MONOGRAFÍAS
DE LA REAL ACADEMIA
SEVILLANA DE CIENCIAS

Volumen 3

Geotecnia y Medio Ambiente

Editor
JOSÉ LUIS DE JUSTO ALPAÑÉS

2012

MONOGRAFÍAS
DE LA REAL ACADEMIA
SEVILLANA DE CIENCIAS

Volumen 3

Geotecnia y Medio Ambiente

Editor:
José Luis de Justo Alpañés

2012

© Real Academia Sevillana de Ciencias

© José Luis de Justo Alpañés

EDITA:
Real Academia Sevillana de Ciencias

IMPRIME:
Utrerana de Ediciones, S.L. - Utrera (Sevilla)

DEPÓSITO LEGAL:
SE-3571-2012

I.S.B.N.:
978-84-695-3328-4

ÍNDICE

Prólogo
José Luis de Justo Alpañés ..... 7 – 8

Capítulo 1
Aprovechamiento de residuos
Fernando Pardo de Santayana ..... 9 – 53

Capítulo 2
Investigación de la rotura del depósito de estériles. Minas de Aznalcóllar (Sevilla)
Rafael Portilla Hermosilla ..... 55 – 90

Capítulo 3
Contaminación y descontaminación Aznalcóllar
J. Aguilar ..... 91 – 122

Capítulo 4
Criterios técnicos para la integración y restauración ambiental de espacios afectados por actividades mineras
Miguel Villalobos Megía ..... 123 – 156

Capítulo 5
El impacto ambiental en la restauración de monumentos. El proyecto de restauración del tajo de San Pedro de La Alhambra de Granada
José Luis de Justo Alpañés, Percy Durand Neyra, Narciso Vázquez Carretero, Manuel Vázquez Boza y J. M. Azañón ..... 157 – 178

Capítulo 6
Aspectos medioambientales y geotécnicos de la balsa de D. Melendo en Lebrija. Utilización de geotextiles en geotecnia medioambiental
José Luis de Justo Alpañés, Juan Saura Martínez, Juan Carlos de Cea Azañedo, Percy Durand, José Manuel Marcos, Elisa Silva, Manuel Vázquez Boza ..... 179 – 192

PRÓLOGO

Recientemente se han producido, en Europa, diversas roturas de presas de residuos de mineral [Stava, Italia, 1985; Los Frailes (Aznalcóllar), España, 1998; Baia Mare, Rumanía, 1999; Ajkai Timfoldgyar, Hungía, 2010] que han supuesto vertidos de hasta 5 millones de m^3 de lodos contaminados a los ríos de la región. En algunos casos estos vertidos han provocado la destrucción de pueblos enteros.

Diversos autores han elaborado un corpus de 147 casos de desastres provocados por presas de residuos de mineral en todo el mundo, de los cuales 26 se encuentran en Europa. Muchas de estas roturas se han traducido en un daño masivo, un impacto económico grave y, en bastantes casos, la pérdida de vidas. Todo esto ha puesto de relieve la importancia que tienen la Geotecnia, la contaminación y la descontaminación de suelos y de aguas en los problemas medioambientales.

Los temas de regeneración y restauración de áreas mineras y de canteras están de rabiosa actualidad.

Casi todas las obras públicas tienen un elevado impacto medioambiental, que hay que minimizar, lo cual nos puede obligar a escoger soluciones conservacionistas, no necesariamente más caras. Por otro lado, el aprovechamiento de residuos en obras públicas produce un indudable beneficio al medio ambiente. El impacto ambiental toma su máximo relieve en la rehabilitación de monumentos, por ejemplo en el Proyecto de Restauración del Tajo de San Pedro de la Alhambra de Granada, donde se ha conseguido minimizar el impacto ambiental.

Con este motivo, la Real Academia Sevillana de Ciencias organizó, con la colaboración de la Universidad de Sevilla, unas Jornadas sobre Geotecnia y Medio Ambiente en las que se tocaron varios de estos temas. Estas Jornadas, puestas al día, han servido de base para esta monografía. Dos de los capítulos, "*El proyecto ambiental en la restauración de monumentos; el proyecto de restauración del Tajo de San Pedro de la Alhambra de Granada*" y "*Aspectos medioambientales y geotécnicos de la balsa de D. Melendo en*

Lebrija; utilización de geotextiles en geotecnia medioambiental" corresponden al Programa del Master sobre Peritación y Reparación de Edificios, que es uno de los que dan acceso al título de Doctor Arquitecto.

Recientemente se está estudiando la clausura de la Presa de residuos de mineral de Almagrera gracias al Proyecto de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación BIA2010-20377. Los capítulos de esta monografía han sido una ayuda inestimable para el proyecto citado.

Las ponencias tratan sobre el aprovechamiento de residuos en obras de Ingeniería Civil, la rotura del depósito de estériles de Aznalcóllar, la contaminación y descontaminación realizadas como consecuencia de la rotura de esta presa, la regeneración y restauración de canteras, el proyecto de restauración del Tajo de San Pedro de la Alhambra de Granada y la construcción y adaptación al medio ambiente de la balsa de D. Melendo en Lebrija. Los ponentes son todos expertos en temas de Geotecnia y Medio Ambiente, que, además, han tenido una intervención directa en los problemas tratados.

Sevilla, junio de 2012

José Luis de Justo Alpañés
Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias

CAPÍTULO 1
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

Fernando Pardo de Santayana

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, fpardo@lnec.pt

1. INTRODUCCIÓN

La problemática de la utilización de residuos en obras geotécnicas, en general, y en rellenos compactados, en particular, se incluye en otra más general relativa a la utilización de materiales no convencionales en este tipo de aplicaciones. Según una definición formulada en el Congreso de Sidney de la AIPCR (Asociación Mundial de la Carretera), se podría entender por material marginal, no convencional, o no tradicional, "todo aquel material que no cumpliendo completamente las especificaciones en vigor en un país o región para los materiales de construcción de carreteras, puede, no obstante, ser empleado satisfactoriamente, ora en condiciones especiales, debidas a características climáticas o a progresos recientes en las técnicas constructivas de carreteras, ora tras haber sido sometido a un tratamiento particular".

Existen diversas propuestas de enumeración o clasificación de los materiales no convencionales y residuos de posible utilización en obras geotécnicas (Tabla 1). Obviamente, ninguna puede pretender ser completa o definitiva, ya que el concepto de "no convencional", e incluso de "residuo", es relativo, estando relacionado con un lugar y un tiempo determinados, observándose una constante evolución en la práctica de la valorización de estos materiales en obras geotécnicas. Materiales que antiguamente no se usaban, se emplean ahora con toda naturalidad, y están incluidos en las normas en vigor. Del mismo modo, algunos materiales cuya utilización no se suele recomendar o están generalmente proscritos, se emplean, sin embargo, desde hace tiempo y sin problemas de importancia en ciertos sitios donde son abundantes o donde no hay otra alternativa mejor.

En una primera clasificación de los materiales no convencionales para la construcción de terraplenes cabría distinguir tres grupos: 1º) materiales naturales no convencionales; 2º) materiales fabricados expresamente para su utilización como relleno; y 3º) residuos y subproductos industriales. Los primeros serían aquellos suelos y rocas que no cumplen las especificaciones normales. Del segundo grupo sería un ejemplo el poliestireno expandido. El tercer grupo, del cual se trata en esta comunicación, se podría dividir a su vez en tres: los residuos obtenidos durante los ciclos de extracción de materias primas; los residuos o subproductos industriales, obtenidos durante la producción de otros materiales, y los residuos obtenidos al final de un ciclo de consumo.

En general, la utilización de materiales naturales no convencionales ha estado tradicionalmente motivada por el hecho de que en muchas zonas, debido a peculiares condiciones geológicas y climáticas, son los materiales más abundantes, y prácticamente no se encuentra otra cosa. Es, por ejemplo, el caso de los suelos yesíferos, los suelos expansivos, etc. En relación a los residuos, no obstante, en algunos casos, las propiedades de estos materiales superan en algún aspecto las de muchos suelos convencionales, y su empleo es preferible. Por ejemplo, es lo que sucede con algunos materiales de baja densidad, cuando lo que interesa es construir un terraplén de poco peso.

Tabla 1. Ejemplos de materiales no convencionales y residuos de posible utilización en terraplenes de carreteras (Pardo de Santayana, 1997).

A)	**MATERIALES NATURALES NO CONVENCIONALES** — SALINOS: yeso, sal común, anhidrita — EXPANSIVOS — COLAPSABLES — ROCAS DEGRADABLES: • Rocas porosas: cretas, tobas • Rocas arcillosas degradables: pizarras arcillosas, margas, argilitas — MATERIALES VOLCÁNICOS: escorias; lapili, arenas volcánicas, cenizas — SUELOS RESIDUALES TROPICALES: suelos lateríticos — PERMAFROST
B)	**RESIDUOS DE EXPLOTACIÓN MINERA Y DE CANTERAS** — ESCOMBROS DE CANTERAS: pizarras, granitos, mármoles — ESTERILES DEL CARBON — ESTERILES DE OTROS MINERALES: Cobre, mercurio, etc.
C)	**SUBPRODUTOS INDUSTRIALES** — SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA: • Escorias de horno alto • Escorias de acería • Otras escorias: cobre, mercurio, plomo — SUBPRODUCTOS DE CENTRALES TÉRMICAS: • Cenizas volantes • Cenizas de hogar y escorias — OTROS SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES
D)	**RESIDUOS URBANOS E INDUSTRIALES** — ESCORIAS DE INCINERACIÓN DE RSU — RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN/DEMOLICIÓN — NEUMÁTICOS FUERA DE USO — RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE LA MADERA — RESIDUOS DE LA FUNDICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS
E)	**MATERIALES FABRICADOS** — MATERIALES POLIMÉRICOS — HORMIGONES LIGEROS — ARCIOLLA EXPANDIDA

De entre los distintos tipos de aplicaciones geotécnicas, la utilización de residuos en terraplenes u otros elementos de las infraestructuras viarias tiene la ventaja de que permite absorber grandes cantidades de material, reduciendo sensiblemente los volúmenes de las escombreras. Para determinados tipos de residuos, su empleo como material de terraplén es posible técnicamente, y, debidamente utilizados, son capaces de ejercer su función como elemento constructivo durante toda la vida de la obra sin efectos nocivos para el medio ambiente. Además de a la adecuación técnica y ambiental, es necesario prestar atención al principio de aprovechamiento óptimo de un residuo, buscado la mejor utilización para cada uno, pudiendo hablarse de una jerarquía en la valorización de los residuos, como también la hay en la utilización de los materiales naturales.

Muchos de los residuos utilizables se hallan disponibles en grandes cantidades, y el hecho de que se empleen, o no, depende generalmente de factores económicos. La utilización del residuo en substitución de otro material más convencional debe ser ventajosa económicamente para las partes involucradas en la construcción de la obra geotécnica. Deben tenerse en cuenta los diversos costes: coste del material en origen (en general barato), coste de extracción, coste de un posible tratamiento o técnica constructiva especial para su utilización, y coste del transporte, que suele ser decisivo. También la puesta en obra de estos materiales puede requerir unas medidas de control más cuidadas y, por tanto, más caras; y puede ser preciso prever medidas de control de la polución. Estos costes tienen que compararse con las alternativas a base de materiales convencionales. Sin embargo, también deberían tenerse en cuenta, aunque sean a veces difíciles de cuantificar, los beneficios a terceros que el empleo de residuos ocasiona: disposición de terrenos, eliminación de potenciales fuentes de polución de las aguas o del aire, mejora del paisaje de la región, ahorro de recursos naturales, etc.

2. RESIDUOS UTILIZABLES EN OBRAS GEOTÉCNICAS

De la amplia variedad de residuos existentes, sólo algunos reúnen, en la práctica, las condiciones necesarias en lo que se refiere a: características del material, disponibilidad en la proximidad de las obras, existencia de volúmenes suficientes, etc., para ser utilizados en obras geotécnicas. Los residuos de posible utilización varían con los países, y con las regiones de un mismo país (Tabla 2).

La Lista Europea de Residuos, en conformidad con la Decisión n.º 2000/532/CE, de la Comisión, de 3 de mayo, alterada por las Decisiones n.os 2001/118/CE, de la Comisión, de 16 de enero, 2001/119/CE, de la Comisión, de 22 de enero, y 2001/573/CE, del Consejo, de 23 de julio, fue incorporada al ordenamiento jurídico español mediante la Orden 304 de 2002 del Ministerio de Medio Ambiente. La Lista se organiza en veinte capítulos. Cada uno de los numerosos residuos recogidos en la lista viene definido por un código de seis dígitos, de los cuales los dos primeros corresponden al capítulo, los dos siguientes al subcapítulo, y los dos últimos al residuo. Entre los capítulos que incluyen residuos de posible valorización en obras geotécnicas e infraestructuras de carreteras se podrían mencionar los siguientes: Capítulo 01, "Residuos de la prospección,

Tabla 2. Principales subproductos industriales y residuos en Gran Bretaña (BS 6543:1985).

Material	Producción (Mt/año)	Existencias en escombreras (Mt)	Cantidades aprovechadas (Mt/año)	Distribución geográfica
Estériles del carbón	60	3000	5-10	Varias regiones de Inglaterra, Escocia y Gales
Residuos de pizarras bituminosas	—	200	menos de 5	Región de Loth (Escocia)
Cenizas volantes	10	algunas	4	Nacional
Cenizas de hogar	5	algunas	2	Nacional
Escombros de canteras:	grande, pero sin cuantificar	—	—	Nacional
residuos del caolín	22	150 de arena gruesa, 150 de otros subproductos	menos de 5	Cornualles y Devon
residuos de pizarras	1	300	poco relevantes	Varias regiones
"hassock"	sin cuantificar	—	—	Kent
Residuos de incineración	2	algunas	poco relevantes	Nacional
Escoria de horno alto	3	algunas escombreras viejas	3-5	Norte, Yorkshire, Humberside, Gales y Escocia
Escoria de acería	2	algunas	—	Norte, Yorkshire, Humberside, Gales, Escocia y pequeñas cantidades en otras regiones
Residuos de demoliciones	20	—	—	Nacional

extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales"; Capítulo 10, "Residuos de procesos térmicos"; Capítulo 17, "Residuos de construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)"; Capítulo 19, "Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial"; y Capítulo 20, "Residuos municipales (residuos domésticos y residuos

Tabla 3. Clasificación francesa de suelos orgánicos y subproductos industriales (SETRA/LCPC, 1992).

Familia de materiales	Símbolo	Parámetros significativos de cara a su empleo
Materiales naturales con materia orgánica	F_1	Contenido en materia orgánica, características geotécnicas como suelo A, B o C (*)
Cenizas volantes sílicoaluminosas	F_2	Razón entre humedad natural y óptima PN, y capacidad de soporte con la humedad natural (índice IPI)
Estériles del carbón	F_3	Tasa de combustión, caract. geotécnicas como suelo A, B, C, D o material rocoso
Estériles de minas de potasa	F_4	Contenido en ClNa y características como suelo A, B, o C
Fosfoyeso	F_5	Modo de obtención comportando o no neutralización con cal, granulometría y humedad
Escorias de incineración de basuras domésticas	F_6	Inquemados y elementos solubles, grado de desferrificación, cribado y homogeneización, tiempo de almacenamiento, presencia de cenizas volantes
Materiales de demolición	F_7	Grado de desferrificación y homogeneización, presencia de elementos indeseables (madera, yeso...), granulometría
Escorias de alto horno	F_8	Características geotécnicas como suelo B, C, D o material rocoso
Otros subproductos industriales	F_9	Parámetros por definir en estudio específico

(*) A: suelos finos, B: suelos arenosos y con gravas, con finos; C: suelos compuestos por finos y elementos gruesos; D: suelos insensibles al agua (gravas y arenas)

asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente". La lista identifica los residuos peligrosos con un asterisco, y en la directiva se refieren los criterios para considerar un residuo como peligroso.

A título indicativo, y como ejemplo de la ya considerable experiencia acumulada en otros países europeos, en las Tablas 2 y 3 se presentan los residuos que fueron incluidos, hace ya bastante tiempo, en dos recomendaciones de utilización, británica y francesa, respectivamente: la guía BS 6543 de la "British Standard Institution" titulada "Use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering", de 1985, con más de 20 años, por tanto; y la guía técnica francesa del SETRA/LCPC "Réalisation des remblais et des couches de forme", de 1992, en cuya clasificación relativa a materiales utilizables en terraplenes de carretera, existe una clase F que comprende los suelos orgánicos y los subproductos industriales. Estas dos listas son

Tabla 4. Aplicaciones potenciales para residuos y materiales reciclados en terraplenes (adaptado de Enviros, 2001).

Aplicaciones	Materiales
Núcleo de terraplenes	Residuos de canteras Residuos de construcción/demolición Escorias de horno alto Residuos de extracción del carbón (estériles negros y rojos) Residuos de pizarras bituminosas Cenizas volantes de centrales térmicas
Rellenos estructurales, para soportar cargas	Ladrillos triturados Residuos de la exploración del caolín Residuos de la extracción do carbón Hormigón triturado Residuos de demoliciones Arenas de fundición de piezas metálicas Cenizas de fondo/escorias de fondo Cenizas volantes de centrales térmicas
Rellenos sin cargas	Todos los anteriores Residuos de dragados Residuos de excavaciones Neumáticos usados Balastro usado Tierra vegetal

indicativas de los residuos más utilizados o con mayores posibilidades de utilización en los dos países referidos.

En la Tabla 4 se pueden ver los residuos utilizables en terraplenes de acuerdo con los resultados de un estudio británico realizado en 2001 (Enviros, 2001) destinado a establecer un punto de situación de la utilización de residuos y materiales reciclados en la construcción de carreteras y en la edificación. En lo que respecta a los Estados Unidos de América, la *Federal Highway Administration* (FHWA) ha promovido la realización de numerosos estudios sobre el aprovechamiento de residuos en la construcción de carreteras. Algunos de estos estudios pueden ser consultados vía Internet, donde se mantienen actualizados periódicamente. De estos estudios, puede destacarse el documento titulado *User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction* (Chesner et al. 1998), elaborado en 1997 por la FHWA, que incluye recomendaciones para utilizadores de residuos y subproductos en la construcción de carreteras. En el documento se compila de forma concisa la información disponible

Tabla 5. Materiales para capas granulares y rellenos compactados incluidos en las recomendaciones de la FHWA para utilizadores de residuos en obras de carreteras (Chesner et al., 1998).

Aplicación	Materiales
Capas granulares	Escoria de horno alto Escoria de la combustión del carbón Residuos de la extracción de minerales Ceniza de la incineración de residuos sólidos urbanos Escorias no férricas Residuos de demolición de pavimentos asfálticos Residuos de construcción/demolición de hormigón Escoria de acería Vidrio
Rellenos compactados	Cenizas volantes de la combustión del carbón Residuos de la extracción de minerales Escorias no férricas Residuos de demolición de pavimentos asfálticos Residuos de construcción/demolición de hormigón Neumáticos usados triturados

sobre 19 residuos y subproductos y las recomendaciones para su utilización, en los casos considerados apropiados, en seis aplicaciones de carreteras: pavimentos bituminosos; pavimentos de hormigón; capas granulares sin conglomerante; capas granulares con conglomerante; relleno compactado; y relleno fluidificado (*flowable fill*). Las recomendaciones proporcionan información general sobre la adecuación de los residuos a la construcción de carreteras, incluyendo una evaluación desde el punto de vista de la ingeniería, de los aspectos ambientales y de los costes involucrados. En la Tabla 5 se muestran los materiales considerados en estas recomendaciones para terraplenes y capas granulares sin conglomerante. La omisión de un determinado material para una aplicación en particular no constituye, según los autores, una prohibición de utilización, sino una indicación de combinación posiblemente inapropiada o, simplemente, de falta de información.

En la Tablas 6 se recogen los residuos utilizables en obras de tierra y carreteras, según el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción" elaborado por el CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2002). Se indican, para cada tipo de residuo, las aplicaciones realizadas de forma habitual y las aplicaciones de utilización reducida aunque posible.

Tabla 6. Aplicaciones de diferentes residuos en obras de tierra y carreteras (MMA, 2002).

Material			Rellenos	Terraplenes	Capas granulares	Capas estabilizadas con cemento	Capas asfálticas	Áridos o aditivos para hormigón	Áridos en capas superficiales
1.1	Estériles de carbón	Negros	■	■					
		Rojos	■	■	●	■	●		
2.1	Escorias de horno alto	Granulada							
		Cristalizada	■	■	■	■	■	■	■
2.2	Escorias de acería LD		●		●	●	■		■
2.3	Escorias de acería de horno eléctrico	Negra	●		●	●	■		■
		Blanca							
2.4	Humo de sílice								
3.1	Cenizas volantes de central térmica de carbón		●	●		■		■	
3.2	Residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado								
4.1	Escombros de hormigón		■	■	■	■			
4.2	Escombros de mampostería		■	■					
4.3	Neumáticos fuera de uso			●			●		
4.4	Residuos de incineradoras urbanas	Cenizas volantes							
		Cenizas de hogar							
4.5	Lodos de depuradoras	Lodos							
		Cenizas de incineración							
5.1	Reciclado de pavimentos asfálticos		■	■	■	■	■		
5.2	Reciclado de pavimentos de hormigón		■	■	■	■		■	

■ Utilización habitual
● Utilización reducida pero con posibilidades reales

3. LA PROMOCIÓN DE LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN OBRAS GEOTÉCNICAS

Los factores esenciales que se deben tener en cuenta a la hora de implementar una política de reutilización de residuos son, en principio, de tres tipos: aspectos de ingeniería civil, especialmente de caracterización de los materiales; factores medioambientales; y factores económicos.

Los pasos fundamentales de los programas de valorización de un determinado residuo en aplicaciones geotécnicas se pueden resumir de la siguiente manera: identificación de la aplicación; definición de los principales requisitos de la aplicación; verificación de la viabilidad medioambiental; desarrollo de ensayos de caracterización en laboratorio; modelación del comportamiento geotécnico; preparación de especificaciones constructivas; observación de los métodos de puesta en obra y del comportamiento *in situ*; observación del comportamiento a largo plazo; y difusión de los conocimientos técnicos y científicos adquiridos.

Para llevar a cabo una política de reutilización de residuos es necesario envolver a los diferentes agentes, o sea, a los productores de los residuos, a los potenciales utilizadores, a los proyectistas y contratistas, a las instituciones públicas (ministerios, consejerías, organismos a cargo de las vías de comunicación), centros de investigación y de asesoría técnica, y asociaciones medioambientales.

Entre las principales dificultades que se encuentran, para introducir políticas de aprovechamiento de residuos, se pueden mencionar las siguientes:

- falta de información, para algunos de los residuos, sobre los siguientes aspectos: comportamiento a corto y largo plazo; métodos y normas de ensayo apropiados; y métodos constructivos más apropiados;
- poca experiencia y escasa difusión entre los pequeños y medianos contratistas;
- prejuicios existentes respecto al uso de los residuos;
- volúmenes disponibles de los materiales, que pueden ser insuficientes en determinados casos, o estar muy diseminados geográficamente, así como problemas relacionados con la homogeneidad del material y con costes de transporte elevados;
- falta de medios financieros, equipos técnicos y tiempo para desarrollar trabajos de investigación, formación adecuada y legislación;
- la actuación debe hacerse con anticipación; se necesita tiempo para realizar ensayos e pedir permisos, teniendo en cuenta las diversas administraciones implicadas que deben dar su aprobación; la falta de conexión entre las políticas llevadas a cabo a diferentes niveles puede suponer otro obstáculo adicional;
- plazos exiguos para la planificación, proyecto y ejecución de las obras;
- intereses contrapuestos en algunos casos de valorización de residuos;
- el principio de compensación de tierras a veces no deja lugar a la incorporación de volúmenes significativos de residuos;
- falta de apoyo, en ocasiones, de las administraciones implicadas;
- abundancia de materiales naturales en algunos países o regiones;

— las especificaciones existentes, que han sido elaboradas muchas veces con alto grado de empirismo, y pensando en los materiales tradicionales, y pueden ser demasiado exigentes innecesariamente para ciertos residuos.

Las soluciones para superar estas dificultades pueden basarse en una serie de medidas tales como: mayor actividad en proyectos de investigación y de demostración de resultados; transferencia de conocimientos entre entidades y entre países; mayor utilización de apoyos e incentivos financieros; elaboración de legislación adecuada; acciones de convencimiento de escépticos; e impulso a la inclusión de la reutilización de residuos en los contratos.

A nivel europeo se ha asistido a una serie de esfuerzos en el sentido de establecer políticas y de promover acciones que conduzcan al aprovechamiento de residuos, como por ejemplo el informe sobre las prácticas de gestión de los residuos de construcción y demolición promovido por la Comunidad Europea (EC, 1999). Normalmente, estos documentos posibilitan la verificación de situaciones muy distintas, en lo que se refiere a la obtención de datos, tratamiento de información y desarrollo de aplicaciones para los residuos en los diversos países, incluso comparando aquellos países con niveles de desarrollo semejantes. Ha aparecido también en los últimos años abundante legislación comunitaria relativa a la gestión racional de los residuos, pudiendo destacarse la Directiva Comunitaria 91/156/CEE del Consejo, transcrita en España por medio de la Ley 10/1998, de 21 de Abril, de Residuos. Esta Ley incluye en sus objetivos la prevención de la producción de residuos, el establecimiento del régimen jurídico de su producción y gestión y el fomento de su reducción, reciclado y otras formas de valorización. También se han aprobado en España varios planes nacionales de residuos que han establecido ambiciosos objetivos de valorización.

Por otro lado, se ha avanzado también en España en el estudio de las aplicaciones técnicas de los residuos, habiéndose realizado en los últimos años diferentes trabajos, tanto por iniciativa de entidades públicas (Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Carreteras y CEDEX, por ejemplo) como también de empresas interesadas en el tema (HUNOSA, compañías eléctricas), para caracterizar las propiedades de distintos tipos de residuos, valorar sus posibilidades de utilización en carreteras y en obras geotécnicas desde el punto de vista técnico, y elaborar recomendaciones de uso. Debe destacarse la publicación del "Catálogo de residuos utilizables en la construcción", elaborado por el CEDEX y editado en 2002 por el Ministerio de Medio Ambiente, cuyo objetivo es potenciar el uso racional de residuos y subproductos industriales poniendo en conocimiento de las partes interesadas los diferentes materiales potencialmente utilizables y las utilizaciones posibles. El Catálogo, que contiene información sobre catorce residuos potencialmente utilizables en construcción, está siendo actualizado con información complementaria, y volverá a editarse a finales del 2006.

En relación a los países vecinos, se puede destacar, en Portugal, la preparación de guías técnicas de residuos de diferentes sectores industriales, cuyo objetivo es la identificación de las unidades productoras y los correspondientes residuos producidos, los volúmenes y su distribución geográfica. También, deben mencionarse las actividades

tendentes a la creación de "Bolsas de Residuos" (Almeida et al., 2004) por parte de los productores, como manera de potenciar su valorización. Una Bolsa de Residuos es un servicio de información sin fines lucrativos con el fin de identificar mercados para los residuos generados en las operaciones industriales y de estimular su aprovechamiento económico por otros sectores o entidades. La bolsa sirve igualmente como guía para la promoción y oportunidad de transacción (compra, venta, cambio o cesión) de materias primas, de forma simple, intentando beneficiar a todos los que intervienen. La existencia de bolsas de residuos permite: a) la reducción de los residuos producidos, a través de la optimización de la utilización de los materiales (valorización económica); b) la reducción de los costes de producción por la utilización de residuos y la obtención de un ingreso adicional; c) la ampliación del universo de suministradores; d) el soporte a las actividades de preservación del medio ambiente; e) el incentivo a la instalación de nuevas industrias para el aprovechamiento de los residuos industriales; f) el desarrollo de nuevas tecnologías de aprovechamiento de los residuos (Almeida et al., 2004).

