las ecuaciones utilizadas, por ser bidimensionales, no permiten obtener información sobre la componente de la velocidad en la dirección vertical.

Para este cálculo se ha utilizado una topografía simplificada obtenida a partir de un plano topográfico a escala 1:10.000, por no disponer de información más detallada en el momento del estudio, y se ha supuesto en toda la zona un fondo plano horizontal. En la modelización no se ha incluido el vado formado por el Puente de Don Simón por falta de información geométrica del mismo.

La modelización se ha realizado en régimen permanente para unos caudales de  $1.065 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que parece corresponder a un periodo de retorno de 10 años (Cuenca hidrográfica del Guadalquivir, 1998b) y de  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Para la condición de contorno se ha utilizado una curva de gastos obtenida con la geometría y pendiente del tramo inmediatamente aguas abajo y utilizando régimen uniforme. El coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,030 en todo el área de estudio.

En la Figura 2a se representan las zonas donde la velocidad es inferior a  $0,1 \text{ ms}^{-1}$  para caudales de  $1.065$  y  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en las cuales se estima que habrá sedimentación según el diagrama de Hjulström. Este análisis pone de manifiesto que las zonas naturales susceptibles de sedimentar y almacenar los restos de lodos transportados por las avenidas son muy reducidas en este tramo bajo del valle del Guadiamar, y que con las condiciones existentes en la actualidad los lodos pueden ser arrastrados por el río Guadiamar hasta las marismas del Parque Nacional de Doñana. Los resultados presentados se deben considerar como una primera aproximación al problema, con unos datos de geometría, rugosidades y condiciones de contorno simplificados.

## Conclusiones

La limpieza de los lodos mineros residuales tras el accidente de la balsa minera de Aznalcóllar cumplió en gran medida los objetivos pretendidos, retirándose la casi totalidad de los lodos contaminantes. Sin embargo, el riesgo de contaminación de áreas de importante valor ecológico, como son las Marismas del Guadalquivir y el Parque Nacional de Doñana, sigue abierto, ya que existen amplias áreas donde los restos de lodos, bien como contaminantes en los suelos o bien formando una fina película superficial, continúan representando una seria amenaza medioambiental, sobre todo en el tramo superior afectado del río Guadiamar, y por que la movilización de miles de toneladas métricas de lodos ha llevado asociada la retirada de la capa superior de sedimentos y la eliminación de la vegetación, que ha generado un gran cambio en la configuración natural original dejando totalmente desprotegidos los cauces y

las llanuras aluviales de los ríos Agrío y Guadiamar frente a procesos erosivos futuros.

En este trabajo sugerimos que, analizadas las características texturales de los lodos y la capacidad de transporte fluvial del río durante las avenidas, las partículas contaminantes residuales podrían ser transportadas durante las avenidas hasta las Marismas del Parque Nacional de Doñana.

La llanura de inundación constituye una trampa natural de sedimentos, donde sería esperable la mayor acumulación de lodos piriticos removilizables durante periodos de avenida. Por ello la restauración de la llanura de inundación debería tender a restablecer las condiciones naturales del coeficiente rugosidad, controlado principalmente por la morfología y la vegetación, ambas modificadas considerablemente durante los trabajos de limpieza.

Un factor muy importante a tener en cuenta en las labores de restauración de las llanuras aluviales es la vegetación. Una vegetación densa aumenta el coeficiente de rugosidad y disminuye la capacidad erosiva del flujo, a la vez que favorece la sedimentación debido al efecto filtro que causa. La tensión tangencial permisible, que no causaría serios problemas erosivos en el cauce, alcanza los  $150 \text{ Nm}^{-2}$  en condiciones de vegetación densa, mientras que en áreas pobres en vegetación esta tensión se reduce a un tercio. Por tanto la mayor parte de las zonas estudiadas podrían ser eficazmente protegidas restaurando la cobertura vegetal, que actualmente no existe. Con vista a favorecer la sedimentación, un tapiz denso de césped puede facilitar los procesos de deposición en ciertas zonas, a pesar de las altas velocidades que se alcanzan en los tramos estudiados. En este sentido, hasta el momento se ha replantado una franja de césped de 30 m de anchura a lo largo del curso del río Guadiamar, además de 170.000 arbustos y árboles de especies de crecimiento rápido.

De forma similar, se puede predecir que la primera avenida después del accidente causará una erosión importante y la posterior sedimentación a lo largo del lecho y las márgenes del río, que pueden producir cambios considerables en la morfología del cauce. A fin de retirar los sedimentos naturales mezclados con las partículas contaminantes y minimizar el riesgo de su entrada en los espacios naturales protegidos, resulta muy apropiada la construcción de trampas de sedimentos a lo largo del río Guadiamar, para lo cual se deben tener en cuenta las áreas naturales donde dominan los procesos de sedimentación, definidas en la cartografía geomorfológica. Las áreas de sedimentación serían barras de canal y barras de meandro (*point bar*), así como en aquellas zonas caracterizadas por un flujo muy lento, como son las depresiones del cauce (*pool*) y la llanura de inundación, donde predominan las formas de lóbulos de derrame (*crevasse splay*). Estas trampas de sedimentos necesitarían ser limpiadas después de cada episodio de avenida.