En Francia, pueden destacarse los estudios llevados a cabo en el ámbito del proyecto *OFRIR* (*Observatoire Français pour le Recyclage dans les Infrastructures Routiers*), que han permitido crear el portal de internet http://ofrir.lcpc.fr , disponible desde agosto de 2003. El proyecto OFRIR (Jullien, 2004) ha sido desarrollado con el propósito de recopilar información y crear una base de datos de los materiales con posibilidades de ser utilizados en las obras de carretera. La base de datos proporciona información, entre otros aspectos, sobre las características de los diferentes residuos, sobre su producción y distribución geográfica y sobre proyectos en los que se han utilizado.

4. ASPECTOS TÉCNICOS DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN OBRAS GEOTÉCNICAS

4.1. Consideraciones generales

Es muy variable el conocimiento y la experiencia disponible entre los distintos materiales. En algunos casos, las propiedades del material y las posibilidades de utilización en terraplenes están suficientemente estudiadas, existiendo numerosos ejemplos y casos de aplicaciones llevadas a la práctica. Para otros tipos de materiales, ocurre lo contrario.

Es frecuente que se dé una notable variabilidad geográfica, tanto en los tipos de residuos disponibles en los diferentes países, regiones y comarcas, en función de las distintas actividades económicas o industriales, como en las propiedades y características para un mismo tipo de residuo, debido a diferencias locales en las materias primas originarias del residuo o subproducto, en las tecnologías productivas o en el tratamiento posterior a su obtención.

La heterogeneidad de propiedades es otro factor característico de muchos tipos de residuos, para materiales procedentes de una misma fuente, lo que dificulta, en primer lugar, su caracterización, que debe basarse en una adecuada toma de muestras. Esta heterogeneidad se debe, normalmente, a que no hay, en principio, un especial interés por

obtener un material uniforme durante la producción del residuo. Por eso, para su aprovechamiento posterior es preciso a veces un cierto tratamiento, aunque la utilización en terraplenes no es, de todos modos, excesivamente exigente en ese sentido, comparándola con otros usos. La heterogeneidad puede darse en la composición química y mineralógica del material, o en las características físicas: tamaños de partículas, densidades, etc. Actualmente, no obstante, en el caso de algunos subproductos con una cierta demanda y con un aprovechamiento ya consolidado, es posible que en su proceso de obtención se haya introducido en origen algún tipo de acción para facilitar ese aprovechamiento.

Muchos residuos son semejantes, por sus características, a determinados tipos de suelos o materiales rocosos naturales, aunque con alguna particularidad peculiar derivada de su origen y naturaleza. Existen residuos que están compuestos en un alto porcentaje por partículas de suelo o rocas naturales en su estado natural, pero conteniendo además algún componente extraño o no habitual en los materiales convencionales. Es el caso típico de los estériles mineros, en los cuales el elemento extraño suelen ser restos del mineral en explotación. El comportamiento geotécnico de este tipo de residuos viene dominado normalmente por los componentes de suelo y roca convencionales, debiendo, no obstante, analizarse la influencia de la parte no convencional en el comportamiento geotécnico del conjunto y las repercusiones medioambientales de su empleo.

Otros residuos, los subproductos industriales particularmente, suelen presentar una composición completamente diferente a la de los suelos y rocas convencionales, aunque pueden exhibir comportamientos geotécnicos asimilables a los de algún tipo de material natural. Son el resultado de una transformación química y mineralógica parcial o completa de otros materiales originarios, normalmente térreos, aunque a veces no. Estos materiales deben caracterizarse geotécnicamente de una forma completa, y debe evaluarse asimismo su potencial contaminante para poder decidir sobre su utilización.

Durante la manipulación de ciertos productos residuales, en las tareas de extracción principalmente, puede ser preciso tener en cuenta algunas medidas de seguridad e higiene particulares. Algunos residuos pueden contener amianto (en los escombros de demoliciones, por ejemplo) o substancias radiactivas. En ciertas escombreras puede haber concentraciones localmente altas de gases tóxicos, tales como monóxido de carbono o ácido sulfhídrico, que pueden resultar peligrosos durante las operaciones de extracción del material.

Por lo que respecta al riesgo de contaminación del agua del terreno, debe tenerse en cuenta que muchos residuos contienen trazas de elementos tóxicos, que en determinadas circunstancias podrían pasar a las aguas y al terreno. Con los residuos más frecuentemente usados como material de terraplén (cenizas volantes, estériles de carbón, escombros de canteras) no se producen problemas de polución de las aguas; con otros tipos de residuos sí puede haberlos, especialmente si están enriquecidos en ciertos elementos particularmente tóxicos como el mercurio, el cadmio, o el ión cromo Cr^{+6}. En principio, podrán utilizarse sólo residuos clasificados como no peligrosos, según la legislación comunitaria y nacional en vigor.

Algunos residuos utilizados como relleno pueden causar algunos problemas de polución del aire, particularmente si se trata de materiales muy finos (como las cenizas), que en caso de construcción en períodos de tiempo seco y con viento pueden organizar polvaredas considerables, si no se adoptan medidas para evitarlo, tales como el transporte en vehículos tapados o cerrados.

La caracterización de los residuos y materiales reciclados comienza normalmente por la determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas. , Teniendo en cuenta que en las aplicaciones geotécnicas los materiales estarán sometidos, en principio, a la infiltración del agua de lluvia, es necesario determinar si incluyen elementos solubles potencialmente peligrosos para el medio ambiente, que puedan causar contaminación de las aguas y suelos circundantes.

El conocimiento de las características físicas es necesario para estimar los parámetros para el dimensionamiento de las estructuras de tierra. La comparación de estos parámetros con los que presentan los materiales convencionales es siempre una manera útil de evaluar las posibilidades de aplicación de un determinado residuo. Es importante destacar, no obstante, que las especificaciones constructivas se utilizan con base en los materiales convencionales. En ausencia de requisitos específicos para los residuos, se efectúan ensayos, pero normalmente de la misma forma que para los materiales convencionales. Por este motivo, los resultados de tales ensayos deben ser interpretados con el debido cuidado. De hecho, la idoneidad de los materiales para las aplicaciones geotécnicas ha de ser evaluada por medio de ensayos apropiados, que permitan analizar el comportamiento a corto y a largo plazo en condiciones representativas de las fases de construcción y de servicio.

Deben estudiarse los aspectos relacionados con la puesta en obra de los materiales, concretamente, el transporte y los métodos constructivos, en condiciones semejantes a las reales. Muy a menudo, son estos los aspectos que más condicionan la utilización de los residuos. Aunque las guías de utilización contienen recomendaciones muy útiles, frecuentemente están muy centradas en los materiales locales, siendo necesario tener en cuenta las posibles diferencias en las características de un mismo tipo de residuo, pero procedente de países o regiones diferentes.

Además de una caracterización adecuada en laboratorio de los residuos, para promover su utilización, es siempre conveniente, o necesaria, en la fase de estudio, la construcción de tramos experimentales (Figs. 1 y 2), con características similares, en lo posible, a las de las obras reales, debiendo controlarse mediante especificaciones basadas en el comportamiento. Además, es siempre necesario prever una adecuada monitorización, tanto de los tramos de prueba, como de las obras reales, en las diferentes fases. La divulgación de los resultados de la monitorización de las obras reales constituye un óptimo medio de movilizar a la comunidad técnica y científica y de convencer a las autoridades para que se impliquen activamente en la utilización de los residuos.

La construcción de grandes infraestructuras es una ocasión para la valorización de residuos que no se debería desaprovechar. En la actualidad, el hecho de que los proyectos de infraestructuras estén sometidos a la evaluación del impacto ambiental, así como la planificación, a través de la evaluación ambiental estratégica de planes y de programas,

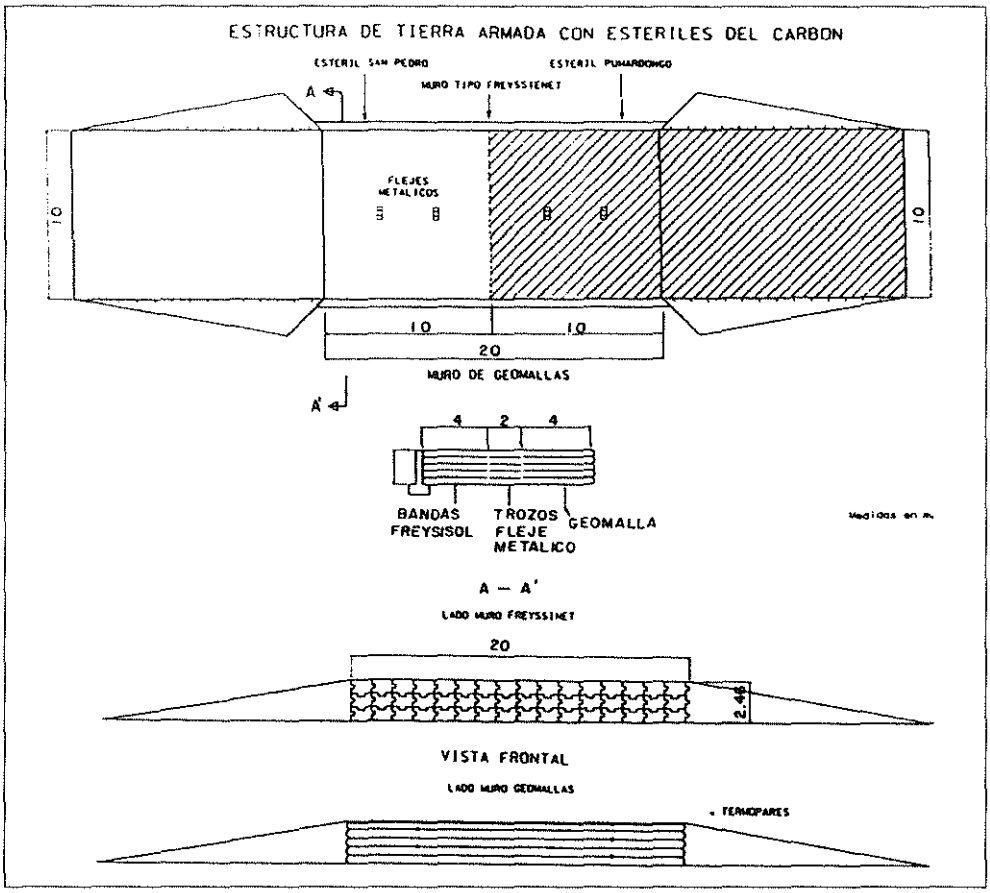


Figura 1. Terraplén experimental de tierra reforzada construido con estériles de carbón (González Cañibano et al., 1996).

debería facilitar el aprovechamiento de residuos, contemplándolo en las fases de ordenación del territorio, de planificación y de proyecto. Igualmente, la recuperación económica y medioambiental de espacios afectados por el abandono de antiguas industrias es también una oportunidad para la valorización de los residuos.

4.2. Exigencias de calidad en función del tipo de utilización

La utilización de residuos y subproductos en obras geotécnicas debe conducir a materiales que presenten las características y el comportamiento esperado para el elemento de obra en cuestión. En lo que se refiere a la normativa que contempla actualmente en España el aprovechamiento de residuos en obras de carretera, pueden

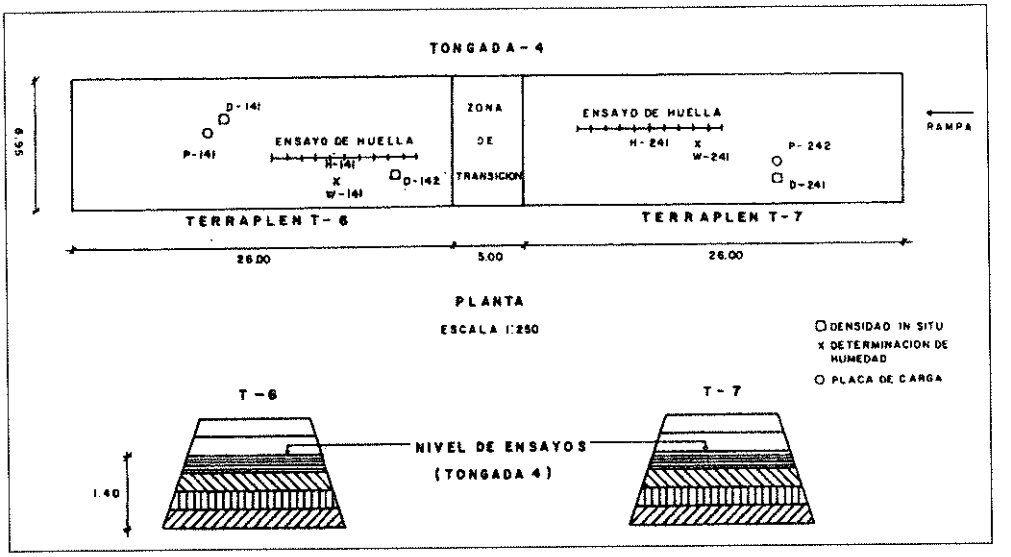


Figura 2. Terraplenes experimentales de ceniza volante compactada (Pardo de Santayana, 1993).

señalarse el siguiente conjunto de disposiciones: orden 1382/2002, para la construcción de terraplenes y obras de tierra; orden 3459/2003, de rehabilitación de firmes; orden 3460/2003, sobre secciones de firme; orden 891/2004, relativa a capas de firme. Se destacan, a continuación, algunas de las exigencias generales para los varios tipos de utilización típicos.

a) Terraplenes de carreteras y vías de comunicación

La función del terraplén es básicamente rellenar geométricamente el espacio entre el terreno natural y la explanada que soporta el firme. Las exigencias y características generales pueden resumirse del siguiente modo (Colombel et al. 1998):

- es un tipo de utilización capaz de admitir grandes volúmenes de materiales puntualmente;
- son tolerables materiales de características mecánicas bajas, ya que el relleno no está sometido directamente a las tensiones generadas por el tráfico;
- las solicitaciones mecánicas más fuertes se limitan al período de construcción;
- la estabilidad general en relación al peso del propio relleno debe estar garantizada;
- los materiales utilizados deben poder ser colocados junto a los materiales convencionales;

— el material debe presentar condiciones para poder ser colocado debidamente en obra; deben analizarse las posibilidades de compactación, la estabilidad bajo las máquinas y la sensibilidad al exceso de agua;
— es una parte de la obra que puede sufrir flujos de agua importantes y variables, según las condiciones de drenaje y climáticas;
— hay contacto directo con el medio natural envolvente, lo que puede constituir un punto sensible en la de utilización de residuos.

En el artículo 330 de la orden 1382/2002 se definen las diferentes zonas de los rellenos tipo terraplén: coronación, núcleo espaldón y cimiento, así como los requisitos para los materiales, su empleo, la ejecución de las obras y su control. En este artículo se abre la puerta a la utilización de residuos, sin mencionar directamente aquellos potencialmente utilizables, con la siguiente expresión: "Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto. En todo caso se estará a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción".

Los requisitos relativos condiciones de colocación en obra, capacidad de soporte, carácter no contaminante y costes asociados determinan las posibilidades de utilización de los diferentes materiales. La obtención de buenas condiciones de capacidad de soporte será más importante cuanto más próximo se esté de la coronación del terraplén. El control del producto terminado se efectúa, normalmente, a través de determinaciones de la densidad y humedad *in situ*, y su comparación con valores de referencia, de ensayos de carga con placa y de ensayos de la huella. Es fundamental analizar la posibilidad de fugas de contaminantes eventualmente presentes en el cuerpo del relleno, como consecuencia de la circulación del agua en su interior a lo largo del tiempo.

b) Explanada/coronación del terraplén

En la normativa de carreteras de otros países europeos se distingue una capa especial localizada entre el terraplén y el firme, denominada en francés "couche de forme" y en portugués "leito do pavimento", que en España se corresponde físicamente con la coronación del terraplén, y que sirve para formar la explanada donde apoya el firme. La función de esta capa es básicamente adaptar las características aleatorias y dispersas de los materiales del terraplén o del terreno natural a las características mecánicas, geométricas, hidráulicas y térmicas admitidas como hipótesis en la concepción del firme. Debe proporcionar una geometría regularizada y una capacidad de soporte suficiente, y permitir la compactación regular y adecuada de las capas de subbase y de base, así como el tráfico de obra en todo momento independientemente de las condiciones climáticas.

Los materiales para la coronación del terraplén deben presentar características mecánicas suficientes para resistir, a corto plazo, el tráfico de la maquinaria de obra. A largo

plazo, las características mecánicas exigibles a los materiales granulares son menos importantes; no obstante, la explanada debe mantener una capacidad de soporte homogénea y suficiente. Los materiales deben ser capaces de soportar las diferentes condiciones climáticas y permitir la protección del suelo subyacente. Las características mecánicas deben ser insensibles al agua, sea naturalmente, sea tras un eventual tratamiento (adición de cal, conglomerantes hidráulicos, eliminación de la fracción fina).

En relación a la granulometría, la función de nivelación geométrica debe estar asegurada, y el tamaño máximo de partícula debe estar limitado, lo que puede obligar a un tratamiento de eliminación o trituración de los elementos gruesos. En climas fríos, es a nivel de la explanada donde se debe garantizar la protección contra la formación de hielo en el suelo. Y, obviamente, los problemas de eventual polución deben ser también tenidos en cuenta.

c) Bases y subbases

La función esencial de las capas de base y subbase es el reparto de las cargas del tráfico que actúan sobre el pavimento, de manera que las tensiones sobre el suelo subyacente sean inferiores a las admisibles. El efecto dinámico de las cargas repetidas del tráfico conduce a un trabajo en fatiga para los materiales tratados (con aglomerante), y en deformaciones permanentes para los no tratados (materiales granulares sin conglomerante). Además de la fatiga a largo plazo, los materiales de las bases y subbases tratadas deben sufrir a corto y a medio plazo los efectos relacionados con los trabajos en la fase de construcción y con el tráfico durante los primeros meses de carga. En las capas con conglomerantes hidráulicos, debido a que el endurecimiento es progresivo, existe un primer período en el cual esta capas deben soportar los esfuerzos básicamente por el rozamiento entre partículas, lo que conduce a mayores exigencias sobre los áridos utilizados. Además, los materiales en estas capas deben ser insensibles al agua y a problemas de hinchamiento por causa del hielo.

El empleo de residuos ("materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho") en zahorras para capas de firme está contemplado en la orden 891/2004, que lo restringe a las categorías de tráfico pesado T2 a T4, tráficos con intensidad media diaria de pesados (IMDp) inferior a 800 vehículos, lo que ha generado cierto descontento en el sector de empresas de reciclado, pues no pueden colocar el árido reciclado en los firmes de las grandes infraestructuras (Celemín, 2005). Para poder utilizarlos, los residuos deben cumplir las especificaciones del artículo en cuestión, debe declararse su origen, y se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Se establecen, igualmente, limitaciones y tolerancias específicas para ciertos residuos. Se limita la expansividad para las escorias de acería (inferior al 5%, según la norma UNE-EN 1744-1), y la desintegración por el silicato bicálcico y por el hierro (que debe ser nula, según la norma UNE-EN 1744-1) para las escorias de alto horno. Se establecen tolerancias específicas en lo concerniente al ensayo de Los Ángeles para los

áridos siderúrgicos y para los residuos de construcción y demolición, y, en lo referente a otras propiedades, como equivalente de arena, husos granulométricos, plasticidad, o forma de las partículas, se sobreentiende que se aplican los criterios exigidos a las zahorras artificiales.

5. CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS RESIDUOS

Se comentan sucintamente a continuación las características de tres tipos de residuos de importancia en obras de tierra: estériles de carbón, escorias siderúrgicas y cenizas volantes.

5.1. Estériles de carbón

Los estériles del carbón son los residuos de la explotación de galerías y trabajos en roca de las minas de carbón (hulla, antracita y lignito), así como los procedentes de las operaciones de lavado de este mineral. Están constituidos en principio, por tanto, por las rocas sedimentarias entre las cuales se encajan las capas de carbón. Se pueden clasificar básicamente en tres grupos: 1°) estériles de mina, procedentes de las galerías y trabajos en roca, separados del mineral que se envía al lavadero; se caracterizan por una granulometría irregular, y generalmente no poseen carbón; representan aproximadamente un 10% de la producción total de estériles. 2°) Estériles de lavadero, residuos sobrantes una vez separado el carbón mediante un proceso de lavado; se caracterizan por poseer unas composiciones granulométricas, mineralógicas y químicas muy regulares; salen divididos en tamaños, según los cortes granulométricos que se efectúan en los lavaderos. 3°) Estériles de escombrera, resultantes del almacenamiento de los estériles de mina y de lavadero. Estos últimos se subdividen en dos tipos: estériles rojos, resultado de la calcinación del material dentro de la escombrera debido a la combustión del carbón que contenía; y estériles negros, que son los que no han sufrido combustión. Los estériles de lavadero, en función de los cortes granulométricos que se efectúan en los mismos, se clasifican en: gruesos (tamaños mayores de 150 mm), granos (entre 150 y 10 mm), menudos (entre 10 y 1 mm) y finos (inferiores a 1 mm); estos últimos, los finos, son normalmente transportados y depositados separadamente por vía húmeda.

Los estériles del carbón se llevan almacenando en vertederos desde hace decenas de años, en algunos casos incluso desde el siglo XIX, en las proximidades de las minas. La producción anual de estériles de lavadero de hulla en España se estima en cerca de cuatro millones de toneladas (1999). Las cantidades de estériles de carbón almacenadas en escombreras en las regiones productoras son ingentes: más de 150 millones de toneladas en Asturias, por ejemplo, mil millones de toneladas en Francia, 3.000 millones en Gran Bretaña, 500 en la cuenca del Sarre alemana, etc.

Petrológicamente, la naturaleza de los estériles de mina, de lavadero y de escombrera negros es la propia de la roca que acompaña a las capas de carbón, pues no han

sufrido más que una transformación mecánica. Estas rocas son normalmente pizarras más o menos carbonosas, areniscas, margas. La composición mineralógica de los estériles negros es la misma de estas rocas, e incluye, por tanto, minerales arcillosos, tales como ilita, caolinita, clorita, etc., así como cuarzo, pirita, carbonatos, carbón, etc. La relación cuarzo/arcilla es muy variable, siendo en general mayor la proporción de minerales arcillosos. El cuarzo aparece en mayor proporción en las fracciones más gruesas de estos estériles.

Los estériles de escombrera rojos, por el contrario, han sufrido una transformación mineralógica en relación a las rocas de origen, como consecuencia de la combustión que han experimentado; sus minerales esenciales son filosilicatos, cuarzo y carbonatos, han perdido material carbonoso y materia orgánica con relación a los estériles negros, y suelen presentarse con una matriz arcillosa o con una cementación ferruginosa; el óxido de hierro les proporciona el color rojo característico.

Por lo que respecta a la composición química de los estériles (Tabla 7), varía relativamente poco de unas cuencas a otras, caracterizándose por un alto contenido en sílice, como principal constituyente (entre el 40% y el 65%, típicamente), seguido por la alúmina (20% a 30%), también en elevada proporción, el óxido férrico (1% a 12%), el óxido de potasio, y otros componentes en menores porcentajes. Poseen, además un cierto porcentaje de carbono, que varía más substancialmente de unos estériles a otros. Así, mientras en algunas escombreras de estériles negros el contenido de carbono supera el 10%, en los estériles rojos este contenido es nulo; en los estériles de lavadero, el contenido de carbono aumenta cuanto menor es el tamaño de partícula.

El fenómeno de autocombustión que han experimentado muchas escombreras de estériles, dando lugar a los estériles rojos, está provocado por la pirólisis del carbón residual, bajo la acción combinada de la presión de tierras y la reacción exotérmica del agua sobre las piritas. En general este proceso se ha producido en escombreras relativamente antiguas, formadas por estériles vertidos sin tratamiento ninguno y mezclados con otros elementos combustibles (maderas, carbón). Actualmente, los estériles de lavadero que van para escombrera poseen porcentajes de carbón muy pequeños, como consecuencia de mejores técnicas de lavado; este hecho, unido a que hoy en día el material se coloca en la escombrera compactado con maquinaria de movimiento de tierras para mejorar la estabilidad y para evitar riesgos de combustión, hace que las escombreras recientes estén compuestas predominantemente por estériles negros, no quemados.

Los estériles no quemados poseen en general una coloración entre gris y negra; sus propiedades geotécnicas dependen en gran medida de su constitución petrológica. En algunos casos su contenido arcilloso es grande, y su comportamiento geotécnico se asemeja al de los suelos cohesivos; esto es común en estériles ingleses y franceses. En otros casos, más frecuentes en España, el componente pizarroso de las rocas de origen posee un mayor grado de metamorfismo, y el comportamiento del material es más granular.

Tabla 7. Composición química de los estériles del carbón.

Elemento (%)	Gran Bretaña		España (lavadero)		
	Quemados	No quemados	Granos	Menudos	Finos
SiO_2	45-60	38-50	49,2	47,1	43,1
Al_2O_3	21-31	16-22	21,7	23,7	23,2
Fe_2O_3	4-13	0,5-3	6,8	5,3	4,6
TiO_2	0,15-0,25	0,5-1	1,1	1,2	1,1
P_2O_5	—	0,1-0,25	—	—	—
CaO	0,5-6	0,5-1,5	1,4	1,1	2,0
MgO	1-3	1-2,5	1,5	1,4	1,2
Na_2O	0,2-0,6	0,1-0,6	0,4	0,4	0,3
K_2O	2-3,5	0,8-1,5	3	3,2	2,9
V_2O_5	—	—	0,25	0,22	0,22
SO_3	0,1-5	0,5-2,5	—	—	—
Azufre total	—	—	0,6	1,4	1,0
CO_2	—	0,5-2,5	—	—	—
C	—	—	3,5	5,5	11,4
Pérdida por calcinación	2-6	15-33	13	15	18

Los estériles quemados poseen una coloración entre roja y violeta, y son mecánicamente más duros y resistentes que los negros. Su comportamiento geotécnico es el propio de los suelos y rocas insensibles al agua. No obstante, en las escombreras de estériles rojos existen zonas en las que el proceso de combustión se ha producido en diferente grado, resultando en una variedad de tipos de estéril entre aquellos con su mineralogía completamente transformada por la combustión, los parcialmente quemados, y los apenas o nada quemados, variando en consonancia las propiedades geotécnicas. A veces aparecen en estas escombreras zonas de material parcialmente quemado, de coloración rojiza, pero con características deleznables y peor comportamiento mecánico que los estériles bien quemados. De esta forma es posible encontrar dentro de una misma escombrera zonas de material quemado, de material parcialmente quemado, de estériles no quemados y de finos, no muy distantes unas de otras. Sin embargo, a pesar de este inconveniente de la variabilidad, todos los materiales, con excepción, posiblemente, de los finos, resultan aptos para terraplenes. Además, los estériles rojos bien quemados, debido a sus características granulares y a la buena

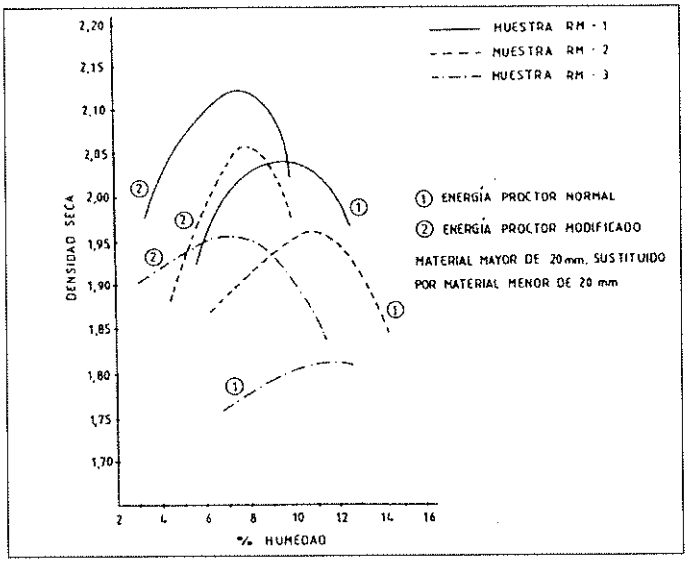


Figura 3. Curvas de compactación de estériles negros de escombrera asturianos (Glez. Cañibano, 1987).

resistencia mecánica y angularidad de las partículas, pueden reservarse para explanadas mejoradas y subbases, así como para otras capas del firme, solos o mezclados con otros materiales. En la Fig. 3 y en las Tablas 8, 9 y 10 se presentan algunas características geotécnicas de los estériles.

Los estériles del carbón llevan empleándose muchos años en la construcción de terraplenes en distintos países europeos (en Centroeuropa, Francia, Gran Bretaña, etc.), estando incluidos en diversas normativas y recomendaciones de uso al efecto. En España, a pesar de algunas oportunidades desaprovechadas (como en el caso de la Autovía del Noroeste y las escombrera de Ponferrada; Celemín, 2005), se tiende a considerarlos una opción ventajosa frente a otros materiales más convencionales, en las regiones donde existen, especialmente en Asturias, donde se han utilizado extensamente.

Relativamente a las condiciones de utilización como material de terraplén, los estériles, tanto los negros como los rojos, deben ser identificados y clasificados geotécnicamente, y puestos en obra, como cualquier otro tipo de material natural de semejantes características. En relación al riesgo de combustión de los estériles negros después de su colocación en obra, según la opinión generalizada, una buena compactación de las tongadas reduce drásticamente esa posibilidad. Las normas alemanas han estado admitiendo la utilización de estériles con hasta un 10% de carbón. En la práctica, se desconocen casos de terraplenes de estériles que hayan experimentado combustión espontánea.

La utilización de estériles negros procedentes de escombrera presenta la ventaja, frente a los estériles de lavadero, de independizar el ritmo de extracción del de producción. Por otro lado, comparando tipos de escombreras, el material de las escombreras de estériles negros es generalmente menos variable que el de las de estériles rojos, especialmente si se trata de escombreras con pocos años de existencia.

Tabla 8. Características geotécnicas de los estériles de carbón en España (Hinojosa y González Cañibano, 1994).

Propiedad	Valor o intervalo
Peso específico de las partículas	2,40-2,70 t/m^3
Tamaño máximo	200 mm
% de finos (<0,08 mm)	0-15%
Ausencia de plasticidad	36%
En el caso de finos plásticos:	
Límite líquido	<30
Indice de plasticidad	<12
Colapsabilidad de los estériles compactados	<0,4%
Cohesión efectiva	0-2 t/m^2
Angulo de rozamiento interno efectivo	25º-35º
Densidad máxima Proctor Normal	>1,75 t/m^3
Humedad óptima Proctor Normal	7-10%
Densidad máxima Proctor Modificado	>1,90 t/m^3
Humedad óptima Proctor Modificado	5-8%
Indice CBR Normal	>8
Indice CBR Modificado	>12
Hinchamiento (CBR, P Normal)	<0,1%
Hinchamiento (CBR, P Modificado)	<0,4%

Tabla 9. Características geotécnicas de varias muestras de estériles de carbón españoles, de escombrera y de lavadero (Pardo de Santayana et al., 1994).

Estéril (*)	Peso esp. G	Granulometría					Proctor Normal		Proctor Modificado		CBR	Indice Durab.
		2½"	3/4"	Nº10	Nº40	Nº200	$\gamma_{máx}$	w_{opt}	$\gamma_{máx}$	w_{opt}	(PM)	Id_2
Toralín (n)	2,68	80	34	7	2	1	2,02	9,0	2,08	7	35	97,8
Pumardongo (n)	2,72	100	70	20	8	4	2,07	8,5	2,11	6	14	94,5
Reicastro (r)	2,73	100	54	15	7	2	1,84	19,5	1,85	16,5	44	98,4
San Pedro (n)	2,66	100	93	29	11	7	2,09	8,0	2,14	6,5	14	75,7
Carrio d (n)	2,74	100	38	12	7	4	—	—	2,09	7	21	97,9
Carrio i (r)	—	65	90	35	18	8	1,76	19,5	1,82	15,5	13	97,9
Menudos Sovilla (l)	2,72	100	100	3	1	0	—	—	—	—	—	89,7
Pozo Candín (l)	2,68	100	95	35	15	7	2,10	8,5	2,15	5,5	36	91,0
Torre del Bierzo (n)	2,75	100	73	17	11	5	2,05	9,0	2,07	7,5	15	97,4
Hullas de Barruelo (l)	2,72	100	93	14	3	2	1,91	6,5	2,01	8,0	19	84,5
Antracitas de Velilla (l)	2,50	100	87,5	10	3	1	1,76	9,5	1,82	9,0	17	86,2
Antracitas del Bierzo (r)	2,50	100	71	21	12	5	1,68	18,0	1,74	15,0	113	99,0

(*) (n) negro (r) rojo (l) lavadero

Tabla 10. Características mecánicas de los estériles rojos (González Cañibano, 1993).

Ensayo	Media	Intervalo
Ensayo de abrasión Los Angeles	29	25-32
Fragmentación dinámica	25	19-31
Ensayo Micro-Deval (resistencia a la abrasión en húmedo)	22	13-41

El problema de la variabilidad del material procedente de una escombrera se ve reducido en la práctica por una serie de razones: Una de las causas de variabilidad es la meteorización, física en general, que experimenta la zona superficial de la escombrera, que, no obstante, tan solo alcanza al metro o medio metro más superficiales; sin embargo este material meteorizado presenta una granulometría más continua que el resto, lo cual permite compactarlo más fácil y satisfactoriamente. Por otro lado, en los casos en los que el material suministrado posee una distribución granulométrica irregular, con ausencia, normalmente, de los tamaños más finos, el proceso de compactación con la maquinaria convencional (particularmente los rodillos vibratorios) corrige la granulometría produciendo una suficiente cantidad de finos en la tongada compactada. Otra ventaja adicional del material de escombrera es que normalmente ya posee en origen un contenido de humedad próximo al óptimo para la compactación.

5.2. Escorias siderúrgicas

El Catálogo de residuos utilizables en la construcción (MMA, 2002) destaca, entre los residuos de la industria metalúrgica, estos cuatro: escoria de horno alto, escoria de acería LD, escorias de acería de horno de arco eléctrico, y humo de sílice. Se trata de subproductos formados a alta temperatura y enfriados de diversas formas. Las escorias tienen en común una composición química rica en sílice, alúmina y óxido cálcico (Fig. 4), una granulometría tipo arena o grava arenosa, partículas de formas angulosas y ásperas, con numerosas oquedades, un elevado rozamiento interno, y ausencia de plasticidad. El humo de sílice presenta granulometria fina, tipo polvo, y composición química a base de SiO_2, siendo muy pequeña su producción en España.

Las escorias de horno alto son de composición relativamente homogénea, y pueden ser de varios tipos según sea la manera de enfriar la escoria fundida. Si el enfriamiento se produce al aire a temperatura ambiente, se obtiene un material cristalino (escoria cristalizada) con forma y propiedades de roca compacta, cuyo machaqueo da lugar a un material granular, inerte, la escoria machacada, de múltiples aplicaciones similares a las de otros materiales rocosos (árido, balasto, rellenos compactados). El enfriamiento brusco de la escoria de horno alto en agua abundante da como resultado un material vitrificado, granulado (escoria granulada), que mezclado con cal da lugar a un ligante hidráulico. Se suele utilizar en la fabricación de cementos, y en mezclas con gravas para explanadas mejoradas, bases, etc. Otros procesos de enfriamiento dan lugar a tipos especiales de escorias: Pueden obtenerse así, por ejemplo, áridos ligeros si el enfriamiento se realiza con una limitada cantidad de agua, mediante un proceso de peletización. La producción anual de escorias de horno alto en países como Francia, Gran Bretaña, Alemania o Bélgica se cifra en varios millones de toneladas, siendo la proporción entre escorias cristalizadas y escorias granuladas muy variable de un país a otro. En cuanto al tanto por ciento de aprovechamiento, las cantidades producidas actualmente en algunos de estos países, en Gran Bretaña, por ejemplo (unos 3 millones de toneladas al año), son utilizadas prácticamente en su totalidad. En España, los datos de producción

en 1999 (MMA, 2002) son de 1.225.000 t en total, de las cuales 500.000 t son granuladas y 725.000 t, cristalizadas. La mayor parte de las escorias granuladas en España es consumida por las cementeras.

Las escorias de horno alto granuladas, por su composición, grado de vitrificación y su superficie específica, pueden experimentar reacciones puzolánicas, especialmente si su contenido en cal libre es alto. Estas reacciones puzolánicas, y por tanto las propiedades conglomerantes, también pueden darse en las escorias de acerías. En las escorias machacadas, por el contrario, cuya composición es cristalina y son, en consecuencia, inertes, no son de esperar este tipo de reacciones; el problema radica en que, a veces, en las escombreras se encuentran mezcladas con otros tipos de escorias u otros materiales. No obstante, las escorias procedentes de una misma instalación suelen presentar unas características relativamente constantes.

Las escorias de acerías están constituidas por la combinación de las impurezas de la fundición, durante su conversión en acero, en presencia de cal y oxígeno. Pueden ser de varios tipos, en función del tipo de horno y del método de producción del acero. En España son de dos tipos: escorias LD, obtenidas a partir del procedimiento Linz-Donowitz para la transformación de la fundición de hierro procedente del horno alto en acero, realizándose el afino inyectando oxígeno a presión en el baño para separar del arrabio el exceso de carbón y las impurezas; y escorias de horno de arco eléctrico, obtenidas en acerías de este tipo de horno en las que se produce acero a partir principalmente de chatarra. Estas últimas son de dos tipos: las negras, obtenidas en el proceso de fusión, y las blancas, procedentes de la fase de afino; las blancas se producen en menores cantidades y se caracterizan por su contenido en metales pesados. En las Tablas 11 y 12 se recogen datos sobre la composición química típica de las escorias de horno alto y de acería LD y de horno de arco eléctrico. Se observa el predominio de la sílice y del óxido cálcico, siendo, no obstante, las escorias de horno alto ricas también en alúmina, mientras que las de acería LD y las negras de horno de arco eléctrico lo son en óxido férrico.

Tabla 11. Composición química típica de diferentes escorias siderúrgicas francesas (Oteo, 1993).

Componente (%)	Escoria de horno alto	Escoria de acería LD
SiO_2	34-36	12-18
Al_2O_3	11-12	1
FeO	0,5-1	18-21
CaO	37-40	42-46
MgO	7,5-10	2-6
MnO	0,5-1	5-7
P_2O_5	0,2-0,3	1,5-3,5

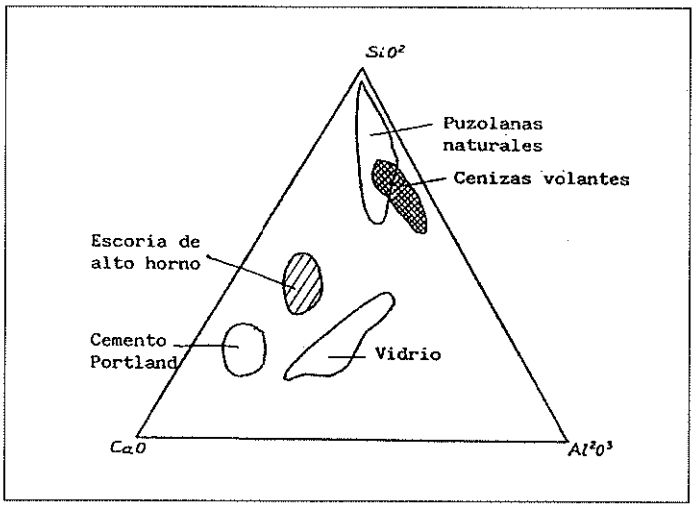


Figura 4. Comparación de la composición química de las escorias de horno alto con la de las cenizas volantes y otros materiales.

Tabla 12. Composición química de escorias de horno de arco eléctrico españolas (MMA, 2002).

Componente (%)	Escoria negras de acería de horno de arco eléctrico	Escoria blancas de acería de horno de arco eléctrico
SiO_2	11-25	17,3-19,3
Al_2O_3	—	3,2-10,4
FeO	3-25	0-0,95
Fe_2O_3	2-22	1,1-3,6
CaO	27-37	45,3-62,1
MgO	4-11	4,5-17,2
MnO	—	0-1,20,8
TiO_2	0,25-1,6	—
S	—	1,45-1,65
C	—	0-0,03

Las escorias de acería poseen propiedades claramente diferentes de las de hornos altos, ya que pueden contener hierro residual, cal libre y óxido de magnesio libre; estos dos últimos componentes proporcionan inestabilidad al material, siendo responsables de problemas de hinchamientos por reacciones de hidratación. Estos problemas de hinchamiento pueden ser menores si el material ha estado almacenado al aire libre un cierto tiempo, y si, en consecuencia, se ha producido una meteorización del mismo y una hidratación de los referidos óxidos.

En relación a la granulometría de los distintos tipos de escorias, el porcentaje de finos es reducido, y las escorias no son, en general, plásticas. El peso específico de la materia sólida de las partículas de escoria se sitúa entre 3,3 y 3,8 g/cm^3, en el caso de escorias de acería LD y de acería de horno de arco eléctrico, y entre 2,8 y 2,95, en el caso de escorias de hornos altos (Tabla 13). En el caso de las escorias de horno alto granuladas, el peso específico aparente de las partículas es notablemente menor (de 0,5 a 1,5 g/cm^3), debido al gran porcentaje de huecos que presentan.

Tabla 13. Propiedades físicas de diferentes tipos de escorias.

Propiedad	Horno alto cristalizada (factoría de Gijón) (MMA, 2002)	Acería LD (MMA, 2002)	Acería de horno de arco eléctrico (IHOBE, 1999)
Peso específico de los sólidos, g/cm^3	2,8-2,95	3,3-3,8	3,2-4,0
Peso específico aparente seco, g/cm^3	2,3-2,4	≥3	2,4-3,5
Absorción, %	3,7-4,2	<3	1-10
Porosidad, %	8-10	4,3	0,8-8,3

En los ensayos de compactación Proctor, las escorias muestran una relativamente pequeña influencia de la humedad, obteniéndose curvas bastante planas. Los óptimos de humedad suelen ser del 7 al 12%, con densidades máximas PN entre 1,75 y 1,90 t/m^3, y entre 1,80 y 2,10 t/m^3 en el PM. La compactación del material puede producir un cierto fraccionamiento de las partículas, debido a los huecos. No obstante, la resistencia a la meteorización, a la abrasión y al desgaste de estos materiales es, en general, alta. También son elevados los ángulos de rozamiento interno del material compactado, debido a la angulosidad de las partículas y al contenido de sílice.

En España, para la utilización de escorias de horno alto en capas de zahorra, el nuevo PG-3 exige que la desintegración por el silicato bicálcico y por el hierro, según la norma UNE-EN 1744-1, sea nula para estos materiales. Esto se debe a que la escoria cristalizada puede presentar dos tipos de inestabilidad química: una debida a la reacción de los componentes de hierro; y otra debida al bisilicato de calcio, que corresponde a un cambio de fase entre la forma metaestable "beta" y la forma "gamma" acompañado de un aumento de volumen del orden del 10% (MMA, 2002).

Las escorias de acería compactadas pueden experimentar hinchamientos debidos a reacciones de hidratación de la cal y magnesia libres, las cuales se manifiestan lentamente, pudiendo durar pocas semanas (hidratación de la cal libre) o varios meses (magnesia libre). En muestras de escoria LD, con contenidos máximos de cal libre del 4 al 5%, compactadas en Proctor normal, e inundadas en los propios moldes Proctor, se ha observado su posible hinchamiento libre (Choquet, 1984), registrándose valores del 1,5 al 3,5% al cabo de uno o dos meses. Los límites que se especifican para el contenido de cal libre dependen, en todo caso, del tipo de aplicación. En España, la nueva redacción

del PG-3 exige, para la utilización de áridos siderúrgicos de acería en zahorras, que su expansividad sea inferior al 5% según la norma UNE-EN 1744-1, (siendo la duración del ensayo de 24 horas cuando el contenido de óxido de magnesio, según la UNE-EN 196-2, sea menor o igual al 5%, y de 168 horas en caso contrario). Para reducir al mínimo estos fenómenos de inestabilidad volumétrica es frecuente dejar envejecer el material al aire libre, siendo necesario que haya aporte de agua, de lluvia o de riego.

Cuando el material procede de escombreras, la extracción puede verse dificultada, en algunos casos, especialmente si la escombrera es antigua, por la existencia de una cierta cementación del material como consecuencia de reacciones aglomerantes. En las labores de extendido debe procurarse homogeneizar al máximo el material. La compactación debe ser enérgica y con aporte de agua, procurando una humedad ligeramente por encima de la óptima, para compensar la absorción ocasionada por la porosidad de las partículas. Los rodillos vibratorios pesados son en general el tipo de compactador más adecuado, siendo conveniente utilizar posteriormente un compactador de neumáticos para el refinado de las capas, a fin de recebar los finos producidos por el proceso vibratorio. No obstante, es necesaria la realización previa de un tramo de ensayo para definir el sistema más conveniente de compactación.

5.3. Cenizas volantes y otros residuos de las centrales térmicas de carbón

La ceniza volante es el residuo sólido fino (tamaño polvo o limo) que es arrastrado por los gases de la combustión en su camino hacia la chimenea en las centrales térmicas de carbón, mientras que las cenizas más gruesas, tamaño arena o mayores (cenizas de hogar y escorias) caen al fondo en el hogar. Las cenizas volantes se separan de los gases mediante precipitadores electrostáticos o mecánicos, y se conduce a silos de almacenamiento en donde se guarda hasta su transporte fuera de la central. El origen de estos residuos se encuentra en el material incombustible presente en un cierto porcentaje en el carbón (antracita, lignito o hulla) quemado en la centrales. El total en peso de cenizas volantes oscila entre un 10% y un 30% de la masa de carbón consumida. En España, la producción anual de cenizas volantes se estima en unos 8 millones de toneladas

Las características fisicoquímicas de las cenizas volantes dependen de una serie de factores, tales como: composición química de los componentes incombustibles del carbón de origen, grado de pulverización del mismo, mezcla con otros combustibles, tipo de caldera, temperatura de combustión, tipo de extractor, sistema para retirar las cenizas de la central. La mayoría de las cenizas volantes presentan una composición química (Tabla 14) predominantemente sílicoaluminosa, siendo pobres en calcio y azufre (cenizas sílicoaluminosas). Existen, no obstante, otras cenizas, producidas en determinadas centrales térmicas (por ejemplo la central de Serchs, en España), ricas en CaO y SO_3 (cenizas sulfocálcicas), y que se suelen comportar, al igual que los cementos, como aglomerantes hidráulicos por la presencia de minerales cementicios (aluminato tricálcico, sulfoaluminato cálcico) en su composición; estas cenizas suelen denominarse activas o hidráulicas. Como relleno estructural, se utilizan las cenizas de tipo sílicoaluminoso. La propiedad química más importante de las cenizas

volantes sílicoaluminosas es su fuerte carácter puzolánico. Por lo que se refiere a la composición mineralógica, la mayor parte de los componentes se encuentran en fase vítrea.

Tabla 14. Composición química de cenizas volantes y otros materiales (Andrieux y Colombel, 1976).

Componente (%)	Cenizas Silico-Aluminosas	Cenizas Sulfo-Calcicas	Arcilla	Cemento
SiO_2	50	18	50,2	22
Al_2O_3	30	12	17	6
Fe_2O_3	7	7	7,6	3
CaO	2,5	45	5,1	65
MgO	1,8	1,8	7	—
SO_3	0,5	6	0,4	—
Na_2O, K_2O	5,8	8,2	1,4	1
TiO_2	1	—	—	—

Por lo que se refiere a las características físicas, la granulometría de las cenizas volante es tipo limo, comprendida entre 1 y 200 micras. El diámetro D_{50} suele estar entre las 8 y las 30 micras. Al microscopio aparecen como una mezcla de granos de formas y colores variados, generalmente con superficie lisa y brillante. Abundan las formas esféricas, macizas o huecas, y de aspecto vítreo, a veces con protuberancias que son esferas de menor tamaño. El peso específico aparente de las partículas es ligero (típicamente 1,9-2,4 g/cm^3) en comparación con los suelos naturales, lo cual se debe a la existencia de partículas huecas esféricas (cenosferas). En las Tablas 15 y 16 y en las Figs. 5 y 6 se muestran algunas características geotécnicas de las cenizas volantes.

Las cenizas volantes sílicoaluminosas se han venido utilizando con relativa frecuencia en la construcción de terraplenes (Fig. 7) desde hace bastantes años en países como Gran Bretaña o Francia. En España, los casos de utilización en terraplenes de carretera han sido hasta ahora más limitados, destinándose la mayor parte de la producción a la fabricación de cementos y hormigones, aunque sí se han construido grandes diques de cenizas compactadas, precisamente como sistema de almacenamiento y eliminación de las producidas en determinadas centrales térmicas. Presentan características peculiares con relación a los suelos convencionales que permiten contemplar una serie de ventajas e inconvenientes en este tipo de utilización. Así, las cenizas compactadas son sensiblemente menos densas que los suelos naturales, por lo que su utilización resulta ventajosa en caso de rellenos sobre suelos blandos, en la corrección de deslizamientos de ladera, o en terraplenes de acceso a puentes y obras de paso. Son también poco compresibles en relación a otros suelos, lo cual las hace muy apropiadas para rellenos de estribos de puentes. Su resistencia mecánica y su capacidad de soporte son satisfactorias, compactadas dentro de un margen de

humedades relativamente amplio (ángulos de rozamiento por encima de los 30º). Algunas cenizas, además, experimentan un autoendurecimiento con el tiempo, al desarrollarse una cementación entre las partículas como consecuencia de reacciones puzolánicas debidas a una cierta presencia de cal libre en su composición (Pardo de Santayana, 1993).

Tabla 15. Resumen de características geotécnicas típicas de las cenizas volantes.

Propiedad	Valor o intervalo
Granulometría: — pasa por el tamiz #200	Tipo limo 80-95%
Límites de Atterberg	No plásticas
Peso específico de las partículas	20-24 kN/m^3
Contenido de materia orgánica	0,5-2,0 %
Contenido de sales solubles	0,3-2,0 %
Contenido de sulfatos	0,1-1,5 %
Permeabilidad (compact. PN)	10^{-4}-10^{-5} cm/s
Compactabilidad (Proctor normal): — densidad máxima PN — humedad óptima PN	 1,0-1,5 g/cm^3 15-45 %
Resistencia a compresión simple (PN)	100-400 kPa
Resistencia al corte, con drenaje (PN): — c' — ϕ'	 0-20 kPa 28º-40º
Características edométricas: — módulo edométrico (presiones entre 40 y 150 kPa) — índice de compresión, Cc — índice de hinchamiento, Cs	 9-20 MPa 0,05-0,1 0,005-0,01

Tabla 16. Resultados de ensayos triaxiales sobre muestras de cenizas volantes españolas compactadas en Proctor Normal (Pardo de Santayana, 1993).

Ceniza volante	Triaxial UU		Triaxial CD	
	Cu (kg/cm^2)	ϕ_u (grados)	C' (kg/cm^2)	ϕ' (grados)
LOS BARRIOS CCS	1,07	29,9	0,50	35,4
PUERTOLLANO	0,40	37,4	0,30	35,4
LOS BARRIOS CCE	0,87	32,0	0,58	31,8
LADA CCF	0,60	31,4	0,40	30,7
LADA CSF	0,50	34,1	0,25	32,4
LOS BARRIOS CM	1,20	33,0	2,20	37,5

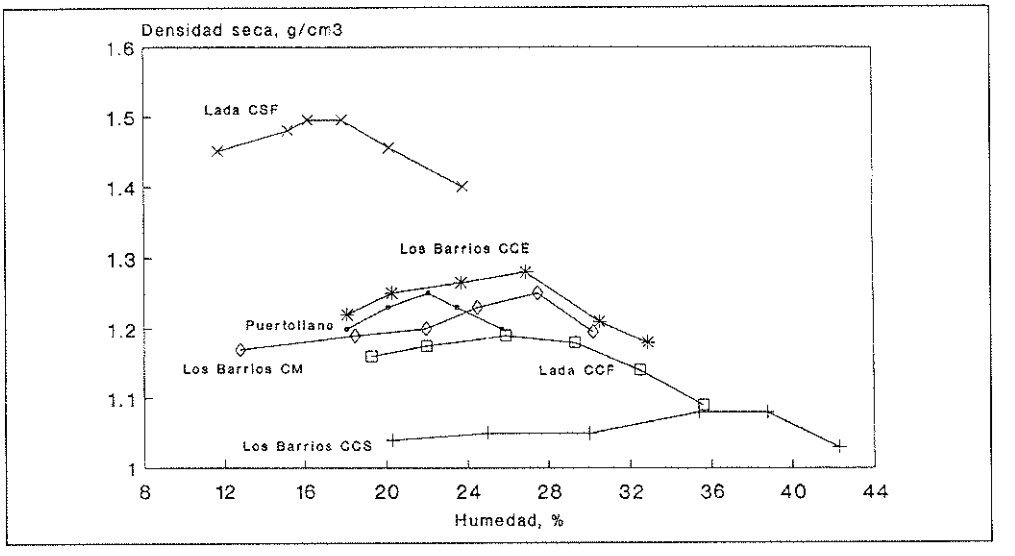


Figura 5. Curvas de compactación Proctor normal de varias cenizas volantes españolas (Pardo de Santayana, 1993).

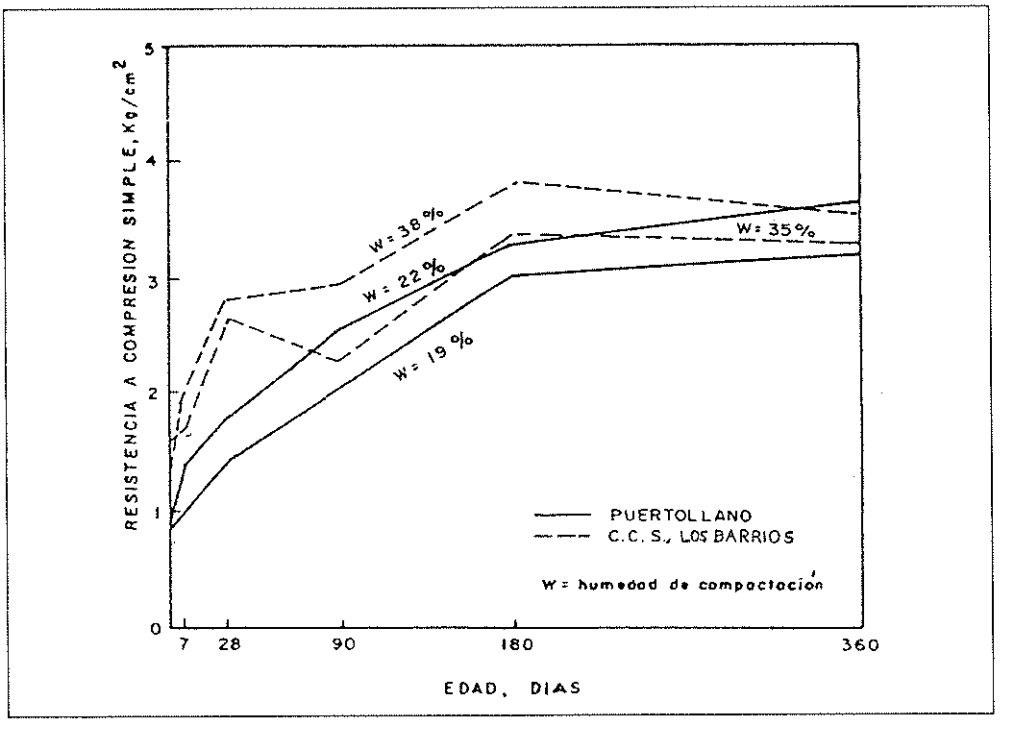


Figura 6. Evolución de la resistencia a compresión simple de muestras de ceniza volante de Puertollano y Los Barrios compactadas en Proctor Normal (Pardo de Santayana, 1993).