De esta forma, con vistas a proteger las áreas de alto valor ecológico y medioambiental que se sitúan aguas abajo del río Guadiamar, se propone que unido a las medidas

SECCIÓN DEL TRAMO SUPERIOR DEL RÍO GUADIAMAR (aguas arriba de la estación de aforos de "El Guijo")																		
Periodo de retorno de 500 años	Altura lámina (m)	Q total (m <sup>3</sup> /s)	Profundidad máxima del canal (m)	Flujo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		Velocidad (ms <sup>-1</sup> )		Calado (m)		Tensión de arrastre (Nm <sup>-2</sup> )		Potencia hidráulica (Nm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		M.I.				
				M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.		Canal	M.I.	M.D.	Canal
	36,91	2.160	4,91	367,73	1.067,59	725,04	1,43	2,88	1,12	1,89	4,30	1,31	18,98	45,21	13,84	28,65	130,40	15,55
	36,43	1.520	4,43	252,08	873,46	394,45	1,29	2,65	0,93	1,63	3,83	0,99	17,01	39,80	10,34	21,95	105,62	9,58
	35,61	860	3,61	106,80	584,65	168,55	1,00	2,26	0,89	1,10	3,01	0,93	11,52	31,26	9,74	11,47	70,65	8,68
SECCIÓN DEL TRAMO MEDIO DEL RÍO GUADIAMAR (proximidades de Aznalcázar)																		
Periodo de retorno de 500 años	Altura lámina (m)	Q total (m <sup>3</sup> /s)	Profundidad máxima del canal (m)	Flujo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		Velocidad (ms <sup>-1</sup> )		Calado (m)		Tensión de arrastre (Nm <sup>-2</sup> )		Potencia hidráulica (Nm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		M.I.				
				M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.		Canal	M.I.	M.D.	Canal
	17,98	2.160	3,18	465,53	220,90	1.473,57	1,44	2,27	1,60	1,88	2,97	2,20	20,12	31,56	23,50	28,93	71,49	37,49
	17,55	1.520	2,74	315,39	168,53	1036,08	1,26	2,03	1,40	1,55	2,54	1,82	16,40	26,63	19,18	20,62	53,95	26,76
	16,99	860	2,19	163,48	110,36	586,16	0,99	1,70	1,13	1,11	1,98	1,34	11,48	20,39	13,88	11,42	34,69	15,66
SECCIÓN DEL TRAMO INFERIOR DEL RÍO GUADIAMAR I (vado de Quema)																		
Periodo de retorno de 500 años	Altura lámina (m)	Q total (m <sup>3</sup> /s)	Profundidad máxima del canal (m)	Flujo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		Velocidad (ms <sup>-1</sup> )		Calado (m)		Tensión de arrastre (Nm <sup>-2</sup> )		Potencia hidráulica (Nm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		M.I.				
				M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.		Canal	M.I.	M.D.	Canal
	10,93	2.160	4,93	746,55	253,27	1.160,18	1,46	2,91	1,45	1,94	4,73	1,91	20,54	45,84	20,24	29,99	133,28	29,24
	10,54	1.520	4,54	512,80	218,16	789,04	1,26	2,73	1,23	1,56	4,34	1,52	16,34	41,57	15,94	20,51	113,47	19,68
	10,04	860	4,04	281,23	175,83	402,94	1,00	2,48	0,94	1,13	3,85	1,02	11,54	35,87	10,47	11,55	89,14	9,80
SECCIÓN DEL TRAMO INFERIOR DEL RÍO GUADIAMAR II (aguas arriba de Entremuros)																		
Periodo de retorno de 500 años	Altura lámina (m)	Q total (m <sup>3</sup> /s)	Profundidad máxima del canal (m)	Flujo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		Velocidad (ms <sup>-1</sup> )		Calado (m)		Tensión de arrastre (Nm <sup>-2</sup> )		Potencia hidráulica (Nm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		M.I.				
				M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.	Canal	M.I.	M.D.		Canal	M.I.	M.D.	Canal
	9,31	2.160	5,31	1.675,84	271,98	212,18	1,49	3,04	0,91	2,01	4,99	0,96	21,05	48,88	10,07	31,28	148,62	9,15
	8,93	1.520	4,93	1.169,20	236,50	114,30	1,28	2,87	0,79	1,62	4,60	0,73	16,86	44,61	7,60	21,64	127,86	6,00
	8,43	860	4,43	628,25	192,41	39,34	0,99	2,61	0,66	1,13	4,10	0,41	11,37	38,54	4,14	11,30	100,73	2,74