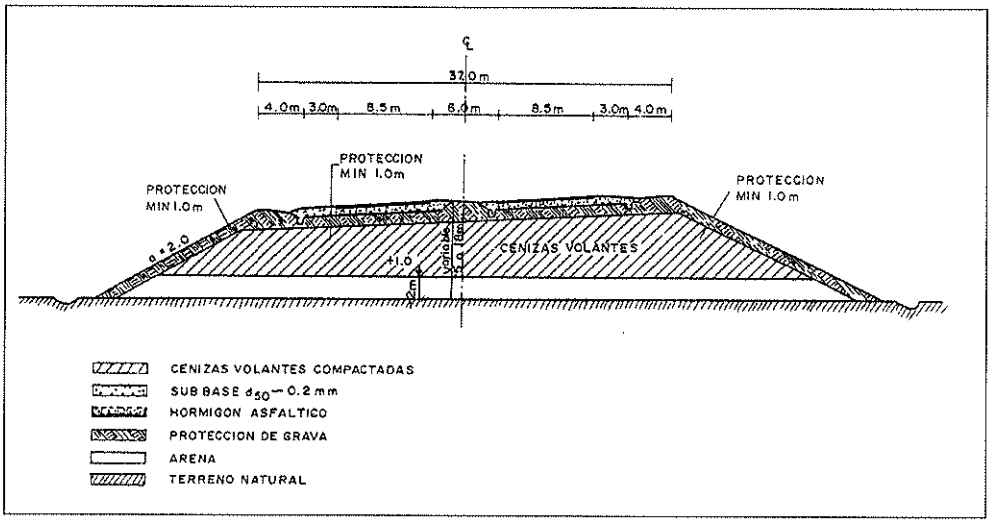


Figura 7. Terraplén de cenizas volantes realizado en la autopista de Amager, Dinamarca.

Por lo que respecta a las cenizas de hogar, que junto con las escorias constituyen cerca del 20 % del total de cenizas producidas en las centrales térmicas, en Europa encuentran utilización, principalmente, en la fabricación de bloques ligeros de hormigón y en terraplenes. Las escorias se han utilizado como áridos en capas granulares de bases y subbases, sólo de carreteras secundarias, debido a su insuficiente resistencia y durabilidad si se comparan con los materiales convencionales (MMA, 2002).

6. ALGUNOS DATOS SOBRE OTROS RESIDUOS Y SUS APLICACIONES EN OBRAS GEOTÉCNICAS

6.1. Neumáticos fuera de uso

Los neumáticos fuera de uso (NFU) encuentran aplicación en algunos países, ora troceados y granulados, ora enteros, como material ligero en rellenos y en la construcción de terraplenes. Otras aplicaciones más extendidas de estos materiales son la valorización energética y la fabricación de betunes-caucho, o directamente como áridos en mezclas bituminosas para carreteras. La producción anual de estos materiales en los países desarrollados se suele calcular a partir de la relación 1 NFU/hab/año y un peso medio de 6,5 kg/NFU. En España, gran parte de esta producción acaba en vertedero.

Los neumáticos usados enteros se pueden emplear en capas de refuerzo sobre suelos blandos en la construcción de carreteras, o como barreras sónicas; en rellenos sanitarios pueden emplearse en capas de recolección de lixiviados. Desmenuzados, los neumáticos usados se pueden aprovechar como material de relleno ligero en obras de carretera.

Las Figs. 8 y 9 corresponden a un caso reciente de utilización de NFU enteros en un terraplén de la autovía IP3, en Portugal, cerca de la localidad de Castro-Daire (Fortunato et al., 2005). Fueron utilizados con el objetivo de reducir el efecto Martson, o sea los asientos diferenciales entre el relleno construido sobre una obra de paso inferior y el relleno en las zonas colindantes. Fueron utilizadas 7 capas de neumáticos, cada una con 0,50 m de espesor, previéndose, para estas capas, un módulo de deformación del 20% del correspondiente a las capas de suelo utilizadas en el terraplén.

En relación a los neumáticos troceados, su principal ventaja en rellenos deriva de que su peso específico es menor que el de los suelos normales. Asimismo, el empuje lateral de este tipo de material de relleno es relativamente bajo, inferior incluso al 50% del de un relleno de gravas, por lo que resulta muy adecuado para estribos de puente, o en el trasdós de muros. Otras características son su baja conductividad térmica (y por lo tanto su alta resistencia a la helada) y su alta permeabilidad. Desde el punto de vista granulométrico, el material se compone de trozos de tamaños entre 1 y 15 cm, predominantemente, aunque son admisibles tamaños mayores, hasta de 60 cm, en pequeña proporción. La forma es irregular, y contienen una cierta cantidad de refuerzos de acero, formados por hilos de diámetros variables, entre unas décimas de milímetro y el milímetro, normalmente. El peso específico del material suele variar entre 1,21 y 1,27 g/cm^3. Colocados en obra y compactados, el peso específico oscila entre los 700 y los 900 kg/m^3.

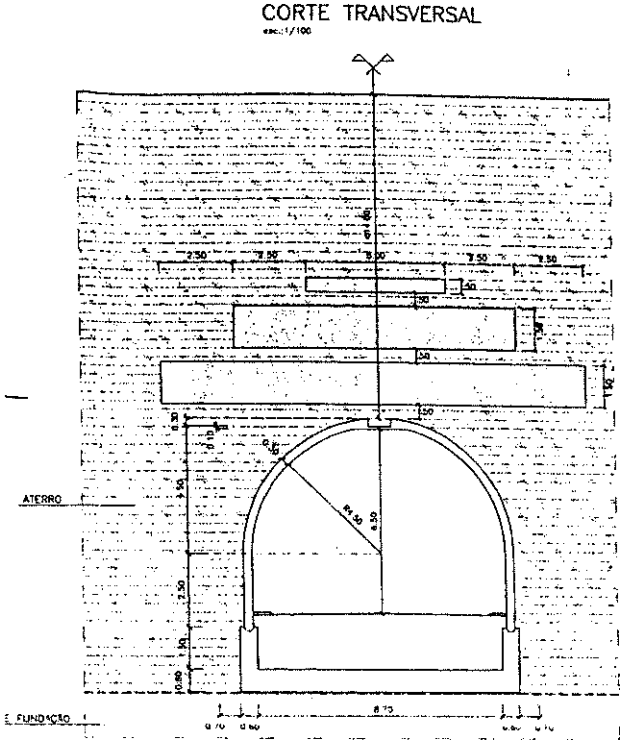


Figura 8. Perfil longitudinal del terraplén del IP3 mostrando la localización de las capas construidas con neumáticos enteros para reducir el efecto Martson sobre el paso inferior (Fortunato et al. 2005).

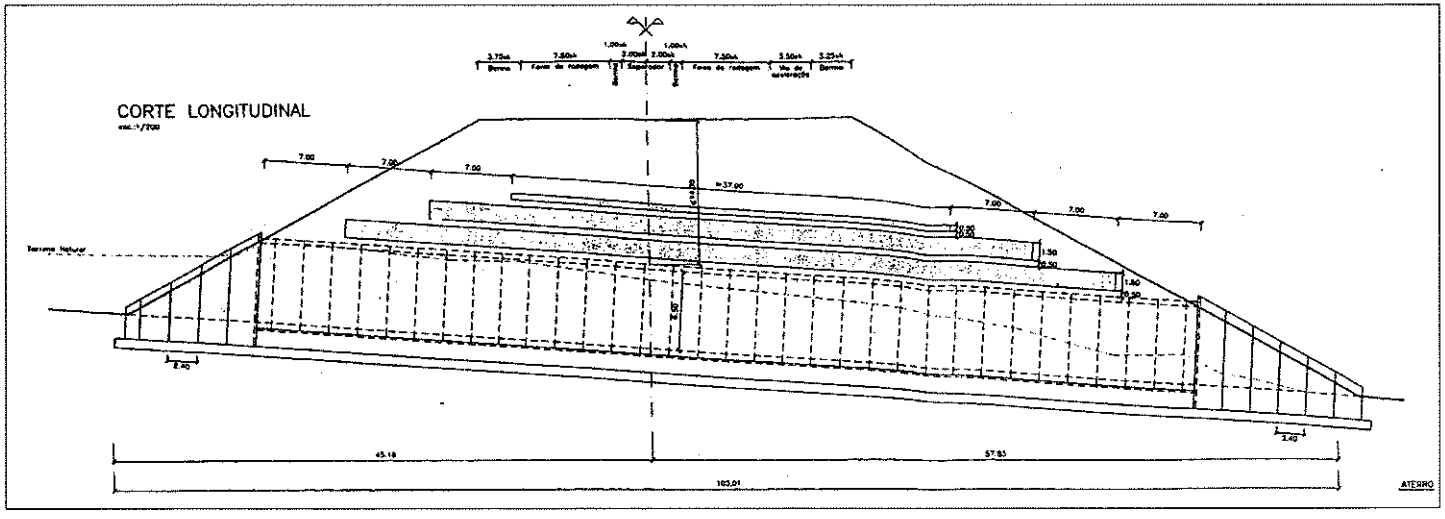


Figura 9. Perfil transversal del terraplén del IP3, en Castro-Daire, Portugal (Fortunato et al. 2005).

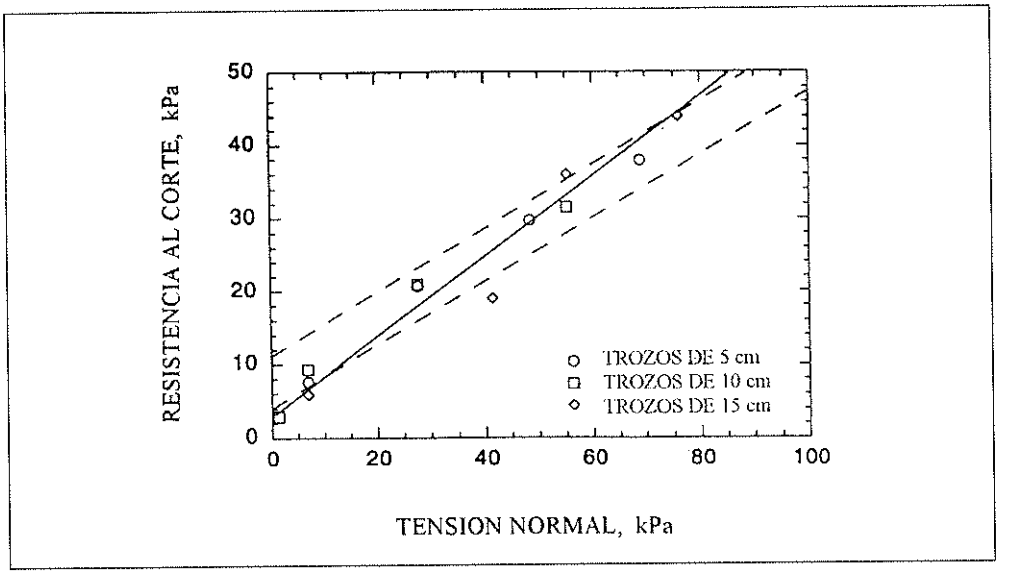


Figura 10. Resistencia al corte de neumáticos troceados en ensayos de corte directo en caja de 30 cm de diámetro por 30 cm de altura (Foose et al., 1996).

La propiedad de los neumáticos troceados más cuestionada en un principio es la compresibilidad, la cual es considerable durante la primera carga, alcanzando el 10-13% del volumen inicial. No obstante, la mayor parte de la compresión es de tipo plástico, por lo que la compresibilidad decrece substancialmente una vez que el material haya experimentado una primera aplicación de carga. Los terraplenes construidos con neumáticos troceados son, en general, de pequeña altura, de hasta 4 a 5 m, y tanto en ellos como en diversos terraplenes de ensayo realizados con estos materiales, se ha comprobado que la colocación de una capa de un metro de tierras por encima del relleno de neumáticos reduce significativamente su compresibilidad y por tanto las deformaciones de tracción en el pavimento, las cuales sí serían apreciables con una cobertura más fina. Por lo que se refiere a la resistencia al corte del material compactado, los ensayos descritos por Foose et al. (1996), realizados en caja de corte directo de 30 cm de diámetro por 30 cm de altura dan un ángulo de rozamiento, ϕ', de 30° y una cohesión, c', de 3 kPa (Fig. 10). El criterio de rotura, al no manifestarse normalmente una tensión de pico, fue el de la tensión correspondiente al desplazamiento máximo durante el corte, que era de 2,5 cm. Otros autores dan ángulos de rozamiento entre 19° y 25°, junto con cohesiones de 4 a 11 kPa. Las observaciones en campo de los taludes en estos materiales muestran con frecuencia ángulos de más de 45°, e incluso de hasta 85° en las zonas de acopio. Debe destacarse que en los EE.UU., en 2004, se utilizaron 60 millones de neumáticos en este tipo de aplicación, siendo una de las actividades de valorización de más rápido crecimiento, y existiendo guías de utilización y especificaciones de construcción, como la "ASTM

D6270-98, Standard Practice for Civil Engineering Applications of Scrap Tires", que proporciona información sobre las propiedades geotécnicas, métodos de ensayo y recomendaciones constructivas (Humphrey, 2005).

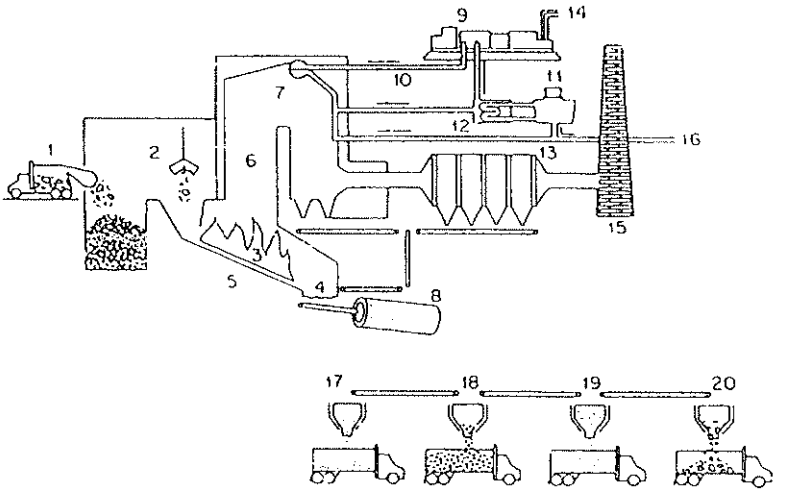
6.2. Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos

En las plantas de incineración de basuras domésticas y urbanas se producen, básicamente dos tipos de residuos. Por un lado, la combustión de estas basuras deja un residuo tipo cenizas de hogar o escoria, que contiene hierro y otros metales, vidrio y cenizas, junto con pequeñas cantidades de materiales no quemados, tales como papel, trapos, plásticos, materia vegetal, etc. Por otro lado, a semejanza de lo que sucede en las centrales térmicas de carbón, los gases de la combustión arrastran consigo partículas sólidas que son separadas de estos gases antes de su salida por la chimenea, y que constituyen lo que se conoce por cenizas volantes de incineración de basuras. Los dos tipos de residuos se producen y se retiran de la incineradora normalmente de forma separada (Fig. 11).

En España el reciclaje de escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos es muy reducido, y la producción no es muy grande (450.000 t de escorias y 30.000 t de cenizas, datos del año 2000; MMA, 2002). Su utilización en la construcción puede presentar problemas medioambientales, debido al contenido de elementos tóxicos (en función de cada escoria en particular), y problemas técnicos, ya que pueden ser altamente expansivas (MMA, 2002).

Tabla 17. Composición química de escorias de incineradora británicas (BS 6543:1985).

COMPONENTE	%
SiO_2	35-55
Al_2O_3	22-23
Fe_2O_3	9-26
CaO	5-6
MgO	0,5-0,7
Na_2O	2-4
K_2O	<0,5
TiO_2	0,5-0,6
SO_3	<1
Pérdida al fuego	2-15



1. AREA DE RECEPCION
2. GRUA
3. COMBUSTION
4. CENIZA
5. DESCARGADOR DE CENIZA
6. GASESDE COMBUSTION
7. HORNO
8. CRIBA
9. TURBOGENERADOR
10. VAPOR
11. TORRE DE ENFRIAMENTO
12. CONDENSADOR
13. PRECIPITADOR
14. TOMA DE ELECTRICIDAD
15. CHIMENEA
16. EFLUENTE PARA ENFRIAMIENTO Y TRATAMIENTO
17. ALUMINIO
18. METAL MAGNETICO
19. METALES PESADOS NO MAGNETICOS
20. ARIDO

Figura 11. Técnica de separación de ceniza en una planta incineradora de residuos sólidos urbanos.

La composición del residuo tipo escoria varía con la tecnología de fabricación, especialmente con el grado de incineración, que determina el contenido de materias putrescibles de estos materiales. Por otro lado, estos residuos pueden experimentar, una vez producidos, un proceso de elaboración, con el objeto de separar algunos de sus componentes para su posterior reutilización, y con objeto también de obtener un producto final aprovechable. Así, puede someterse el material a un proceso de cribado, y de separación de metales, principalmente. Se suelen extraer por separado el aluminio, por un lado, el hierro y los metales magnéticos, por otro lado, y finalmente el resto de metales.

El tiempo de almacenamiento produce modificaciones en la composición de los residuos. Es frecuente que después de varios meses se desarrolle una cementación que confiere a estas escorias un comportamiento de roca débil. La composición química típica de las escorias de incineradora (en Gran Bretaña) se recoge en la Tabla 18. El contenido en hierro y metales (de 5% a 25%, según datos franceses) varía según se haya sometido el residuo a desmetalización. El contenido en materias putrescibles puede variar entre el 2% y el 25% (incineradoras francesas), dependiendo del grado de incineración experimentado. Por otro lado, estas escorias pueden presentar contenidos apreciables de metales pesados y elementos tóxicos solubles, que deben conocerse para decidir sobre las posibilidades de utilización de estos materiales.

Tabla 18. Características geotécnicas de las cenizas volantes de la incineradora de Brooklin (Poran et al. 1989).

PROPIEDADES	Ceniza sin estabiliz.	CV +5%CAL	CV +10%CAL	CV +5%CEM.	CV +10%CEM.
Densidad máxima, PN, kN/m^3	13,5	13,5	13,6	13,6	14,1
Humedad óptima, PN, (%)	23	23,5	24	23,8	24,5
Permeabilidad, (10^{-6} cm/seg)	10000	93	85	89	85
Cu, Triaxial UU, (PN), (kPa)	65	100	137	106	173
ϕ, Triaxial UU, (PN), (grados)	43	45	45	44	44
Indice CBR, a 4 días, (%)	44	80	119	78	92
Hinchamiento CBR, a 4 días, (%)	0	0,8	1,3	0	0
Indice CBR, a 28 días, (%)	44	83	122	105	132
Hinchamiento CBR, a 28 días, (%)	0	6,4	9,4	0	0

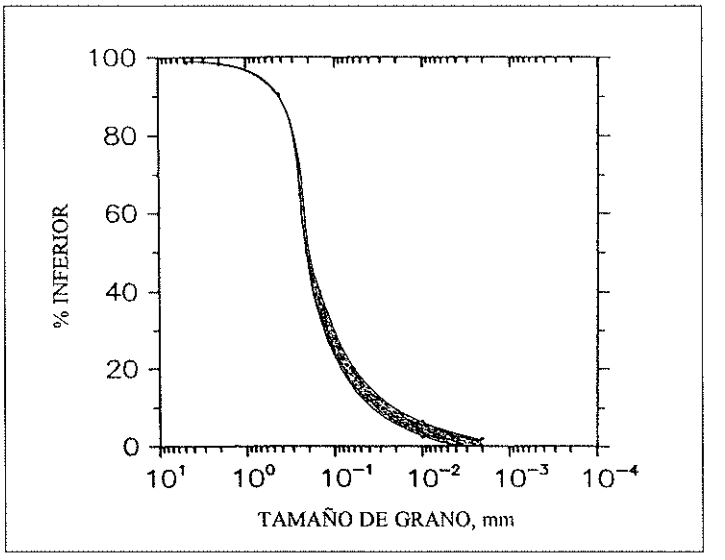


Figura 12. Curvas granulométricas de cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos (Poran et al., 1989).

En varios países europeos y en Estados Unidos, las cenizas de hogar o escorias se pueden utilizar en carreteras (capas de subbase), terraplenes o bloques de hormigón prefabricado. Según el SETRA francés (1992), los parámetros determinantes de las posibilidades de utilización serían tres: el grado de incineración experimentado, el hecho de haberse sometido a un proceso de elaboración (desmetalización, cribado, homogeneización) y de almacenamiento (envejecimiento) de varios meses, y finalmente, el contenido en elementos tóxicos solubles. El grado de incineración puede examinarse mediante el porcentaje de pérdida al fuego a 500°. Se considera que el grado de incineración es suficientemente alto para la utilización del material en rellenos si la pérdida al fuego en el análisis químico es inferior al 5%. Las escorias mal incineradas y no sometidas a un proceso de elaboración, en principio, no son utilizables en terraplenes de carreteras por los riesgos de polución y de mal comportamiento mecánico.

Por lo que respecta a las cenizas volantes producidas en las incineradoras, en general se considera que no deben mezclarse con las escorias, pues limitarían las posibilidades de utilización de éstas en carreteras, ya que causarían riesgos altos de polución (metales pesados, principalmente). No obstante, existen algunos estudios que indican que los componentes tóxicos de las cenizas (metales pesados, dioxinas y otros) se presentan en muy pequeñas cantidades, y que en las incineradoras modernas de alta temperatura las cenizas producidas son prácticamente inertes. La Tabla 19 recoge algunas características geotécnicas de las cenizas de incineradora Brooklin, Nueva York, solas y tratadas con cal o con cemento. La granulometría de estas cenizas (Fig. 12) es la correspondiente a la de una arena limosa y sus propiedades físicas no son muy diferentes de las de las cenizas volantes del carbón. El tratamiento con cemento reduce los riesgos de polución y mejora las propiedades mecánicas.

6.3. Otros residuos

Los escombros de hormigón se utilizan en carreteras fundamentalmente en bases y subbases, como árido. Normalmente se exigen, en la mayor parte de los países que permiten esta utilización, las mismas especificaciones que al árido natural, imponiendo además un contenido mínimo de hormigón y un máximo de impurezas (aglomerado bituminoso, yeso, etc.). En capas granulares sin tratar, aunque inicialmente su capacidad de soporte es inferior a la de capas granulares convencionales, con el tiempo se suelen cementar e igualar o superar el comportamiento de estas últimas. La mezcla con arena facilita la trabajabilidad y disminuye la permeabilidad (MMA, 2002).

Los áridos reciclados procedentes de la demolición de pavimentos de hormigón pueden utilizarse en la ejecución de terraplenes y rellenos, aunque la aplicación más común es también en capas de base o subbase granulares de nuevos firmes, tratadas o sin tratar. (MMA, 2002).

Entre otros residuos que se están estudiando actualmente, especialmente en los países escandinavos, para aplicación en terraplenes y obras de carretera, se puede mencionar la espuma de vidrio granulada (10-60 mm), producida a partir de una tecnología de reciclaje de residuos tóxicos, desde lámparas de mercurio, cenizas y escorias industriales, tubos de televisión y de ordenadores, y hasta baterías. El proceso se basa en el concepto de transformar polvo de vidrio finamente triturado, procedente de diferentes materiales, mezclado con un activador como carburo de calcio, en espuma de vidrio. En el proceso de molienda, los metales pesados son separados para su recuperación, y el polvo pasa sobre cintas transportadoras a hornos a alta temperatura donde se expande y sale transformado en espuma, fracturándose a la salida por efecto del choque térmico. El material tiene propiedades aislantes y peso específico ligero (350-400 kg/m^3), pudiendo usarse en rellenos ligeros y como capa aislante contra el hielo, en obras de carretera y otras aplicaciones de ingeniería civil (Aabøe et al., 2005).

7. CONSIDERACIONES FINALES

Actualmente, la reutilización de residuos en obras de ingeniería civil debería ser, más que una opción, una obligación. Con esta actividad, que responde a los principios del desarrollo sostenible, se podría conseguir una reducción considerable de los millones de metros cúbicos de suelos y áridos naturales utilizados cada año en obras de carreteras y en estructuras de tierra. Sin embargo, bajo ninguna circunstancia la calidad y la racionalidad económica de los proyectos de ingeniería civil deben verse afectadas por la utilización de materiales y técnicas diferentes de las tradicionalmente establecidas. Además, para poder utilizar residuos en obras, en general, y en aplicaciones geotécnicas, en particular, no solo es necesario que se satisfagan una serie de requisitos técnicos, sino también medioambientales y económicos. En relación a estos últimos, muchas veces los costes del transporte son decisivos.

El aprovechamiento de residuos en obras geotécnicas, de gran interés para absorber considerables cantidades de residuos, ha experimentado un creciente interés en España en los últimos años. Se ha hecho referencia a algunas de las dificultades que se encuentran normalmente cuando se trata de implementar políticas para promocionar el aprovechamiento de los residuos en obras geotécnicas y las formas de superarlas, y se han mencionado algunos de los requisitos básicos de los programas para desarrollar estas actividades, así como los agentes que se deben involucrar en las mismas.

Del punto de vista de la ingeniería, se considera que uno de los pasos fundamentales para impulsar el aprovechamiento de los residuos es realizar una adecuada caracterización de los materiales en laboratorio, teniendo en cuenta su naturaleza, a menudo muy diferente de la de los suelos convencionales, y definir los requisitos realmente necesarios para estos materiales, que pueden diferir de los establecidos para los materiales convencionales. Igualmente, la construcción de tramos experimentales, su control y monitorización, y un análisis juicioso de los resultados, son también pasos decisivos en el fomento de la utilización de los residuos en las obras de ingeniería, y en especial en las aplicaciones geotécnicas.

Finalmente, se han descrito brevemente las características de algunos residuos cuya utilización en aplicaciones geotécnicas es práctica común en muchos países, y, para algunos de ellos, también en España. Este tipo de actividad habrá de continuar a desarrollarse rápidamente en nuestro país para cumplir las exigencias medioambientales y de desarrollo sostenible que los países de la Comunidad Europea se imponen.

REFERENCIAS

Aabøe, R.; Oíste, E.; Hägglund, J. (2005). Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications. Workshop on Recycled materials in road and airfield pavements. 7th Int. Conf. BCRA'05, Oslo Noruega, 25 de junio.

Almeida, A.; Lopes, M. L.; Bastos, A. M.; Figueiras, J. (2004). A abordagem da LIPOR à solução da valorização de resíduos. Seminário sobre valorização de resíduos em obras geotécnicas. SPG, UM, Guimarães, Portugal.

Andrieux, P. y Colombel, J.H. (1976). Utilisation des cendres volantes en technique routière. Bull. Liaison. Labo. P. et Ch. 83, mayo-junio.

British Standard Institution (1985). British Standard Guide to Use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering. BS 6543:1985.

Celemín Matachana, M. (2005). Los residuos en la construcción de infraestructuras viarias. Conferencia impartida en el Centro de Congresos del *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*, Lisboa, 3 de febrero.

Chesner, W. H., Collins, R. J., e MacKay, M. H. (1998). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* Report nº FHWA-RD-97-148. Commack: Turner-Fairbank Highway Research Center. Federal Highway Administration. Estados Unidos.

Colombel, J.H.; Nissoux, J. L. (1998). Exigences de qualité. Caractéristiques des matériaux employés en génie civil. Seminario sobre Utilisation des déchets dans le génie civil, ENPC, Paris, Francia.

Foose, G. J. et al. (1996). "Sand Reinforced with Shedded Waste Tires". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 122, Nº 9, septiembre.

EC (1999). Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts. Report to DGXI, European Commission. Report by Symonds, in association with ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum.

Enviros (2001). Recycled materials in highway construction and house building. Final version CAN: ES0075006, relatório para ReMaDe Essex. Londres, Reino Unido, Agosto.

Fortunato, E.; Pardo de Santayana, F.; Roque, A. (2005). Valorization of waste materials in geotechnical works. Current state of their use in Portugal. Informe LNEC, Lisboa, Portugal.

González Cañibano, J. (1987). Utilización de los residuos de las minas de carbón en obras públicas. Curso sobre obras de materiales sueltos no convencionales. CEDEX, Madrid, junio.

González Cañibano, J. (1993). Estériles de carbón: aplicación de obras viarias. Curso sobre geotecnia ambiental. CEDEX, Madrid, marzo.

González Cañibano, J., Pardo de Santayana, F., Sopeña, L., Torres, M., Pérez, J.J., Martínez, C. e González, M.R. (1996). Utilización de estériles de carbón como material de relleno para estructuras de tierra reforzada. III. Construcción de una estructura experimental. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. Nº 124/Out. Nov. Dez. 1996, Madrid, España.

Hinojosa, J.A. y Glez. Cañibano, J. (1994). Construción de terraplenes con residuos del carbón. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, septiembre.

Humphrey, D. E. (2005). Tire Derived Aggregate – A New Road Building Material. *Miniseminar on Shredded tires. A civil engineering Product for the future. Vegdirektoratet*, Oslo, Noruega, 30 de junio de 2005.

IHOBE (1999). Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acería. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, España.

Jullien, A. (2004). Panorama du recyclage dans les infrastructures routières françaises: le projet OFRIR. Seminário sobre valorização de resíduos em obras geotécnicas. SPG, UM, Guimarães, Portugal.

MMA (2002). Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Ministerio de Medio Ambiente, Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica. Serie Monografías. Madrid, España.

Oteo Mazo, C. (1993). Escorias: Propiedades y aplicaciones geotécnicas. Curso sobre geotecnia ambiental. CEDEX, Madrid, marzo.

Pardo de Santayana, F. (1993). Comportamiento geotécnico de cenizas volantes en rellenos compactados y su evolución a lo largo del tiempo. Monografías CEDEX, M-32. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.

Pardo de Santayana, F., Glez. Cañibano, J. y Torres Alonso, M. (1994). Utilización de estériles de carbón en rellenos de tierra reforzada. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo, septiembre.

Pardo de Santayana, F. (1997). Utilización de residuos y otros materiales no convencionales en terraplenes. Curso de Geotecnia Vial, terraplenes y pedraplenes, desmontes y drenajes. Intevía, Madrid, España.

Poran, C. J. y Ahtchi-Ali, F. (1989). Properties of solid waste incinerator fly ash. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 115, nº 8, agosto.

SETRA-LCPC, (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique. Francia, septiembre.

CAPÍTULO 2

INVESTIGACIÓN DE LA ROTURA DEL DEPÓSITO DE ESTÉRILES. MINAS DE AZNALCÓLLAR (SEVILLA)

Rafael Portilla Hermosilla

Director de la División de Ingeniería del Terreno
Eptisa, Servicios de Ingeniería, SA.

0. INTRODUCCIÓN

La localidad de Aznalcóllar está situada a 37 km al NO de Sevilla. El área, que forma parte de la Faja Pirítica Ibérica, tiene una tradición minera de siglos, que se remonta al 3.000 a. C.

El depósito de estériles de la mina de Aznalcóllar fue proyectado en 1978, comenzando su operación en 1979. Es aproximadamente rectangular, con cerca de 2.000 m en la dirección N-S y de 1.000 m en la E-O (Fig. 1a), con un área de 200 Ha y una capacidad final próxima a 32 Hm^3. Está dividido por un espigón de dirección Este-Oeste en dos balsas, la de piritas al Sur y la de piroclastos al Norte. El depósito esta cerrado por el oeste por una ladera natural, y por los lados Norte, Sur y Este por un dique, de altura máxima en el momento actual de 27 metros, y un ancho en coronación del orden de 25 m (lado Este).

El dique se encuentra asentado sobre una terraza aluvial, de unos 4 m de espesor, y subyacente se encuentran las denominadas "margas azules" del Guadalquivir (Fig. 1b).

El depósito de estériles se rompió, por su dique Este, en la madrugada del 25 de Abril de 1998, produciendo un gran vertido de estériles sólidos y agua al cauce del río Agrio. (Figs. 2 y 3).

Los trabajos de investigación se llevaron a cabo entre Mayo y Septiembre del 98, comprendiendo una campaña de campo, en la que se ejecutaron más de 2.000 m de sondeos, y se instaló un sistema de instrumentación para su auscultación, llevándose a cabo un extenso programa de laboratorio, que incluía más de 1.000 ensayos.

La investigación puso de manifiesto que los desplazamientos finales estuvieron controlados por la estructura de las margas, a través de su estratificación y diaclasado vertical. La rotura se originó por una sobrecarga del cimiento margoso por encima de su resistencia de "pico". El proceso de rotura fue de naturaleza progresiva y estuvo condicionado por las presiones intersticiales inducidas por la construcción del depósito.

Además, con la desestabilización inicial, se llegaron a licuefactar los residuos piríticos, aumentando así la presión sobre el dique, al tiempo que se reducía la resistencia del cimiento, lo que explica la excepcional magnitud de los desplazamientos. Mientras que el comienzo de la inestabilidad fue lento y progresivo, la fase final del movimiento consistió en una rotura rápida y sin drenaje.

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL DIQUE Y RESÍDUOS ALMACENADOS

El diseño geométrico final de los diques fue el siguiente:

Cota de coronación:	72,04 m, con una altura máxima sobre cimientos de 30,0 m
Taludes del dique:	"aguas abajo" 1,3H/1V y "aguas arriba" 1,9H/1V
Ancho inicial en coronación:	14 metros (7 m espaldón, y 7 m pantalla de raña)

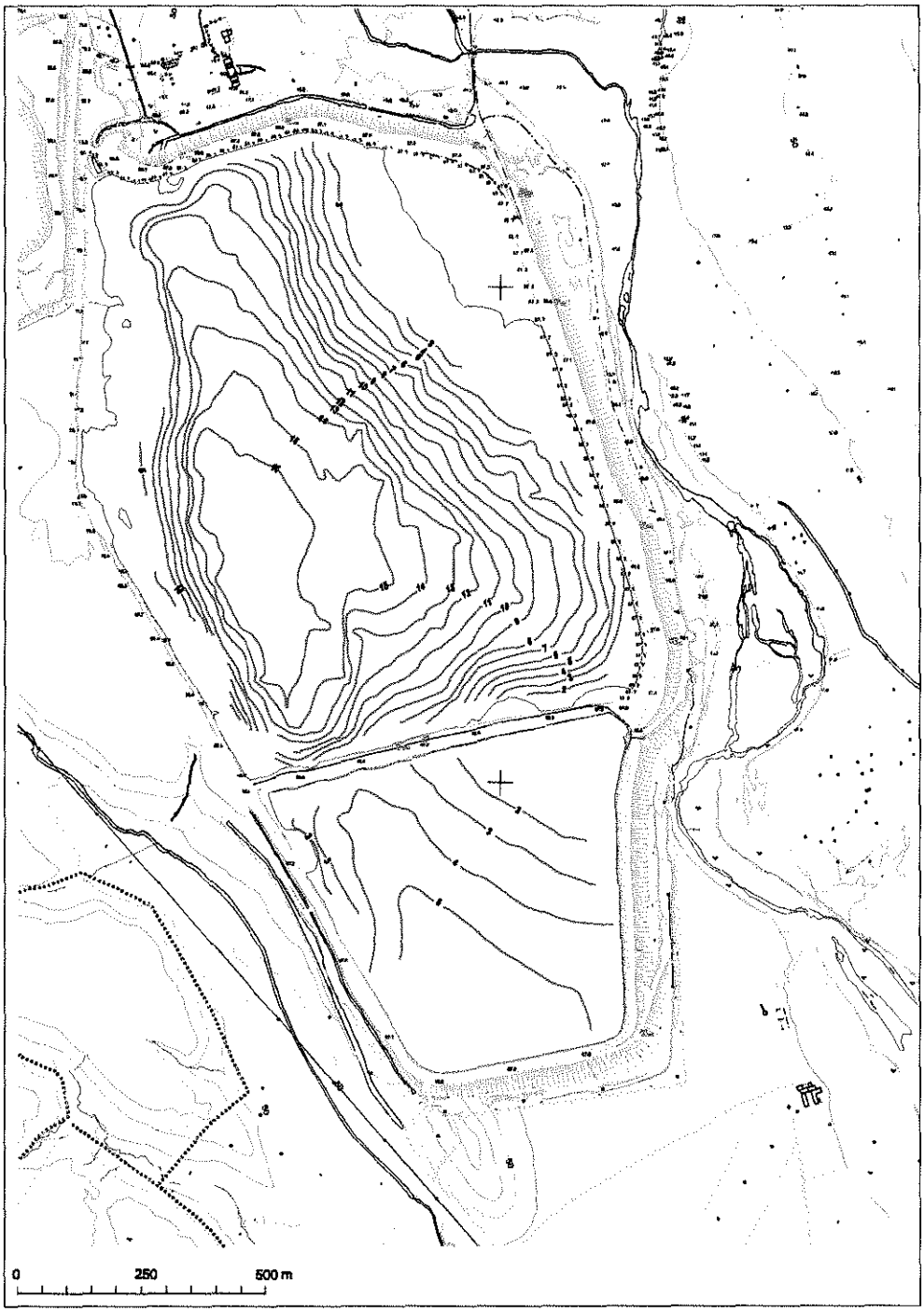


Figura 1a. Barimetría en las balsas del depósito de estériles, en diciembre de 1987.

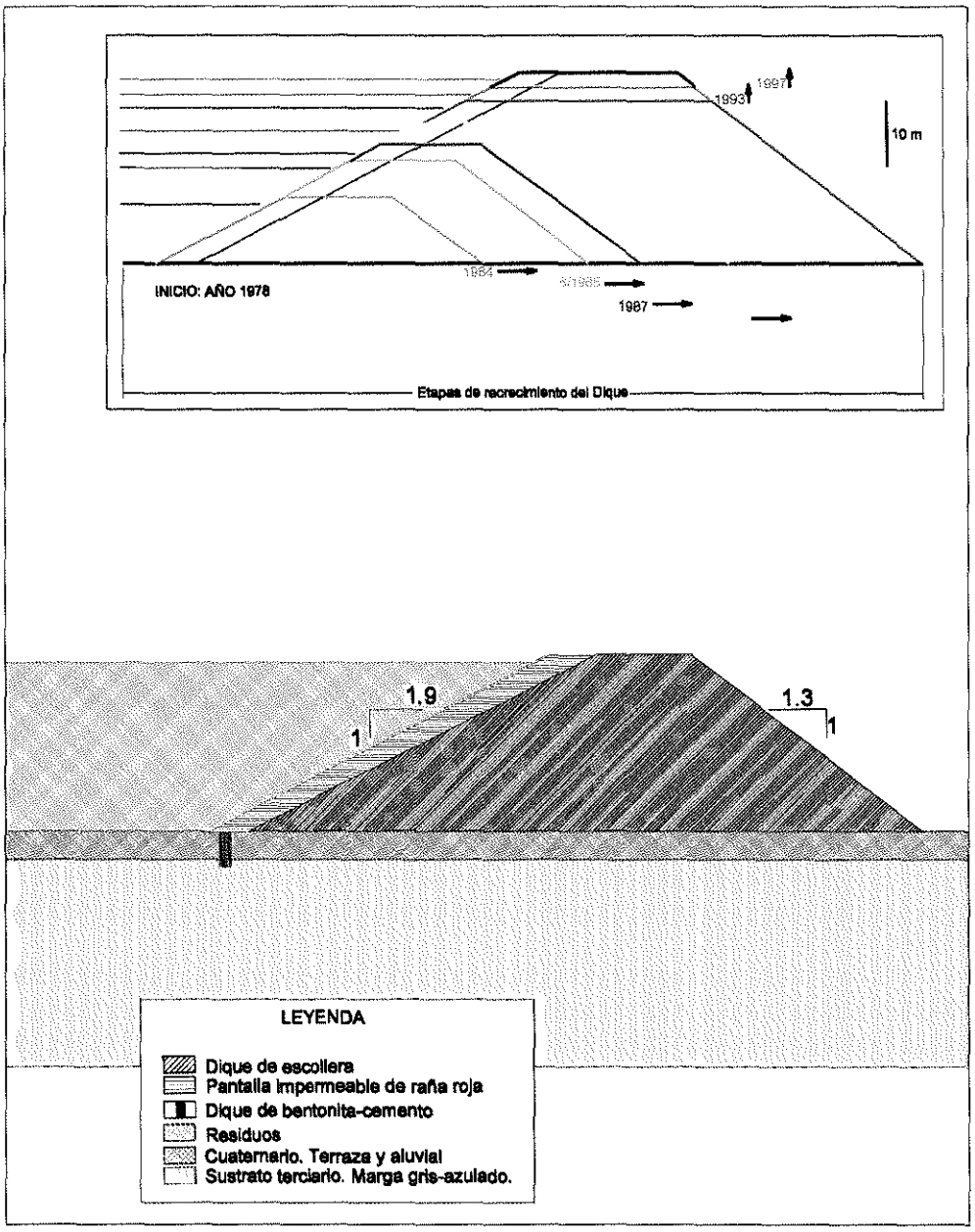


Figura 1b. Sección tipo del Dique del Depósito de Estériles.

Figura 2. Rotura del depósito.

La construcción del depósito se realizó en etapas durante los años 1978 a 1998 (ver Fig. 1), según las necesidades operativas de la mina, y el llenado fue paralelo al recrecimiento. Cabe resaltar el fuerte aumento de anchura del dique que se realizó entre 1988 y 1993.

El dique inicial, se construiría con materiales aluviales del vaso, y se impermeabilizaría con una pantalla de bentonita-cemento de 60 cm de espesor, empotrada 1,5 m en la marga, con objeto de impedir las filtraciones a través del contacto terraza aluvial-marga.

Aguas arriba, el espaldón del dique se recubriría de una pantalla impermeable de raña roja de 7 metros de anchura horizontal. El espaldón del dique estaría compuesto por un material "todo-uno" esquistoso compactado, procedente de la roca estéril de la corta Aznalcóllar. Se compone de bolos, gravas, arenas y un 30% de finos sin prácticamente plasticidad. Su resistencia se ha estimado en 40°, con una cohesión aparente de unas 3 t/m^2.

Se fueron depositando dos tipos de residuos: los residuos de pirita y los de piroclasto. Los residuos piríticos provienen de la molienda y flotación de minerales de sulfuros masivos, mientras que los piroclásticos son el resultado del tratamiento de una zona con cobre diseminado, a techo del yacimiento. Dada la naturaleza no plástica de éstos materiales, se ha estimado para los residuos de pirita una cohesión nula y un ángulo de

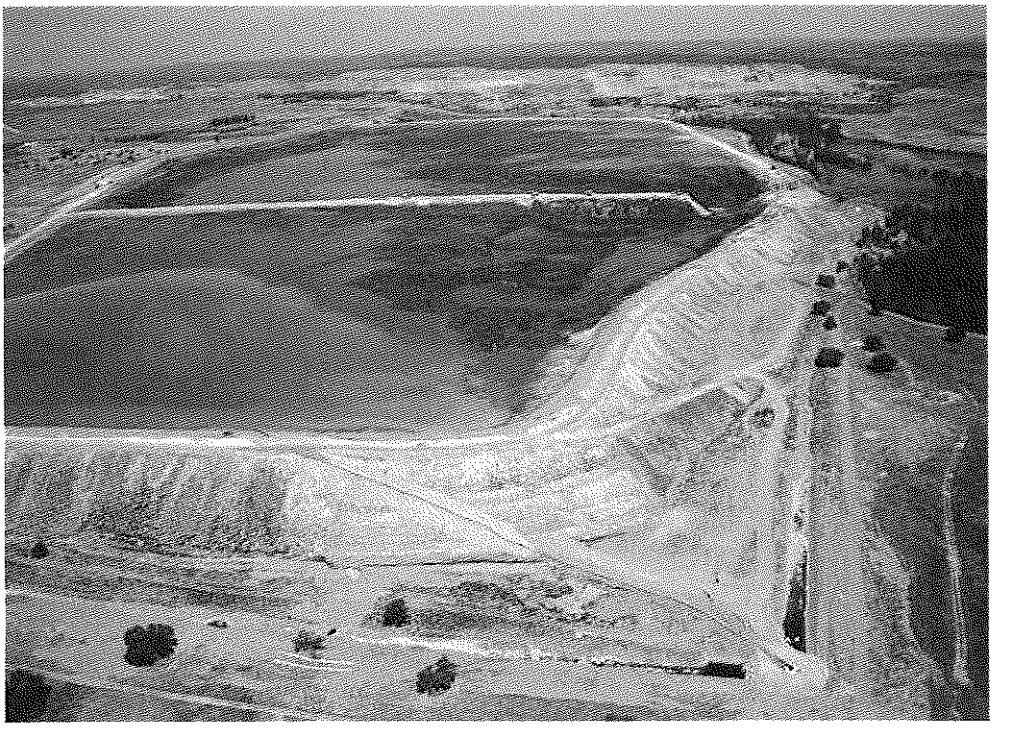


Figura 3. Rotura del depósito.

rozamiento del orden de 25º y una resistencia sin drenaje de 1t/m^2. Las condiciones naturales de este material son:

	Residuos de piritas	Resíduos de piroclastos
Tamaño k80	45 micras	450 micras.
P. específico de las partículas	4,8	3,0
Densidad saturada en balsa	2,9 t/m^3 - 3t/m^3	2,0 t/m^3 - 2,1 t/m^3
Humedad de saturación	20%	24%

2. DESCRIPCIÓN DE LA ROTURA Y SUS EFECTOS LOCALES

La rotura del dique fue el resultado de un desplazamiento lateral de 60 metros de una sección del dique Sudeste con más de 700 metros de longitud (ver Fig. 3).

El dique se desplazó solidariamente con la terraza aluvial, de 4 metros de espesor, sobre la que se apoya y los 10 metros superiores de la formación de margas azules,

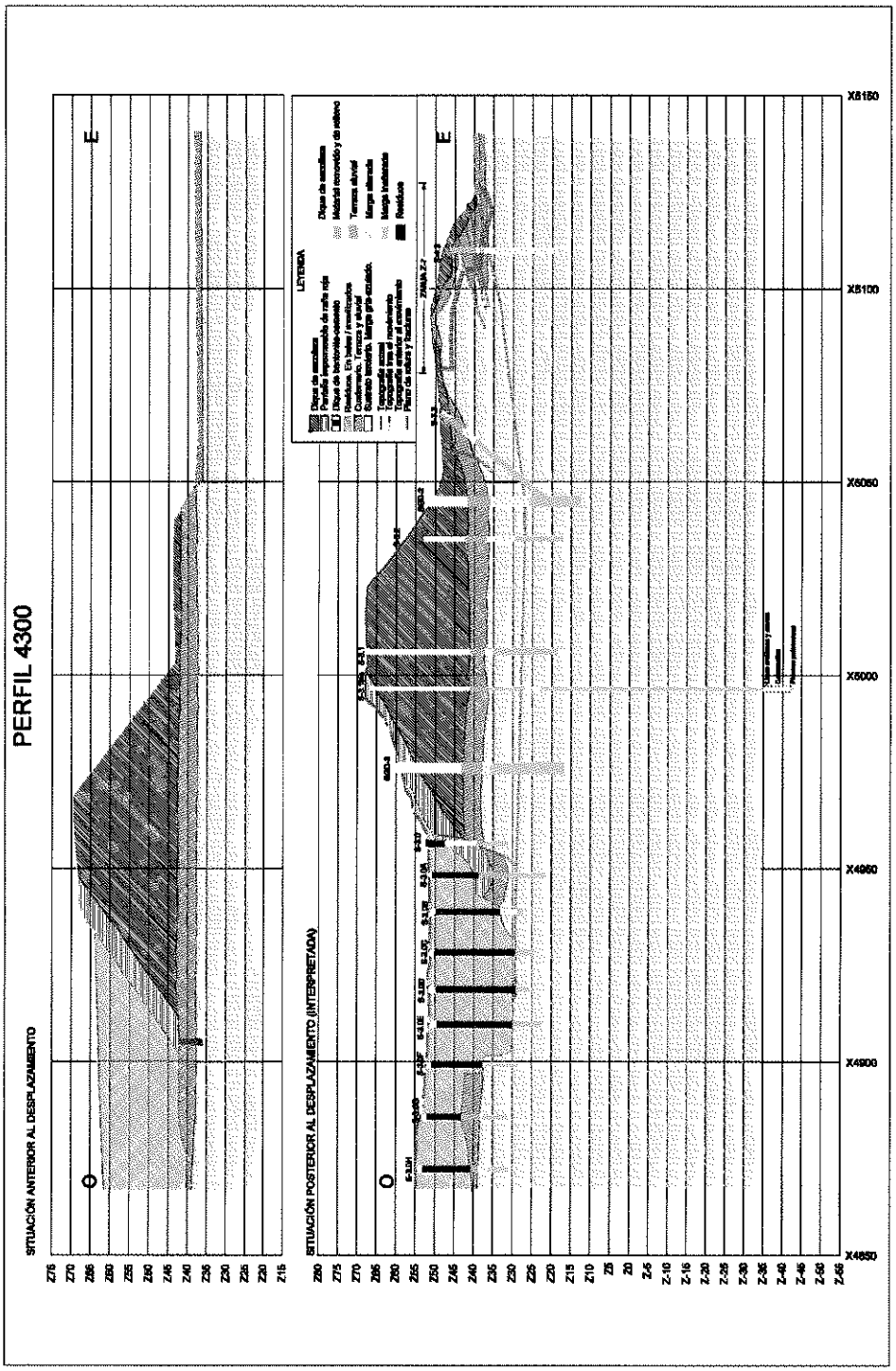

PERFIL 4300
SITUACIÓN ANTERIOR AL DESPLAZAMIENTO
SITUACIÓN POSTERIOR AL DESPLAZAMIENTO (INTERPRETADA)
LEYENDA
X5150
X5100
X5050
X5000
X4950
X4900
X4850

Figura 4.

Figura 5.

subyacente a la terraza aluvial, deslizando sobre una superficie de estratificación en las margas a 14 metros de profundidad, respecto al terreno natural (Fig. 4).

El desplazamiento del dique comenzó repentinamente, ya que media hora antes de la rotura no se detectaron señales de movimiento alguno.

Los residuos vertidos y el agua fluyeron por una brecha abierta en el dique exterior de la esquina Sudeste de la balsa de piroclastos (ver Fig. 5). Esta brecha se inició por la rotura del dique Este de la balsa de piritas, inmediatamente al Sur, finalizando con un gran desplazamiento por cizalla y una serie de deformaciones y fracturas en la coronación del dique.

El flujo de residuos sólidos y agua amplió la brecha hacia la zona, Norte, no desplazada del dique. Los volúmenes de residuos sólidos y agua vertidos se han estimado en 1,3 Mm^3 y 5,5 Mm^3 respectivamente. Además, el vertido arrastró materiales del propio dique y de las formaciones del aluvial y margas infrayacentes (ver secuencia de la rotura en los croquis adjuntos: A a F, de la figura 6).

El desplazamiento lateral del dique afectó a la zona norte del dique Este de la balsa de piritas y la parte meridional del dique de piroclastos. Además, el desplazamiento lateral produjo la separación del dique central respecto al dique de piroclasto.

La fractura más patente (Fig. 7) cruza el dique con dirección N45°E. Esta fractura es debida, en parte, a un desgarre de cerca de 2 m de desplazamiento horizontal del lado Sur de la fractura y 2 m de descenso respecto al lado Norte de la misma (más alto).

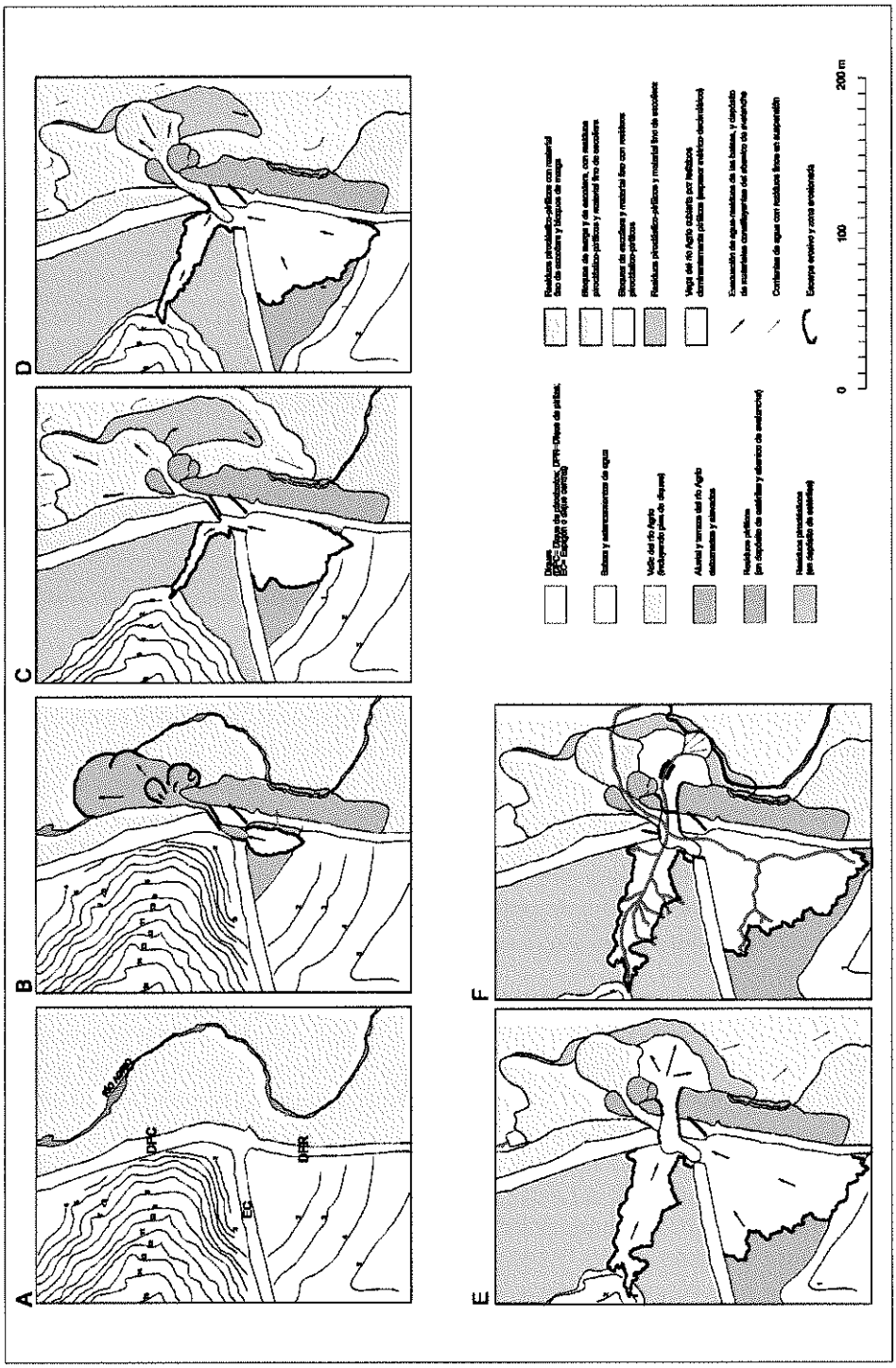


Figura 6. Recreación secuencial del desplazamiento y rotura del Dique, y sus efectos.

Figura 7.

En los residuos de la balsa de piritas se observan dos grandes escarpes, cuya continuidad y carácter rectilíneo les diferencia netamente de los escarpes de la balsa de piroclastos, que son de forma irregular y festoneada debidos a la erosión durante el vaciado. Lo más seguro es que éstos escarpes sean el reflejo superficial de fenómenos de rotura en el fondo de la balsa, relacionados con la mecánica del desplazamiento del dique (ver Fig. 5).

En la balsa de piroclastos no se observa ninguna estructura o deformación de éste tipo.

El desplazamiento del dique estuvo acompañado de la deformación de los terrenos situados inmediatamente al Este, formando dos grandes abombamientos (Fig. 8). Estos terrenos deformados forman una banda de casi 800 m de longitud (N-S) y 80 m de anchura máxima (E-O), en su parte central.

3. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

Los depósitos Miocenos del área (datados con 10-12 Maños), forman parte de la Depresión Terciaria marina del Valle del Guadalquivir, localizada entre el zócalo Hercínico del Macizo Ibérico (Sierra Morena) al Norte, y las Cordilleras Béticas al Sur. El

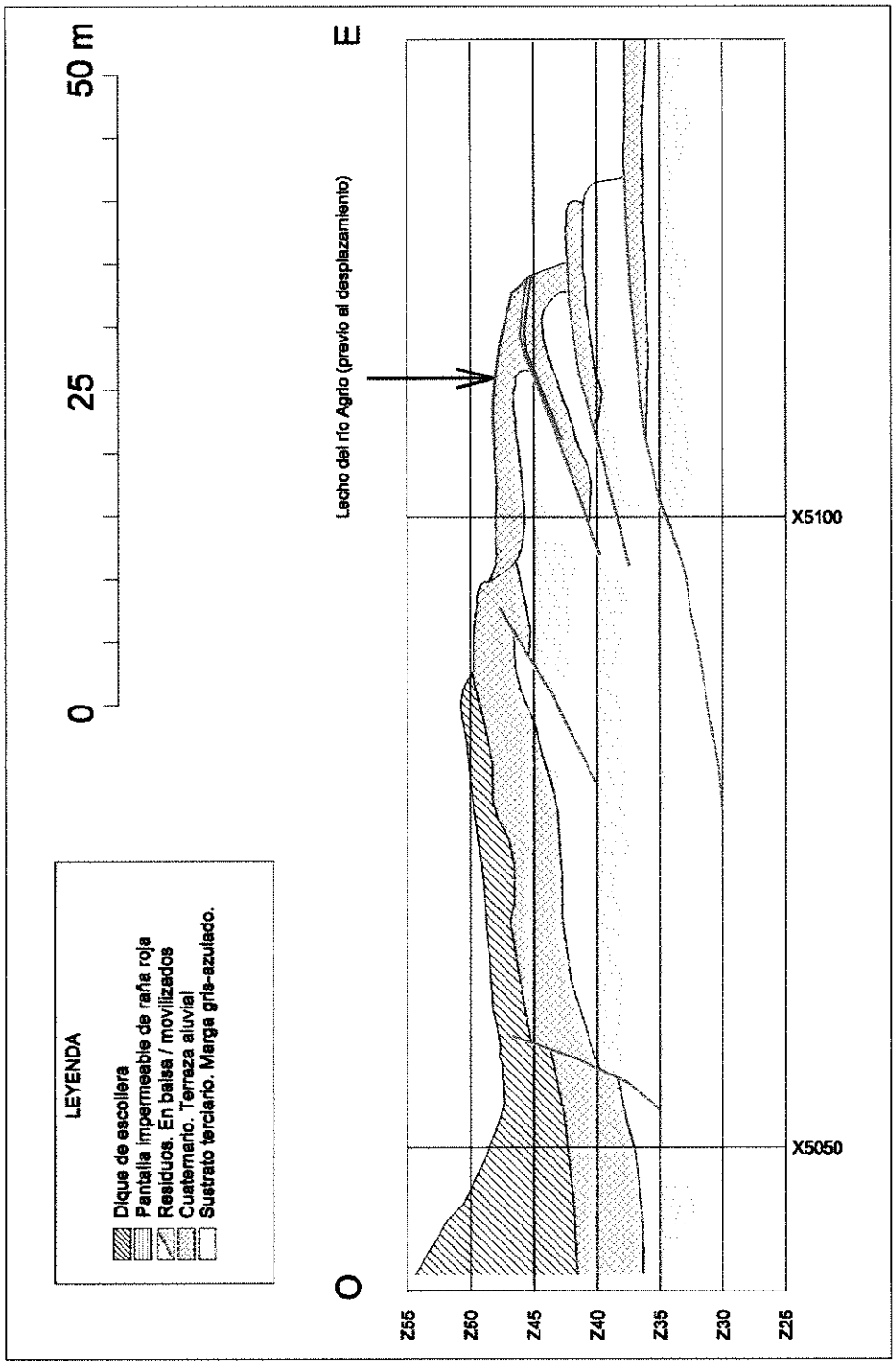


Figura 8. Cabalgamiento en la terraza y aluvial del río Agrio, deformados

área del depósito de estériles se encuentra muy próxima (a unos 1-3 km) del borde Hercínico, donde se encuentran las mineralizaciones poli-metálicas explotadas en las cortas de Aznalcóllar y Los Frailes.

El área del depósito de estériles muestra un aspecto amesetado, y se articula en torno al valle del río Agrio.

La formación de margas azules del Mioceno sucede concordantemente a las calizas y calcarenitas del Mioceno basal (acuífero Niebla Posadas).

Las formaciones cuaternarias son el resultado de la evolución del relieve en relación con la definición y encajamiento progresivo de la red hidrográfica en la cuenca sedimentaria terciaria. Son formaciones de espesor métrico, discontinuas y dispuestas en terrazas a distintas cotas. Es en la 3ª terraza local, derecha del río Agrio, sobre la que se asienta el depósito de estériles. El nivel de raña es también importante, ya que en ella se apoya el límite occidental del depósito de estériles.

Las unidades litológicas del sustrato margoso en el depósito de estériles tienen un buzamiento regional de 4º SSE (ver Fig. 9). En las proximidades del depósito, sólo se ha podido medir un plano de estratificación (N65ºE, buzando 4º Sur). Sin embargo, los sondeos de gran diámetro han aportado datos fiables sobre el buzamiento de la estratificación en la zona de rotura, que se ha estimado entre 0º y 3º, que es similar a la medición de inclinación del plano de deslizamiento.

Se han medido planos de diaclasamiento subvertical y algunos inclinado. En las estaciones más próximas a la zona de rotura, se midieron tres familias predominantes, con direcciones medias 155º; 110º y 75º. Ahora bien, son las diaclasas 60º-90º y 150º-180º, observadas en las estaciones más próximas al depósito, las que parecen tener un papel notable en el mecanismo de rotura y desplazamiento del dique. (Fig. 10)

Por la importancia de la sobreconsolidación en el comportamiento geotécnico de las margas azules, se ha realizado un estudio de la carga litostática soportada por la formación margosa, previa a la fase erosiva Pliocuaternaria.

Se ha visto (Fig. 11) que la zona del depósito de estériles se localiza en un vacío erosivo labrado en las margas azules, entre los relieves del zócalo Hercínico (datados con unos 300 Maños) al Norte y los "frentes de cuesta" de los sedimentos más recientes del Mioceno marino (calcarenitas y limos arenoso-calcáreos amarillentos, del Andaluciense).

Actualmente, la cota media del techo de la formación margosa en la zona de rotura es de 40 m.s.n.m. Hacia los bordes W y E de la cuenca del Guadiamar, hay margas azules a una cota promedio de 115 m.s.n.m, por lo que el área del depósito de estériles estuvo cubierta por sedimentos de margas con una potencia mínima de 75 m. No obstante, si se extrapola al Norte, con su propio buzamiento, se obtienen cargas litostáticas de entre 100 –más probable– y 150 m.

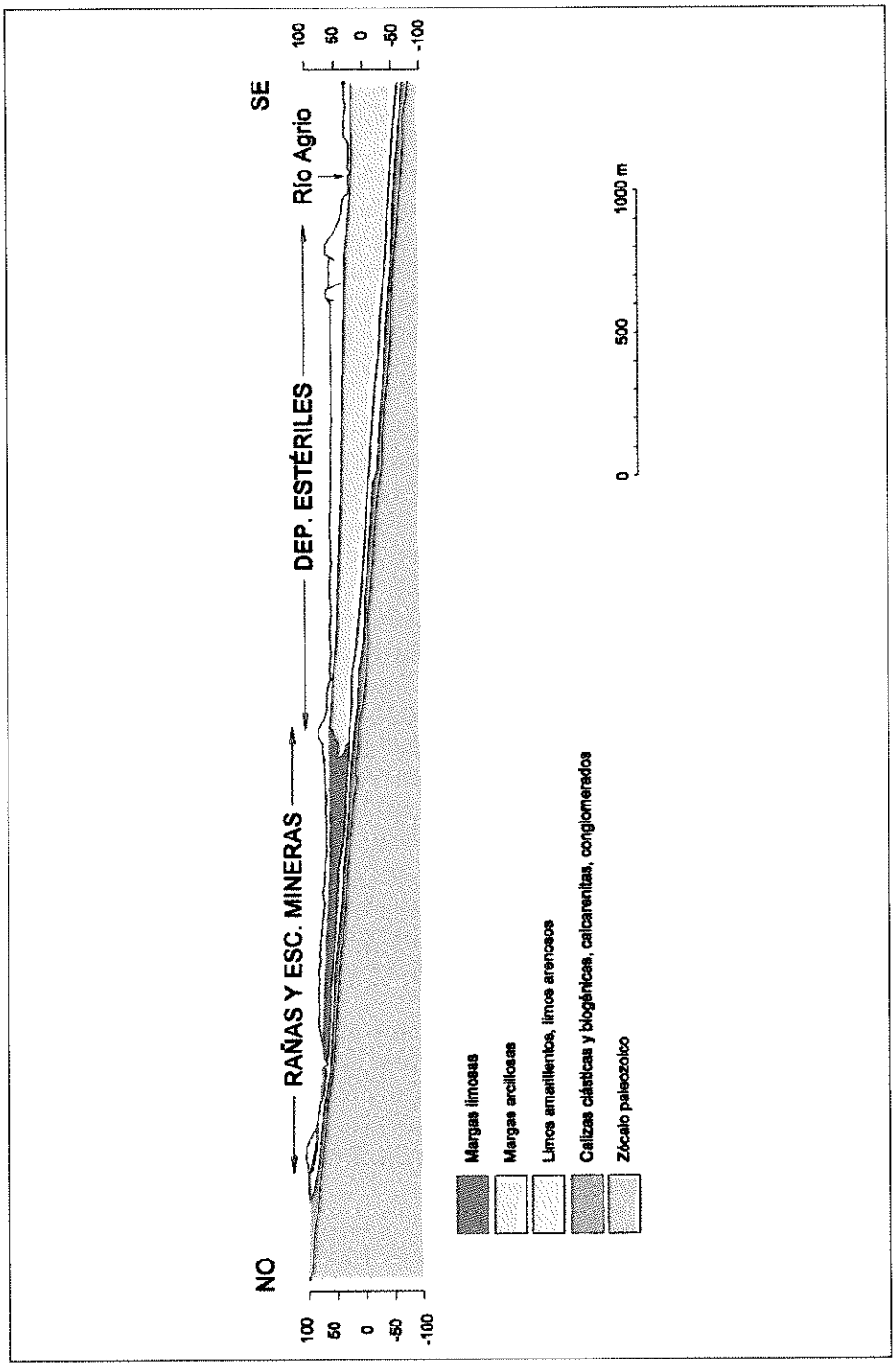


Figura 9. Disposición del Mioceno en el área de estudio.

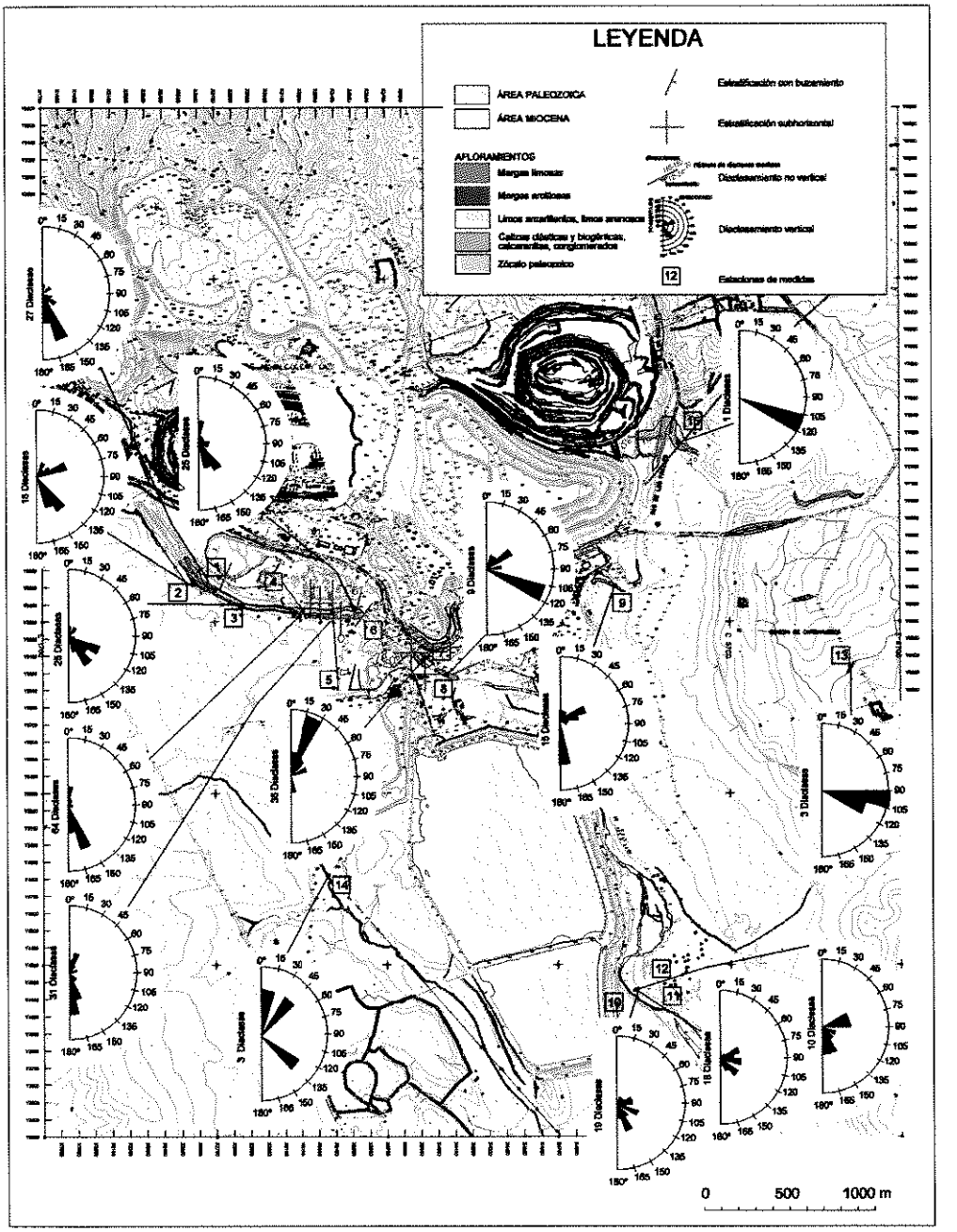


Figura 10. Situación de las estaciones y números de medidas de rumbo y buzamiento.

4. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MATERIALES DEL CIMIENTO

4.1. Terraza aluvial

Estos materiales se encuentran bajo la balsa y el dique; y configuran la superficie del terreno exterior a la balsa. La potencia de la terraza aluvial, medida en sondeos varía entre 1,3 m y 5,8 m. El tercio superior de la terraza está constituido por limos arenosos y arenas finas y los dos tercios inferiores por gravas y gravillas de cuarcita y de pizarras, mezclados con bastante arena y pocos finos con baja o nula plasticidad.

El peso específico medio de los sólidos es de 2,76 t/m^3. La densidad aparente es del orden de 2,1 t/m^3, con una humedad en torno al 8%. A efectos de su resistencia, se ha estimado para estos materiales, un ángulo de rozamiento de 35° con una cohesión nula.

4.2. Margas Azules

Estos materiales constituyen el terreno de cimentación más profundo del depósito y se localizan bajo la capa aluvial a unos 4 m- 5m de profundidad. De acuerdo con los sondeos realizados, la cota del contacto entre las margas y la terraza aluvial suprayacente en la zona de estudio varia entre 37 y 40 m. Esta formación tiene una potencia del orden de 70 m, según se ha reconocido en un sondeo.

4.2.1. Descripción, alteración y estructura

Las denominadas "margas azules" son una formación fuertemente sobreconsolidada, debido a que ha soportado, en su historia geológica, depósitos sedimentarios con espesores del orden de 100 a 150 metros, por lo que han estado sometidas a unas presiones que han modificado su estructura normal, creando uniones diagenéticas entre sus partículas.

Dado su contenido en carbonatos, en general entre el 20 y 30%, es más adecuado denominarlas arcillas margosas, o bien, arcillas ricas en carbonatos, con una elevada plasticidad.

La formación margosa, a gran escala, es masiva y homogénea, no habiéndose observado a lo largo de la investigación ningún plano de rotura preexistente.

No obstante, presenta una estructura anisótropa, como consecuencia de que contiene una serie de planos de estratificación muy apretados, con una frecuencia milimétrica a decimétrica, con un buzamiento subhorizontal, y un sistema de diaclasas subverticales, normalmente selladas, con una orientación variable y separación entre ellas decimétrica a métrica, de tal forma que marcan en el macizo margoso bloques de forma paralelepipédica de tamaño variable (Figs. 12 y 13).

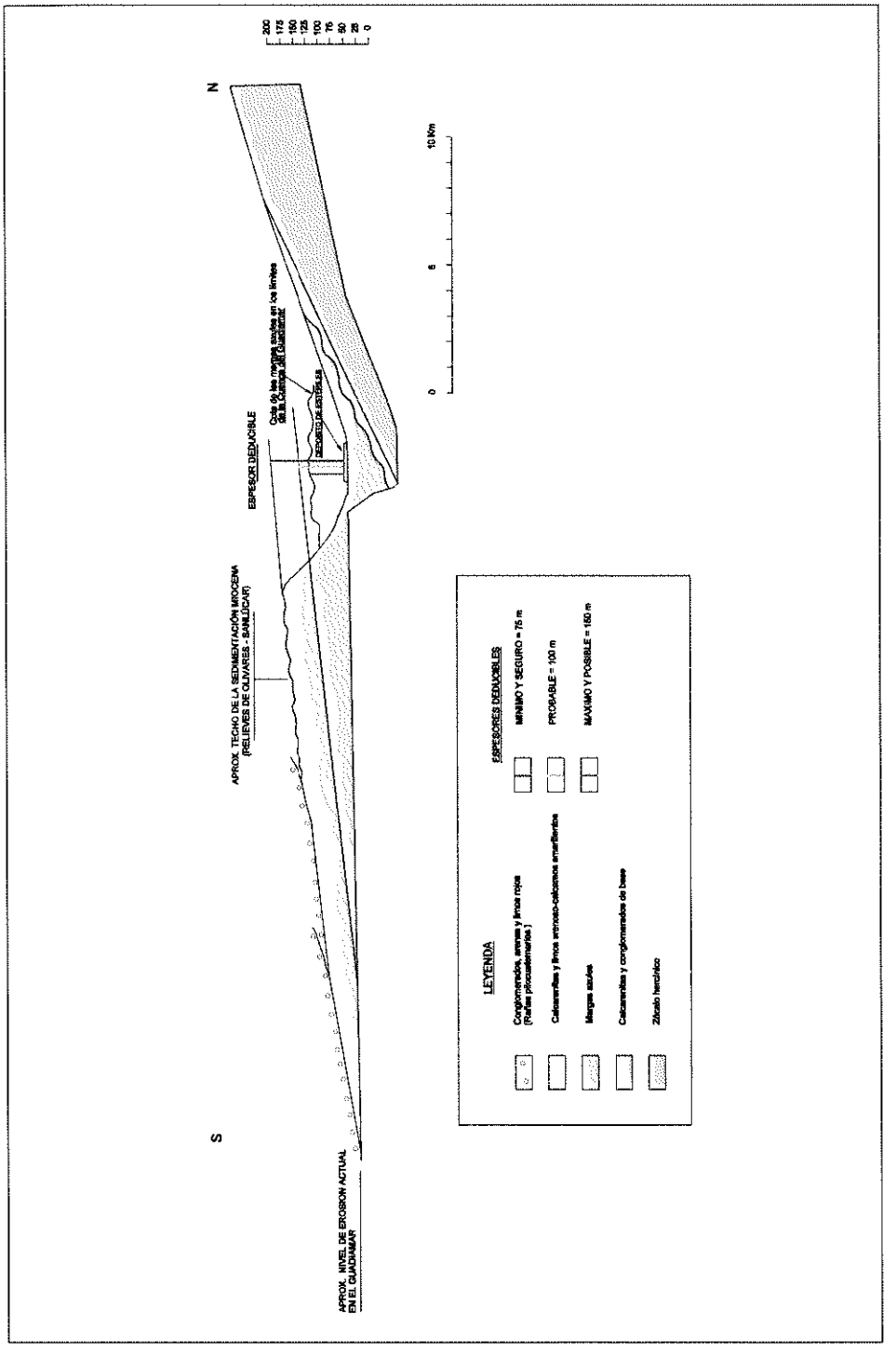

N
S
200
175
150
125
100
75
50
25
0
0
5
10 Km
ESPESOR DEDUCIBLE
APROX. TECHO DE LA SEDIMENTACIÓN MIOCENA
(RELIEVES DE OLIVARES - SANLÚCAR)
APROX. NIVEL DE EROSION ACTUAL
EN EL GUADIAMAR
LEYENDA
Conglomerados, arenas y limos rojos
(Rañas plocastemarias)
Calcarenitas y limos arenoso-calcareos amarillentos
Margas azules
Calcarenitas y conglomerados de base
Zócalo hercínico
ESPESORES DEDUCIBLES
MINIMO Y SEGURO = 75 m
PROBABLE = 100 m
MAXIMO Y POSIBLE = 150 m

Figura 11.

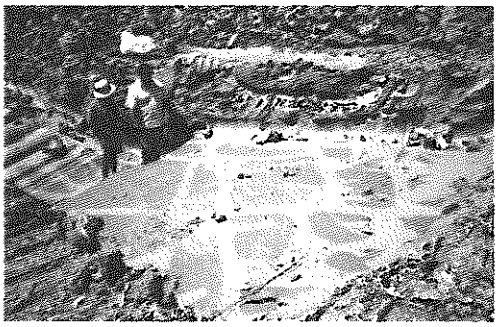


Figura 12. Enrejado de juntas meteorizadas. Zanja para muestras en bloque.

Figura 13. Esquema y disposición de las juntas de buzamiento casi vertical. Zanja Z-7.

Figura 14.

Es normalmente a través de dicho sistema de diaclasado y estratificación, por donde penetra la meteorización en la formación margosa, pasando la coloración original gris azulada a tonos marrón amarillento. En efecto, se ha observado en los sondeos y zanjas, que el techo de las margas, en contacto con la terraza aluvial, se encuentra alterado con un espesor variable, desde algunos centímetros, hasta normalmente 3 a 5 metros, y excepcionalmente 15 m (en un sondeo), con una coloración beige o marrón amarillento.

Aunque a simple vista la marga se observa masiva, en algunos tramos de los sondeos se presenta un bandeado típico, en el que se ve una alternancia de bandas subhorizontales centimétricas (2 a 3 cm) de coloración gris azulada, con otras más finas (1 a 3 mm), de tonalidades gris oscuras.

Este bandeado se asocia a la existencia de planos de estratificación. En la parte más superficial se observa como dichas bandas, originalmente más oscuras, se transforman en vetas marrón amarillentas como consecuencia de la penetración de la meteorización por el diaclasado vertical, que también presenta, en este caso, halos de alteración de color beige.

A la escala de los sondeos perforados de menor diámetro (de 101 mm) se observan de forma discontínua pequeños lisos ("slicken sides") y fisuras, pero ésta y otras estructuras pueden estar distorsionadas por la deformación rotacional inducida por la propia perforación. En cambio en los sondeos de hinca de gran diámetro (231 mm) se observa claramente la presencia de "slicken sides" con estrías.

Igualmente, en los 10 m superiores en las margas del sondeo SDG-3, en el pie "aguas arriba" del mismo perfil, se observan "slicken sides" de 1°-4° de inclinación. Muy probablemente, dada su morfología y la coincidencia en cota a 10 m en las margas, el más profundo de éstos "slicken sides", debe pertenecer a la superficie principal de rotura. También en este sondeo se observan "slicken sides" con 60°-90° de inclinación y estriado horizontal, probablemente generado por deslizamientos relativos entre secciones del dique a favor de diaclasas subverticales prexistentes. Estas estructuras están reflejadas en superficie por las grietas transversales NE-SO observadas en la cresta del dique.

Fuera de la zona de rotura, se han observado algunos "slicken sides", aunque son de pequeñas dimensiones y sin estriado claro.

4.2.2. Propiedades de identificación

La práctica totalidad de la muestra pasa por el tamiz 200 ASTM. La proporción arcillosa (tamaño 2μ), varia entre 34% y 76%, con un valor medio de 61 %.

La plasticidad es elevada. El límite líquido está comprendido entre el 54 y el 77 %, con una media del 64 %. El límite plástico está comprendido entre el 21 y el 32 %, con una media de 27 %. El índice de plasticidad está entre el 27 y el 52 %, con un valor medio del 37 %. Se clasifican como CH.

Las margas beige, más alteradas, tienen una plasticidad algo más elevada (LL = 69%; IP = 41,5%), que la marga gris-azulada (LL = 65,5%; IP = 38%), y su contenido en carbonatos es algo menor.

El peso especifico de las partículas está comprendido entre 2,52 y 2,77, con un valor medio de 2,69.

4.2.3. Estado natural

La humedad natural presenta valores dispersos entre 27,5% y el 44 %, si bien se sitúa normalmente entre el 30 y el 33 %. El valor medio es del 32% (31,5 % para la marga gris-azulada y 33,2% para la marga beige), presentándose normalmente algo por encima del límite plástico, con un índice de fluidez medio de 0,13. El grado de saturación es prácticamente del 100%.

Las diferencias de humedad entre las muestras bajo la coronación y las muestras bajo el pie de dique son muy pequeñas. Ello indica que la consolidación de las margas que soportan el peso del dique (muestras bajo la cresta), ha sido muy lenta e incompleta. Ello justifica, como se explica más adelante, la existencia de un exceso de presión de agua en los poros de la marga, inducido por la construcción del dique.

La densidad seca varia entre 1,22 t/m^3 y 1,55 t/m^3 , con una media de 1,44 t/m^3, no apreciándose diferencias entre la marga beige y la gris-azuladas.

El índice de huecos varia normalmente entre 1,00 y 0,80 con una media de 0,87, sin que se aprecien diferencias significativas entre las margas beige y las gris-azuladas.