Tabla II.- Resultados de los cálculos hidrológicos en las secciones topográficas transversales para caudales de 860 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (periodo de retorno de 5 años T-5 a), 1.520 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (periodo de retorno de 50 años, T-50 a) y 2.160 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (periodo de retorno de 500 a, T-500). M.D., margen derecha, M.I., margen izquierda.

de control frente a la erosión se mejoren las áreas de sedimentación natural de los lodos piríticos residuales. La restauración de los valles Agrío y Guadamar es un requisito urgente así como una preocupación a corto y largo plazo que debe abordarse desde un enfoque multidisciplinar que incluya métodos hidrológicos y geomorfológicos. De hecho, el recurso del agua y la regeneración medioambiental recogidas en los proyectos "Doñana 2005" y "El Cinturón Verde del Guadamar" establecidos por las autoridades regionales y nacionales es un punto de partida positivo para la recuperación y mantenimiento de estas áreas próximas al Parque Natural de Doñana.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Los autores agradecen a J. Baraza, D. Casas y F. Plana (CSIC) su ayuda en los análisis de laboratorio, y el apoyo recibido por la Estación Biológica de Doñana (CSIC) durante los trabajos de campo. Así mismo, agradecemos la información proporcionada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el CEDEX (información hidrológica), por el Instituto Tecnológico y GeoMinero de España (cartografía de la cubicación de lodos y la información inédita de los residuos de lodos después de la limpieza), y por Instituto de Cartografía de Andalucía (Junta de Andalucía) que proporcionó cartografía topográfica digital y fotografías aéreas.

### Referencias

- Cabrera, F., Clemente, L., Díaz-Barrientos, F., López, R. y Murillo J.M. (1999): Heavy metal pollution of soils affected by the Guadamar toxic flood. *Science of the Total Environment*, 242: 117-129.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (1998a): *Proyecto de Control y permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir*.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (1998b): *Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadalquivir*.
- Coullaut Sáenz de Sicilia, J.L., Soler Sampere, M., Portero García, J.M., Aguilar Tomás, M. y Ramírez del Pozo, J. (1978): *Mapa geológico de España, hoja nº 961, (Aznalcóllar)*. IGME, Madrid.
- Gallart, F., Benito, G., Martín-Vide, J.P., Benito, A., Prió, J.M. y Regües, D. (1999): Fluvial geomorphology and hydrology in the dispersal and fate of pyrite mud particles released by Aznalcóllar mine tailings spill. *Science of the Total Environment*, 242: 13-26.
- Grimalt, J.O., Ferrer, M. y Macpherson, E. (1999): The mine tailings accident in Aznalcóllar. *Science of the Total Environment*, 242: 3-11.
- Hjulström, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Geologic Institute Univertisy Upsala Bulletin*; 25: 221-527
- ITGE (1998): *Cartografía y cubicación de lodos mineros en la cuenca del río Guadamar. Aznalcóllar-Entremuros*. Ministerio de Medio Ambiente. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Lane, E.W. (1955): Design of stable channels. *American Society Civil Engineers*, 120: 1234-1260.
- Lewin, J. y Macklin, M.G. (1987): Metal mining and floodplain sedimentation in Britain. En: *International Geomorphology* (V. Gardiner Ed.), Wiley, Chichester, 1009-1027.
- Leyva Cabello, F. y Pastor González, F. (1976a): *Mapa geológico de España, hoja nº 1018, (El Rocío)*. IGME, Madrid.
- Leyva Cabello, F. y Ramírez Copeiro del Villar, J. (1976b): *Mapa geológico de España, hoja nº 983, (Sanlúcar la Mayor)*. IGME, Madrid.
- Miller, J.R. (1997): The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 101-118.
- Muelas Peña, A. y Crespo Zamorano, A. (1976): *Mapa geológico de España, hoja nº 962, (Alcalá del Río)*. IGME, Madrid.
- Schumm, S.A. (1969): River Metamorphosis. *Journal Hydraulic Division American Society Civil Engineers*; 95(HY1), Paper 6352: 255-273.
- Simón, M., Ortiz, I., García, I., Fernández, E., Fernández, J., Dorronsoro, C. y Aguilar, J. (1999): Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznalcóllar, Spain). *The Science of the Total Environment*, 242: 105-117.
- Torres Perez-Hidalgo, T. (1975): *Mapa geológico de España, hoja nº 1001, (Almonte)*. IGME, Madrid.
- Torri, D., Sfalanga, M. y Chisci, G. (1987): Threshold conditions for incipient rilling. *Catena*, 8: 97-105.
- Van Geen, A., Takesue, R. y Chase, Z. (1999): Acid mine tailings in southern Spain. *Science of the Total Environment*, 242: 221-229.

*Manuscrito recibido el 26 de septiembre de 2000  
Aceptado el manuscrito revisado el 20 de febrero de 2001*