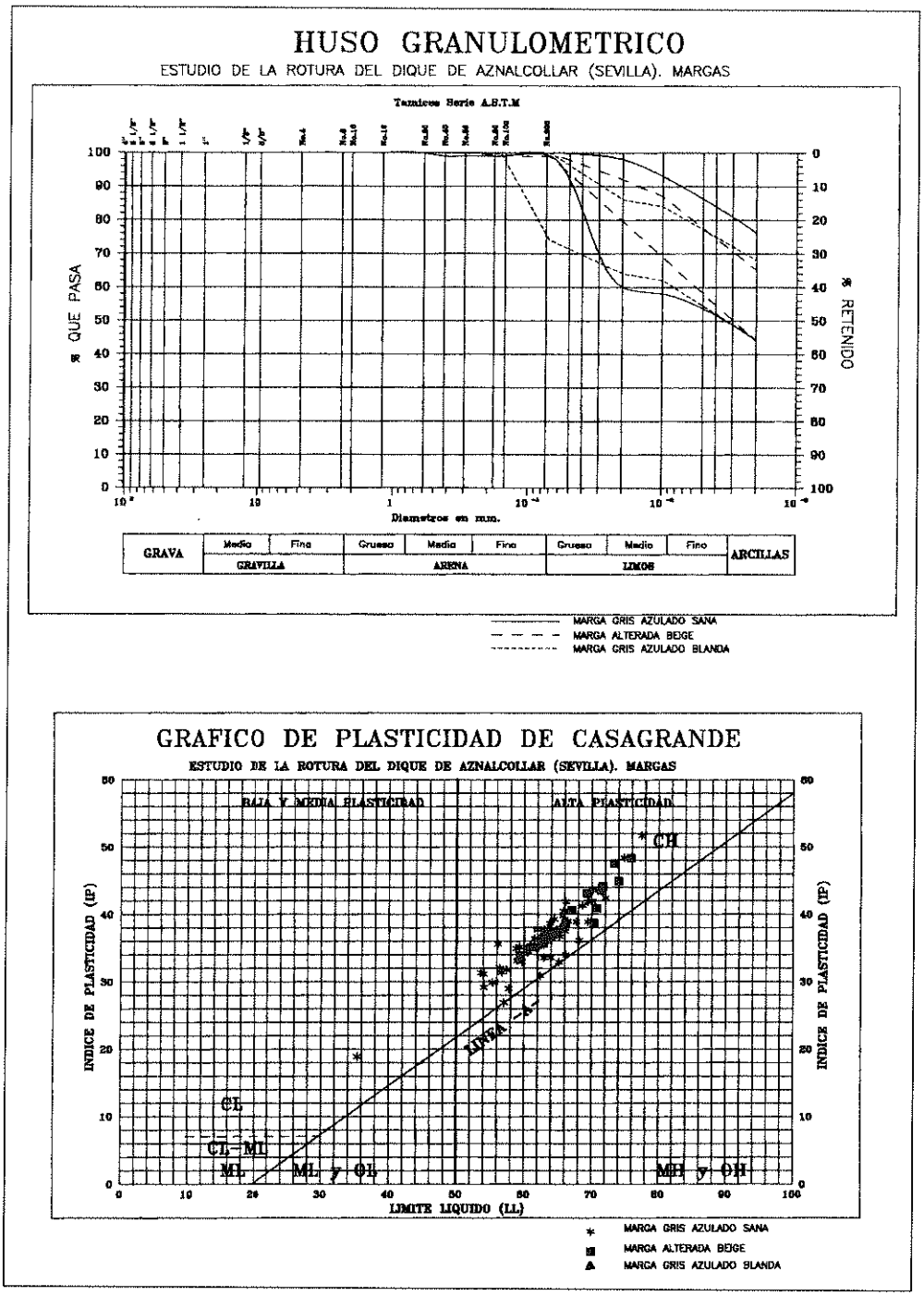


Figura 15. Huso granulométrico y gráfico de plasticidad de las margas.

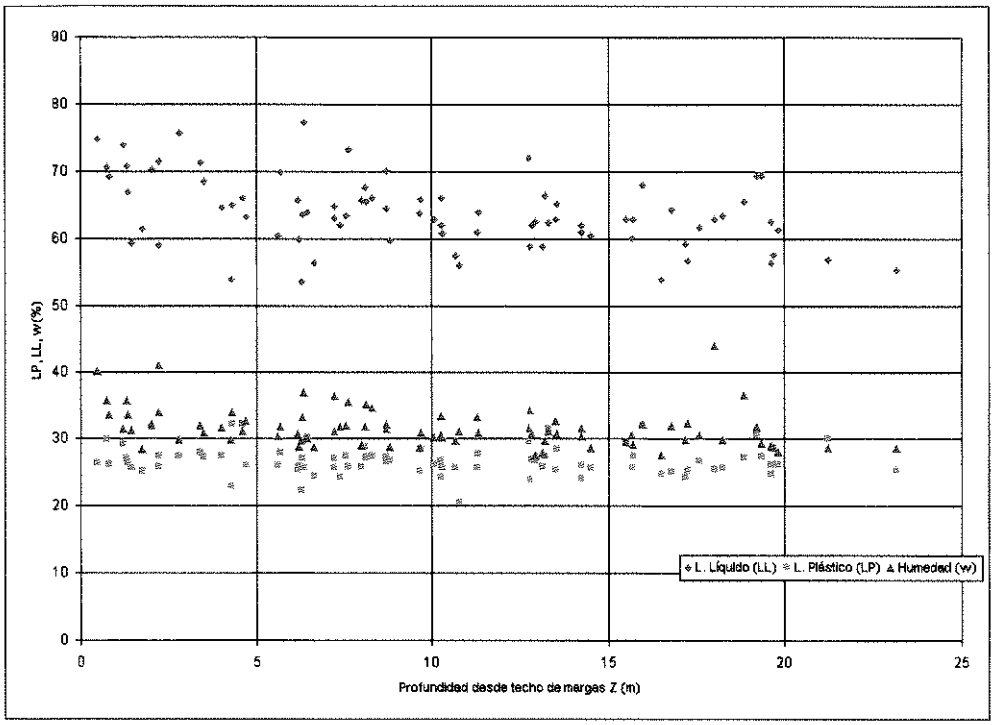


Figura 16.

4.2.4. Características resistentes

Las margas azules evidencian una pérdida significativa de resistencia al corte cuando se las somete a tensiones por encima de su resistencia "pico", pasando a valores inferiores, hasta alcanzar su resistencia "residual". Este comportamiento es típico de una elevada sobreconsolidación y de su tendencia a desarrollar procesos de debilitamiento por deformación (strain weakening). Este comportamiento se aprecia con claridad en los resultados de los ensayos de corte anular realizados en muestras de bloque obtenidas 300 m al Este de la zona de rotura.

En general, las características resistentes han resultado ser bastante homogéneas dentro del área investigada, sin que se aprecien diferencias significativas para cada tipo de marga, en relación con su profundidad o su posición relativa a la zona de rotura. Las diferencias, aunque pequeñas, se observan entre los tipos de margas considerados, i.e. la marga gris-azulada sana, y la marga beige alterada.

Se han considerado como parámetros resistentes representativos los valores que se detallan a continuación:

Tipo de marga	Resistencia de pico		ε= 20% de triaxiales		Resistencia residual
	c' (Kg/cm²)	φ' (º)	c_b' (Kg/cm²)	φ_b' (º)	φ_r' (º)
Marga gris azulada	0,4	23º	0,2	18º	12º
Marga alterada	0,3	21º	0,15	17º	12º

Se observa que los parámetros obtenidos para el 20% de deformación en los ensayos triaxiales, se sitúan por debajo de la resistencia de pico, lo que muestra la tendencia al debilitamiento de estas margas al someterlas a un proceso tenso-deformacional.

En cuanto a la resistencia sin drenaje se han obtenido valores entre 1,7 y 3,5 kg/cm^2: En las margas gris azuladas dicha resistencia aumenta ligeramente con la profundidad, con valores desde 2 kg/cm^2, entre 5 a 10 m de profundidad, hasta 3,5 kg/cm^2 a profundidades entre 20 y 25 m Por ello, es probable que la resistencia a la deformación aumente también en la misma proporción.

Por último, hay que indicar que los parámetros resistentes obtenidos en los ensayos de laboratorio, con pequeñas muestras, no reflejan correctamente la estructura de la marga, sobre todo el sistema de diaclasas subverticales, de escala métrica. De forma que las margas consideradas como macizo o formación margosa, debe tener unos parámetros resistentes algo inferiores. En este caso, se ha estimado que para la formación margosa, la cohesión puede ser del orden de 0,1-0,2 kg/cm^2, con ángulo de fricción interna de 18º-20º, correspondiente a valores de ensayo en una marga alterada.

4.2.5. Características deformacionales

Las curvas edométricas indican que estas arcillas están sobreconsolidadas. Sin embargo, las presiones de preconsolidación calculadas por el método de Casagrande –1,30 kg/cm^2 a 5,20 kg/cm^2–, son más bajas que los valores, más fiables, obtenidos a partir de la determinación de la carga litostática sedimentaria (entre 75 m y 150 m de sedimentos), que implican presiones de pre-consolidación entre 10 kg/cm^2 y 20 kg/cm^2.

El índice de compresión Cc varía entre 0,10 y 0,37; con un valor medio de 0,21. La relación Cc/ (1+e_0) tiene un valor medio de 0,11. El índice de entumecimiento Ccr está comprendido entre 0,007 y 0,10 con un valor medio de 0,066.

Los ensayos edométricos dan valores medios de C_v del orden de 3 a 5x10^{-4} cm^2/s, considerablemente más bajos que en la realidad. Estos valores deben estar en el rango de 3 a 5x10^{-3} cm^2/s.

Las variaciones del índice de compresión (Cc) en los primeros 15 m de la formación de margas azules son insignificantes, y luego disminuyen con la profundidad. Atendiendo a los elevados valores de la presión de preconsolidación, el módulo edométrico

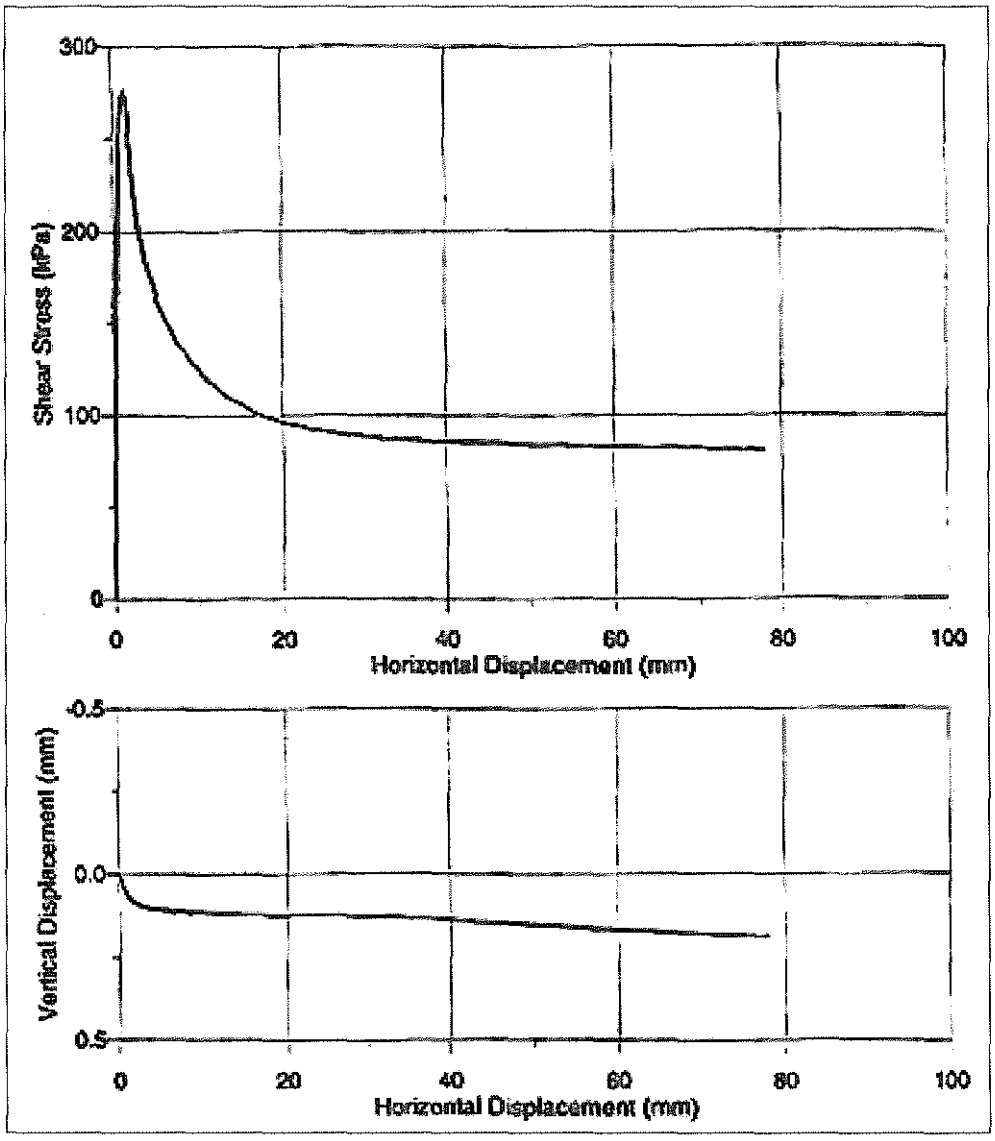


Figura 17. Ensayo de corte anular.

de las margas se correspondería con la rama de recarga. Para el valor medio obtenido de Ccr /1+eo= 0,0345, se obtiene un valor de dicho módulo D = 67 σ'. Y el módulo de deformación lineal sería, para ν = 0,25, E'= 0,83 D= 56 σ'. Por otra parte, se han realizado ensayos presiométricos tipo Ménard en las margas en una zona 200 m al Este de la rotura y a profundidad entre 3 m y 14 m, bajo el contacto aluvial-margas. El módulo presiométrico obtenido de los ensayos varia entre 350 kg/cm^2 y 575 kg/cm^2.

En consecuencia, si se tiene en cuenta la notable consistencia de estas margas, los errores de escala de los ensayos edométricos y la inevitable alteración en la toma de muestras, parece razonable suponer que los módulos de deformación para estas margas, son significativamente mayores que los obtenidos a partir de los ensayos edométricos, y que su valor es más próximo a los 250 a 350 kg/cm^2.

4.2.6. Análisis químicos

El contenido medio de carbonatos es del 25,4 %, estando la mayor parte de los ensayos efectuados dentro del rango 18% a 32%. Dicho rango queda por debajo del 35%-65% que es el normalmente aceptado para una marga, por lo que sería más propio aplicar a éste material la denominación de "arcilla rica en carbonatos".

El contenido medio en sulfatos solubles es de 0,29%, estando la mayor parte de los ensayos efectuados dentro del rango 0,10% y 1,17%.

4.3. Niveles Piezométricos

Ya se ha comentado que la formación margosa alcanza una potencia del orden de 70 metros, situándose a muro una formación permeable de calcarenitas, que funciona como un acuífero confinado (Acuífero Niebla-Posadas).

La presión media medida en el piezómetro instalado en las calcarenitas es de 8,6 kg/cm^2.

El nivel freático en superficie se sitúa en la terraza aluvial, a techo de las margas. Por tanto, suponiendo que las presiones de agua antes de la construcción del dique eran estables, las presiones intersticiales iniciales deben seguir una ley lineal de pendiente 1,11. Lo que implica que originalmente existía una sobrepresión de 0,11 t/m^2 sobre el nivel freático original.

4.3.1. Lecturas de los piezómetros

En los piezometros instalados se han obtenido resultados significativos que se describen seguidamente.

El análisis de resultados indica que los piezómetros situados fuera de la zona de rotura registraban presiones de 3,5 kg/cm^2 a 4,8 kg/cm^2, a una profundidad de 12 m en las margas, similar a la de la superficie de rotura.

Algunos valores más bajos, medidos en los piezómetros Pz-3.1 y 3.1 bis en la zona de rotura, son atribuibles a los cambios en presión intersticial debidos a la dilatación de corte debida al proceso de rotura y desplazamiento.

Dado que la presión inicial, antes de la construcción del dique, era de 1,5 kg/cm^2 aproximadamente, actualmente hay una sobrepresión entre 2 kg/cm^2 y 3 kg/cm^2, que necesariamente se debe al peso del dique. Si el peso del dique es de 5,7 kg/cm^2

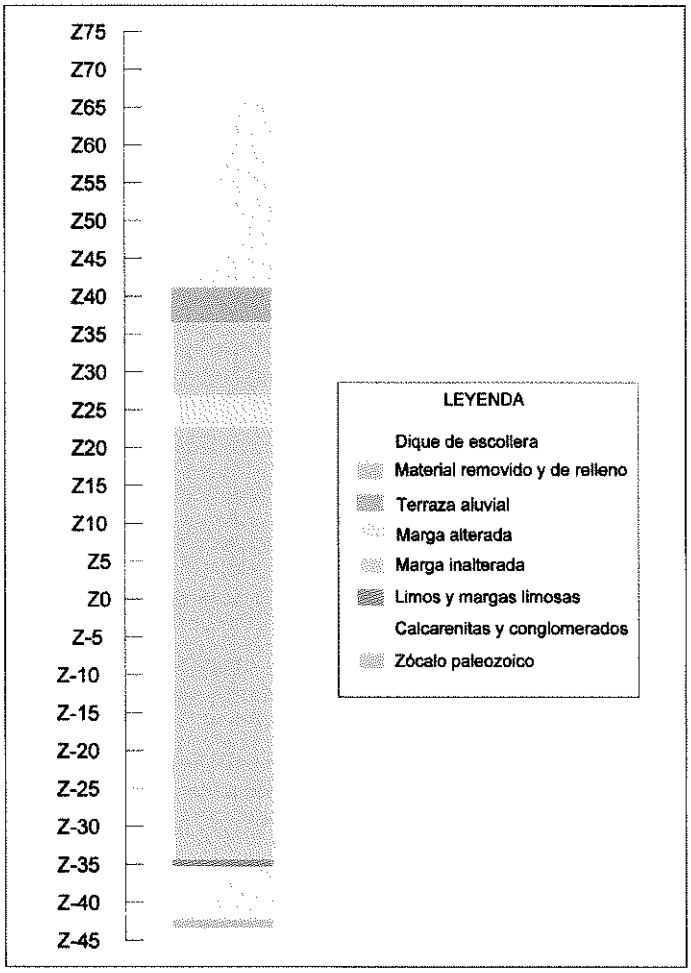


Figura 18. Los materiales miocenos en el subsuelo del Depósito de Estériles. Columna típica.

(27m x 2,1 t/m^3), el incremento de presión intersticial es equivalente al 35% a 53% del peso del dique y, por tanto, el grado de consolidación a la profundidad del plano de rotura sería del 65% al 47%. El coeficiente de presión intersticial r_u (definido como la relación entre la presión intersticial y la carga de tierras), sería de 0,4-0,5.

Por otra parte, las lecturas de nivel piezométrico realizadas con sonda eléctrica en casi todos los sondeos, indican que el nivel freático de la terraza aluvial se sitúa muy próximo a la superficie original del terreno, al techo de la terraza. Por último, el piezómetro situado en los residuos en el fondo de la balsa de piroclastos, indica que la línea de saturación de los estériles de piroclasto está aproximadamente 8 m sobre cota original del terreno (18 m bajo la superficie de la playa de residuos).

Del análisis de los datos piezométricos, se concluye que la formación de margas está sometida a subpresiones por encima de la línea de presión intersticial original. De hecho, dada la baja permeabilidad de las margas azules, cualquier sobrecarga que se les

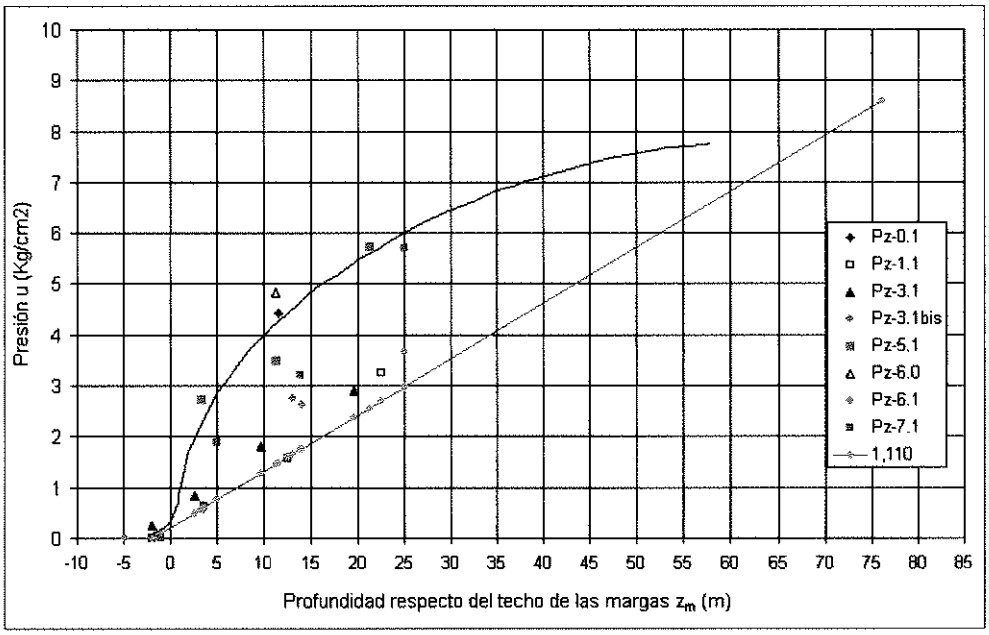


Figura 19.

imponga, supone un incremento inmediato en la presión del agua intersticial. A continuación, comienza un proceso de consolidación muy lento que empieza a transmitir la sobrecarga a la estructura sólida y a aliviar la presión a medida que el agua intersticial va saliendo de los poros.

Se supusieron dos posibles líneas piezométricas: La hipótesis # 1, que se corresponde con una línea que se ha trazado como casi envolvente de las medidas registradas. La hipótesis # 2, que se corresponde con una línea piezométrica que viene a ser la media de los valores registrados en todos los piezómetros, y que sería una envolvente inferior de los instalados fuera de la zona afectada por la rotura.

4.3.2. Modelo de consolidación

Para comprender el significado de éstas líneas piezométricas, en lo referente a las características de la formación margosa y su respuesta al proceso de carga del dique, se han realizado cálculos para estimar la consolidación del cimiento de margas bajo la acción de carga del propio dique.

Se ha utilizado el modelo de consolidación unidimensional, según la teoría de Terzaghi-Frölich. Se ha simulado el proceso de recrecimiento del dique y depósito de estériles, mediante cinco fases de carga. El fenómeno de consolidación y, por tanto, la disipación de presiones intersticiales está regido por el parámetro Cv. Para un valor de

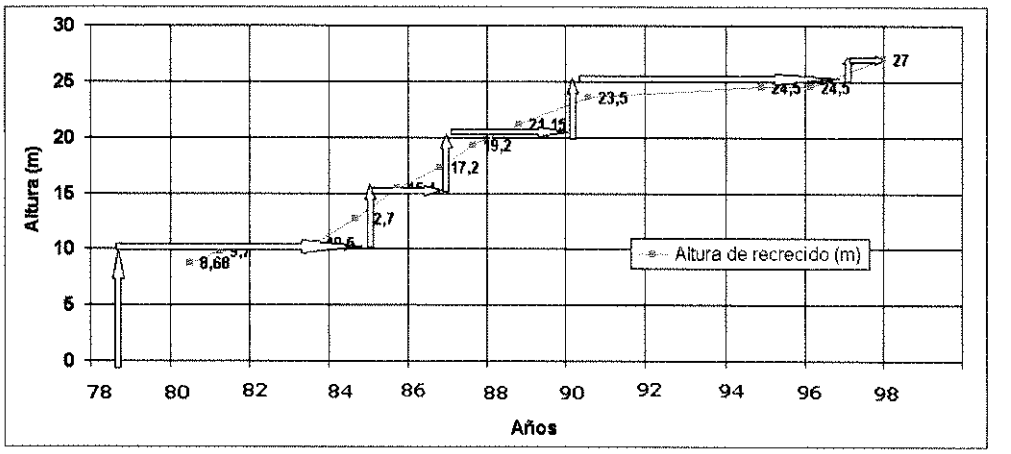


Figura 20. Simulación del recrecimiento para el cálculo con flujo unidimensional

Cv = $3x10^{-3}$ cm^2/s, se obtiene una línea piezométrica final, es decir para el momento próximo a la rotura, análoga a la considerada como hipótesis #1 (figura adjunta).

En resumen, de la lectura de la instrumentación instalada, se concluye que la piezometría de las margas previamente a la rotura del dique, puede representarse por las líneas piezométricas # 1 y # 2 anteriores, correspondientes a valores de la presión intersticial (a 10 metros de profundidad en las margas), de 4 kg/cm^2 y 3 kg/cm^2. Ello implica un exceso de presión intersticial de 2,8 kg/cm^2 y 1,8 kg/cm^2, respectivamente, equivalentes 49% y del 32% de la carga del dique, respectivamente.

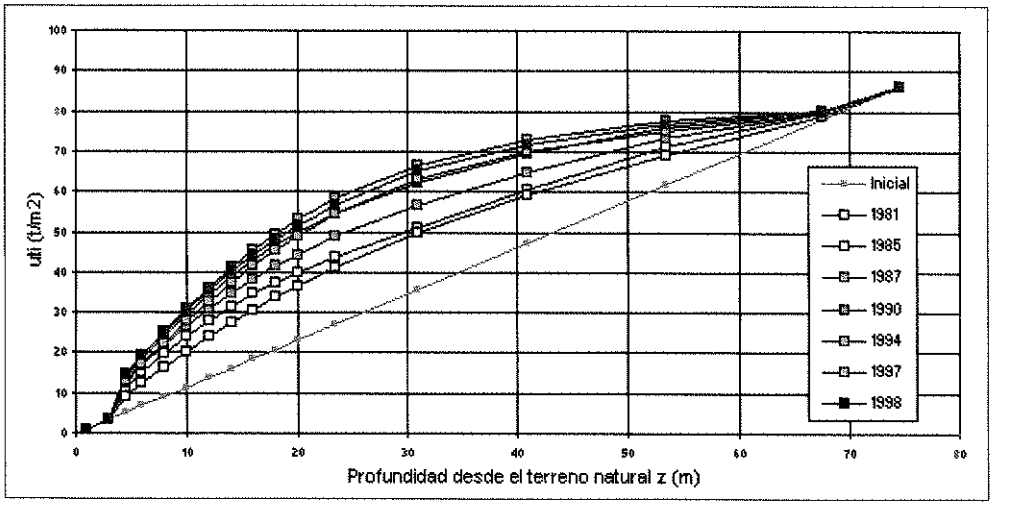


Figura 21. Isocronas de presiones intersticiales uti

Con respecto al nivel freático en la terraza aluvial, se situaría próxima a su superficie, prácticamente en el contacto con la base del dique.

4.3.3 Auscultación de movimientos en la formación de margas después de la rotura

La lectura de los inclinómetros instalados tras la rotura, permitió detectar algunos movimientos significativos, del orden de 4 a 8 mm, entre 8 y 14,5 metros de profundidad bajo el techo de las margas. Dichos movimientos son efectos secundarios de la rotura y se producen a profundidades próximas a la de la superficie de deslizamiento.

5. ANÁLISIS DEL MECANISMO DE LA ROTURA DEL DEPÓSITO

El estudio se ha abordado de forma que se pueda entender el mecanismo de rotura del dique en todas sus vertientes, desde su fase critica inicial, los primeros movimientos, el gran desplazamiento posterior y la estabilización final.

El método fundamental del análisis es el Método del Equilibrio Límite. Aunque el método no contempla las deformaciones, cuanto más alto sea el coeficiente de seguridad menores serán las deformaciones y los movimientos. Por el contrario, a menor coeficiente de seguridad mayores serán las deformaciones y los desplazamientos.

La sección del dique considerada en estos cálculos, corresponde a la zona central de rotura en que los desplazamientos fueron máximos, con una geometría tipo definida, con ancho en coronación de 25 m y altura de 27 m.

En esta zona se puede suponer que todo el dique sufre un movimiento análogo y por tanto, se puede dar por válido un estudio en dos dimensiones.

El dique se apoya sobre una terraza aluvial de 4 m de espesor bajo la que subyace la formación de margas azules con una potencia de 70 m. La estratificación en las margas es sub-horizontal, con buzamiento de 1 a 4º SE. En el cálculo se ha considerado horizontal, para luego analizar la incidencia de otras inclinaciones.

La superficie de los residuos se considera con altura de 26 m. El nivel de agua, que cubría prácticamente toda la balsa, se ha situado 0,5 m sobre los residuos.

El nivel freático, aguas abajo de la pantalla de raña, se ha situado prácticamente en el contacto del espaldón y la superficie de la terraza aluvial.

5.1. Análisis de la rotura del depósito

5.1.1. Mecanismo de rotura

Se ha aplicado el método de equilibrio límite para determinar las condiciones de rotura en un plano horizontal a 8-10 m bajo el techo de margas. Los resultados indican

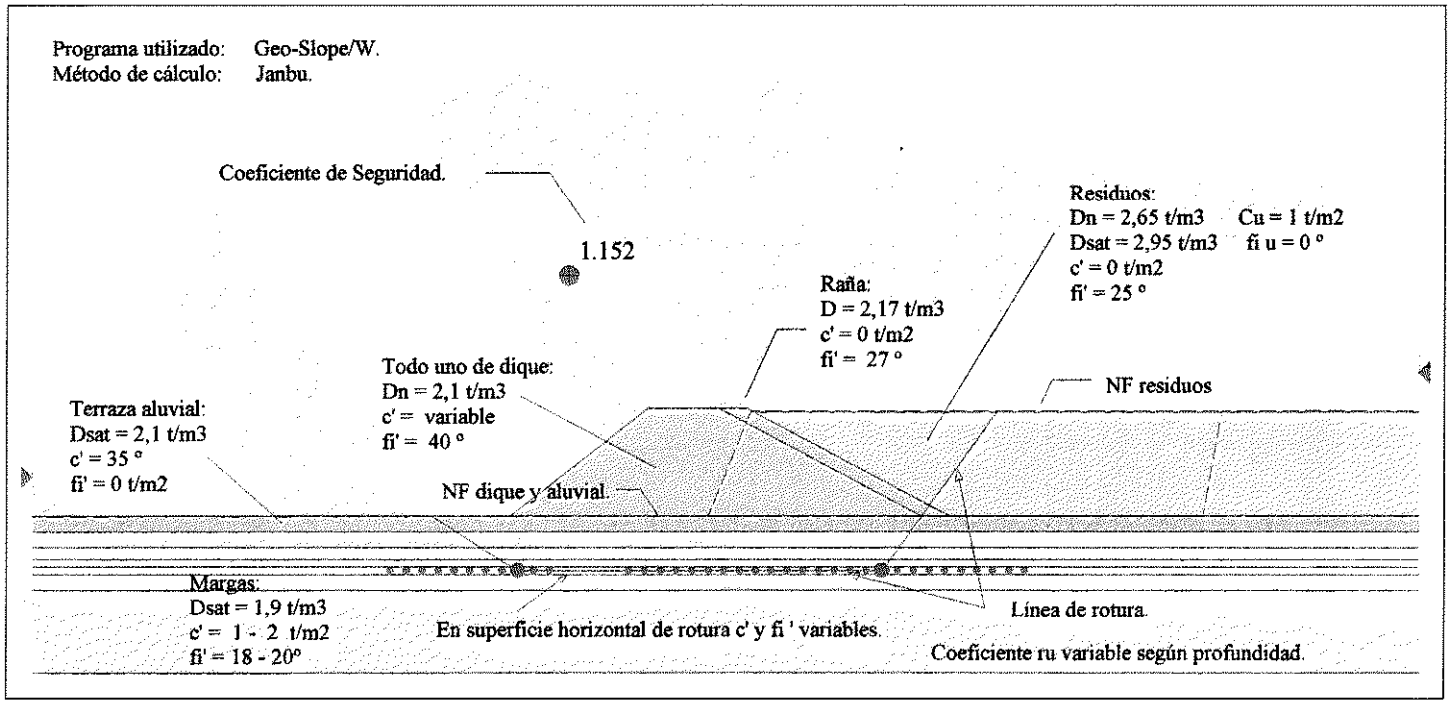


Figura 22. Caracterización de la sección tipo de cálculo.

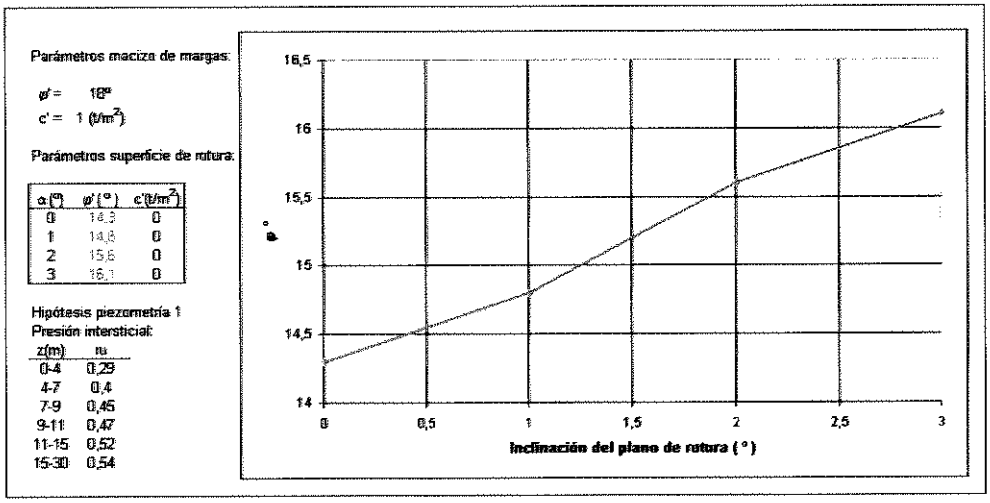


Figura 23.

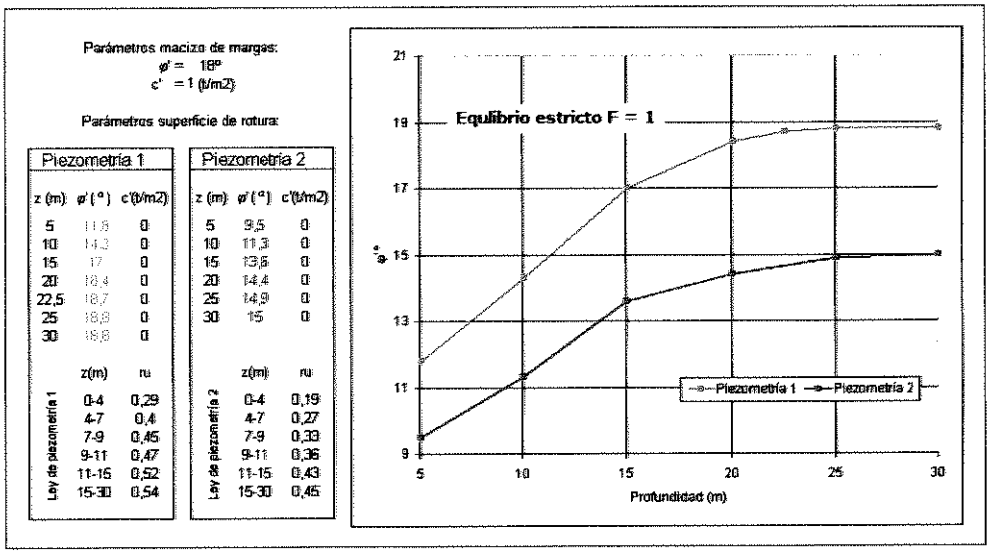


Figura 24.

que las condiciones de equilibrio estricto se alcanzan para ángulos de fricción interna de 14,3° y 11,3° para las piezometrías #1 y #2, respectivamente.

Además, teniendo en cuanta que el buzamiento medio del plano de rotura es de 2° SE, aguas-abajo del dique, los valores del ángulo de fricción para equilibrio estricto serian de 16° y 13° para las dos piezométricas ya citadas, respectivamente.

De lo anterior se deduce que, en el instante de la rotura, la resistencia al corte de las margas en la superficie de rotura estaba entre 16° y 13°, valores inferiores a los estimados para la resistencia "pico" de las margas (20°-18°).

Parámetros macizo de margas:

φ' = 18º
c' = 1 (t/m2)

Profundidad de rotura: 10 m.

Parámetros superficie de rotura:

	H	φ' =	c' =
Caso 1:		14,3º	0 (t/m2)
Caso 2:	15-20m	18º	1 (t/m2)
	25-27m	14,3º	0 (t/m2)

Hdique(m)	B (m)	F1	F2
Piezometría 1			
15	14	1,157	0,991
20	14	1,078	0,904
25	31,4	1,019	1,019
27	25	1,000	1,000
Piezometría 2			
15	14	1,287	1,042
20	14	1,197	0,940
25	31,4	1,031	1,031
27	25	1,000	1,000

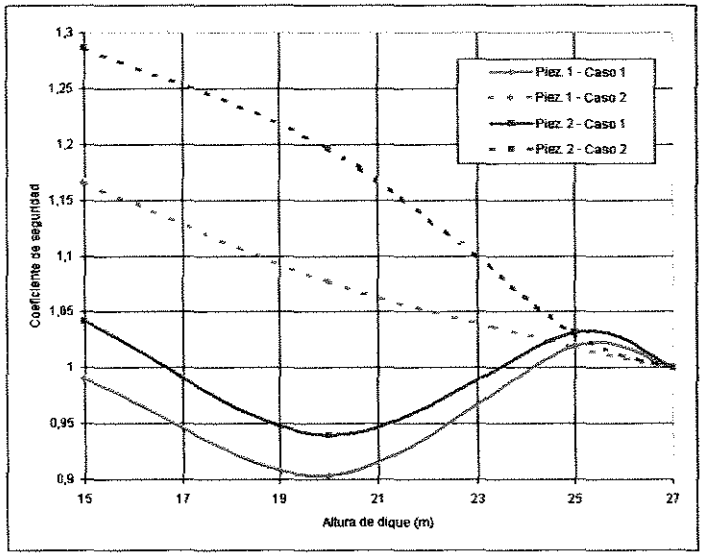


Figura 25.

Además, del análisis anterior se deduce que si el plano de rotura se sitúa a mayor profundidad, el equilibrio estricto se alcanza para ángulos de fricción más altos. Esto significa que, suponiendo que la resistencia de las margas es constante a cualquier profundidad, la rotura se produciría a profundidades mayores de 10 m bajo el techo de la marga.

Dado que la rotura se produjo a 10 m de profundidad bajo el techo de las margas, se concluye que, en el momento de la rotura, la resistencia de las margas en la superficie de rotura era inferior que en otras zonas de la formación margosa.

Sin embargo, la testificación y ensayos realizados en los 58 sondeos que han atravesado los 20-25 metros superiores de la formación de margas bajo el dique y en zonas adyacentes, no ha hallado evidencias de superficies de deslizamiento u otro tipo de planos de debilidad previos a la construcción del dique.

En consecuencia, para llegar al equilibrio estricto, las margas en la superficie de rotura ha tenido que sufrir un proceso de debilitamiento por el que su resistencia ha disminuido hasta los valores por debajo de la resistencia de "pico" antes indicados.

Como se deduce de los ensayos de corte anular realizados, las margas azules sufren una perdida significativa de resistencia al corte cuando se las somete a tensiones por encima de su resistencia "pico". Este comportamiento es típico en arcillas sobreconsolidadas, como lo son las margas azules.

Además, los piezómetros instalados en el dique, registran excesos de presión intersticial significativos, derivados del proceso constructivo del dique que, que equivalen a sobrecargas en el cimiento de margas entre el 32% y el 49% del peso del dique.

En relación con lo anterior, se ha estudiado la evolución del coeficiente de seguridad del dique a lo largo del proceso de recrecimiento (figura adjunta). El estudio confirma que entre 1985 y 1989, debieron producirse situaciones criticas con factores de seguridad próximos a la unidad, resultantes de un periodo de recrecimiento relativamente más rápido, en el que el dique fue recrecido de 12,7 a 21,2 m de altura.

Es probable que el proceso de debilitamiento, comenzase en éstas fases intermedias de la construcción del dique, como consecuencia del exceso de presión intersticial derivado del proceso de recrecimiento.

5.1.2. Sobre la situación de la zona de rotura en el dique

Del análisis paramétrico realizado se deduce que la zona de rotura era el tramo del dique donde la estabilidad era más crítica, y por tanto, la primera que debió alcanzar el estado de equilibrio estricto como consecuencia del proceso constructivo del dique.

La estabilidad critica de esta zona se debe al efecto combinado de las tres condiciones siguientes, que es singular en la zona de rotura: (i) La zona de rotura se encuentra en la balsa de piritas, cuyos residuos los mas densos, (ii) En dicha zona, las alturas de dique y de los residuos son máximas y (iii) Los estratos de margas en la zona de rotura buzan de 1° a 2° hacia aguas abajo del dique.

5.1.3. Sobre la profundidad del plano de rotura.

Para analizar las condiciones que influyeron en el hecho de que éste proceso de rotura progresiva se haya desarrollado precisamente a la profundidad de 10 metros bajo el techo de las margas, es preciso considerar los mecanismos de rotura que caracterizan el fenómeno de rotura progresiva en arcillas sobreconsolidadas.

La rotura progresiva, generalmente se desarrolla en planos de estratificación, progresando a partir de puntos o zonas en los que, debido a un campo tensional más fuerte, a la meteorización o a ambos efectos, la arcilla es sometida a sobrecargas superiores a su resistencia de "pico", lo que destruye los enlaces diagenéticos, reduciendo la resistencia a valores residuales.

En las margas objeto de la investigación, la meteorización generalmente penetra a través de las diaclasas verticales hasta profundidades de 10 m, incluso 15 m. Es por tanto probable que el proceso de rotura haya progresado a partir de múltiples puntos de debilidad situados en la intersección del plano de rotura y las diaclasas verticales, donde las margas sufrieron deformaciones superiores a las de su resistencia "pico" por efecto combinado de la concentración de tensiones en margas debilitadas por la meteorización.

Además, la superficie de rotura "aguas arriba" del dique es casi vertical y corta los residuos embalsados con un trazado casi lineal y paralelo al eje del dique. Esta morfología está probablemente relacionada con la familia de diaclasas verticales de orientación NS

que predominan en la formación margosa. Es por tanto probable, que el proceso de rotura progresiva haya comenzado en la intersección de éstas diaclasas con el plano de rotura.

5.2. Análisis de los Movimientos Post-Rotura

Sin duda alguna, el hecho más destacable de la rotura del depósito de Aznalcóllar, fueron los excepcionalmente grandes desplazamiento del dique, de hasta 60 metros en el centro de la zona de la rotura, lo que no se puede explicar mediante el simple análisis de estabilidad estricta.

Ya se ha indicado que el Método de Equilibrio Límite no permite estimar los movimientos, al menos directamente. Sin embargo, es un hecho comprobado, que grandes desplazamientos, como los sucedidos en Aznalcóllar, sólo pueden tener lugar a través de una reducción brusca del coeficiente de seguridad después de la rotura.

Siguiendo esta línea de razonamiento, se ha aplicado el Método de Equilibrio Límite para calcular el coeficiente de seguridad en diferentes momentos del proceso. Este estudio se ha basado en la geometría del desplazamiento deducida de los sondeos, la evidencia de licuefacción de los residuos de pirita y la interpretación secuencial que se describe a continuación (figuras 26, 27, 28 y 29).

(i) En la fase inicial, al comienzo de la inestabilidad, la superficie de rotura se estima en un ángulo de rozamiento de 14,3° (ó 16° si se considera un buzamiento de 2° SE). En este instante, los residuos están en reposo, con resistencia efectiva y ángulo de fricción de 25°.

(ii) En una segunda fase, los residuos se movilizan, pasando a ejercer un empuje activo, pero funcionando en condiciones sin drenaje (cohesión del orden de 1t/m^2, y fricción nula). El rozamiento en el plano de rotura puede descender hasta 12°. El coeficiente de seguridad en este instante sería de 0,76, y los desplazamientos de orden centimétrico.

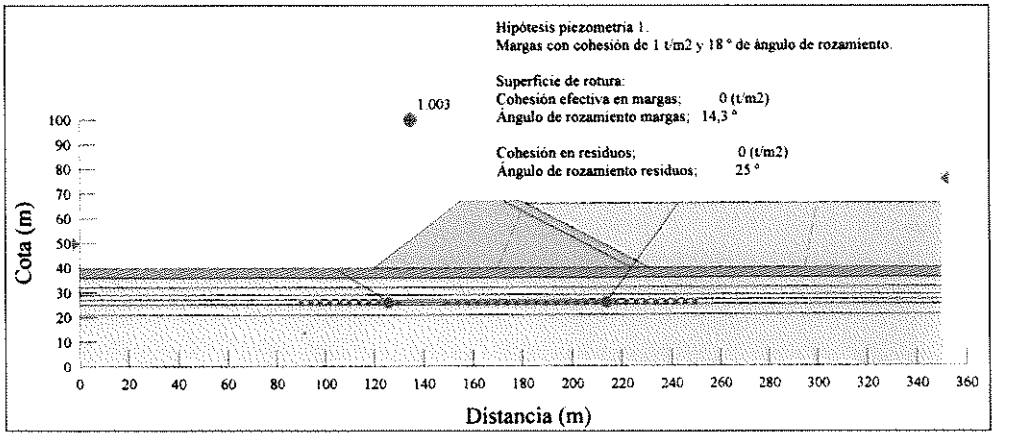


Figura 26. Fase 1: desplazamiento milimétrico

(iii) En una tercera fase, el bloque en movimiento se separa por su extremo "aguas arriba" abriéndose una grieta de anchura métrica y casi vertical, lo que induce el colapso y la licuefacción de los residuos. En estas circunstancias, el coeficiente de seguridad disminuiría a 0,55, el desplazamiento se acelera, y el dique se rompe transversalmente por el norte de la zona desplazada según un plano subvertical, probablemente extensión de una diaclasa vertical en las margas.

(iv) Finalmente, los residuos empiezan a salir y a erosionar la brecha, abriéndose paso a la balsa de piroclastos. Eventualmente, la reducción del empuje junto con el incremento de los empujes pasivos del terreno, vuelven a restablecer el equilibrio.

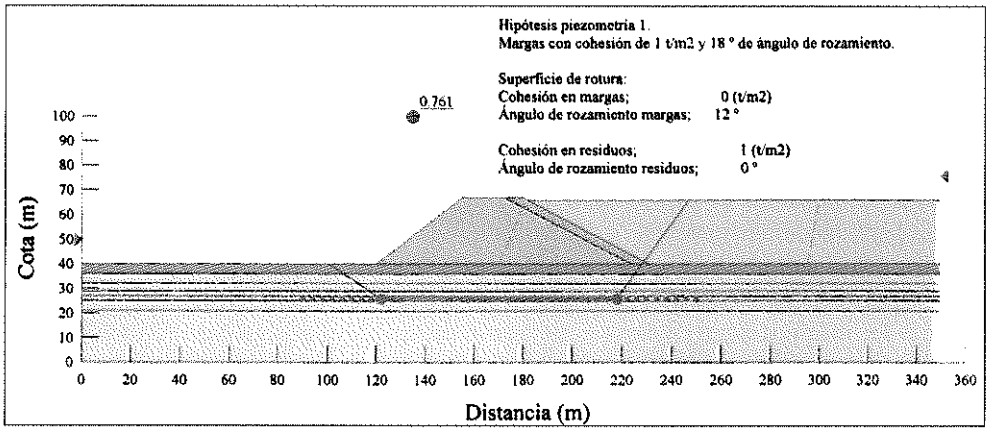


Figura 27. Fase 2: desplazamiento horizontal centimétrico (10-20 cm)

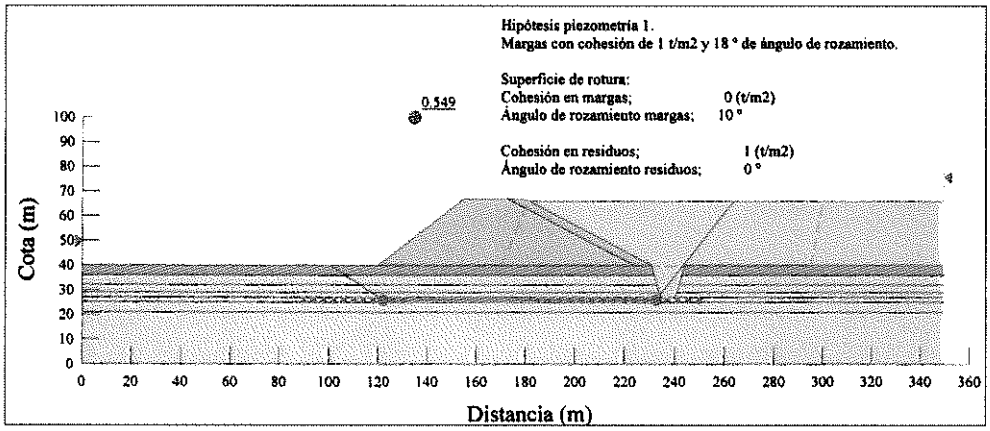


Figura 28. Fase 3: Desplazamiento horizontal métrico (mayor de 5 m)

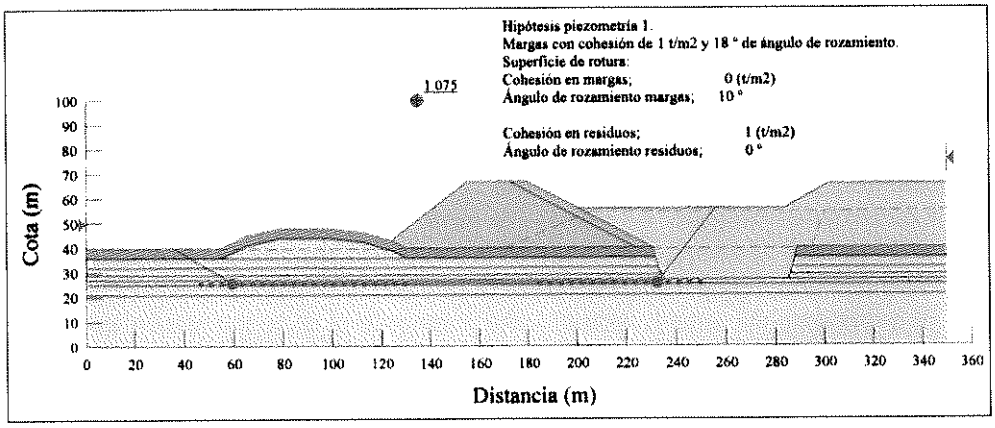


Figura 29. Fase 4 y 5: Estabilidad después de un desplazamiento horizontal del orden de 55 m

6. CONCLUSIONES

Las margas azules son arcillas fuertemente sobreconsolidadas, fisuradas, ricas en carbonatos, de alta plasticidad y de color gris-azulado en estado sano, que pasa a beige al meteorizarse. Presentan una textura laminar asociada a la estratificación. La orientación de los planos de estratificación en la zona de desplazamiento, se ha estimado en N65°E, buzando 2° SE. Además, el macizo margoso contiene un diaclasado sistemático subvertical, que probablemente jugó un papel importante en el mecanismo de rotura.

Una importante característica de las margas es su comportamiento tenso-deformacional, por el que sufren una pérdida significativa de resistencia al corte cuando se las somete a tensiones por encima de su resistencia "pico". Este comportamiento es característico de la sobreconsolidación y requiere una especial consideración en el diseño de estructuras sobre tales materiales.

La investigación ha demostrado que la rotura se inició por sobrecarga y fallo progresivo en un plano de estratificación en la formación margosa, y que fue principalmente consecuencia del exceso de presión intersticial inducido en las margas durante el proceso constructivo del depósito. Se ha medido la presión intersticial mediante sensores piezométricos, estimándose que ésta supone una reducción de las acciones resistentes del cimiento de margas de más de un 25%.

Del análisis paramétrico realizado por el Método del Equilibrio Límite, se llegó a la conclusión de que la reducción de resistencia inducida por las presiones intersticiales en las margas, favoreció el desarrollo de un proceso de debilitamiento por el que la resistencia al corte de la superficie de rotura disminuyó progresivamente hasta valores por debajo de la resistencia de "pico", alcanzando incluso la resistencia residual.

Además, se ha demostrado que la rotura se produjo en el tramo del dique en que la estabilidad era más crítica. De hecho, la rotura se produjo en la balsa de piritas (con los residuos más densos), en una zona con alturas de dique y residuos mayores que en

cualquier otra zona del depósito, donde además la estratificación de las margas buza 1° a 2° hacia aguas abajo. El conjunto de las tres condiciones anteriores solo se dá en la zona de rotura.

El mecanismo de rotura se desarrolla, en un tiempo indeterminado, a partir de una fase inicial de debilitamiento lento y progresivo a lo largo de un plano de rotura, que eventualmente alcanza la inestabilidad. Tras la inestabilización inicial y el aumento de la velocidad del movimiento, los residuos de pirita se licuefactaron, aumentando el empuje sobre el dique al tiempo que disminuía la resistencia al movimiento, lo que explica la excepcional magnitud del desplazamiento.

El incremento del empuje lateral acabó generando el corte por cizalla en el lado norte del bloque en movimiento, probablemente a través de una diaclasa subvertical en las margas. Se abrió una brecha y comenzaron a fluir hacia fuera el agua y los residuos licuefactados. A continuación, la brecha se fue ensanchando por la desestabilización y la erosión, provocando finalmente la intercomunicación de ambas balsas.

CAPÍTULO 3

CONTAMINACIÓN Y DESCONTAMINACIÓN AZNALCÓLLAR

J. Aguilar

Departamento de Edafología y Quimica Agrícola.Granada

El yacimiento de Aznalcóllar forma parte del grupo de mineralizaciones de la Faja Pirítica Ibérica. Su origen es vulcano sedimentario, por intrusiones volcánicas submarinas de carácter ácido y básico alternante que, durante el Hercínico, atraviesan materiales sedimentarios preexistentes precámbricos y paleozoicos que precipitan finalmente como sulfuros metálicos sobre el fondo marino.

En la madrugada del 25 de abril de 1998, una brecha de algo más de 50 metros de anchura se abre en la cara este del dique que configura la balsa, en la zona de intersección entre el muro frontal de contención, próximo al río, y el muro separador de los dos vasos internos en que se divide la balsa, afectando al contenido de ambas zonas. Como consecuencia de la ruptura, parte del contenido de la balsa, constituido por lodos (restos de piritas flotados) y aguas ácidas con compuestos metálicos en disolución, se vierte directamente a las aguas del río Agrio pasando a su vez al río Guadiamar. Se estimó que un total de 2 hm^3 de lodos y 4 hm^3 de aguas ácidas se liberaron directamente al cauce de estos ríos.(Figura 1)

Se procedió a reforzar y proteger las márgenes del río en las zonas del Brazo de la Torre, Dehesa de Abajo y canales de acceso a fincas agrícolas, para evitar la dispersión del vertido. Se construyó un muro de contención a la altura de la zona denominada "Vuelta de Arena" y se trató de desviar el efluente hacia el Canal de Aguas Mínimas y el Brazo de la Torre. Este muro de contención fué desbordado a las 24 horas del vertido y la inundación progresó por la zona de Entremuros, por lo que se construyó un segundo muro de contención en el límite norte de la finca "El Lucio del Cangrejo", limítrofe con el Parque Nacional de Doñana, que consiguió detener definitivamente el vertido.

Como efecto inmediato del vertido de agua y lodo se produjo el desbordamiento del río Guadiamar, y se inundaron las zonas de ribera fluvial y las tierras colindantes. Los lodos sedimentaron en los primeros 40 kilómetros del cauce afectado, mientras que las aguas progresaron unos 18 kilómetros más, hasta las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana y del río Guadalquivir, en una zona situada en Entremuros. Se contaminaron un total de 4286 hectáreas (2710 ha cubiertas por lodos y el resto por aguas ácidas) y 9 municipios se vieron afectados.

Al iniciar los estudios en la cuenca del Guadiamar un par de días después de la rotura de la balsa de decantación de estériles (Figuras 2 y 3) de la mina pirítica gestionada por la empresa Boliden-Apirsa, nos planteamos dos objetivos. Por un lado queríamos conocer las características que presentan los suelos y, concretamente, su poder de amortiguación frente a la contaminación. Las propiedades más importantes que condicionan el poder de amortiguación de los suelos frente a la contaminación son: textura, porosidad, permeabilidad, dinámica del agua, pH, potencial redox, cambio iónico, contenido en carbonatos, sales, nutrientes, materia orgánica, mineralogía de las arcillas y microorganismos.

En el caso que nos ocupa, (contaminación por metales pesados por aguas y lodos ácidos) los suelos que presentan una mayor capacidad de retener los metales pesados y evitar la contaminación de las aguas serán aquellos que presenten una textura arcillosa, sean impermeables (baja porosidad), tengan un pH básico, posean una alta capacidad de cambio iónico, bajos valores de Eh, y contengan carbonatos y sales.

Figura 1. Detalle de la rotura de la balsa de acumulación de estériles

Figura 2.

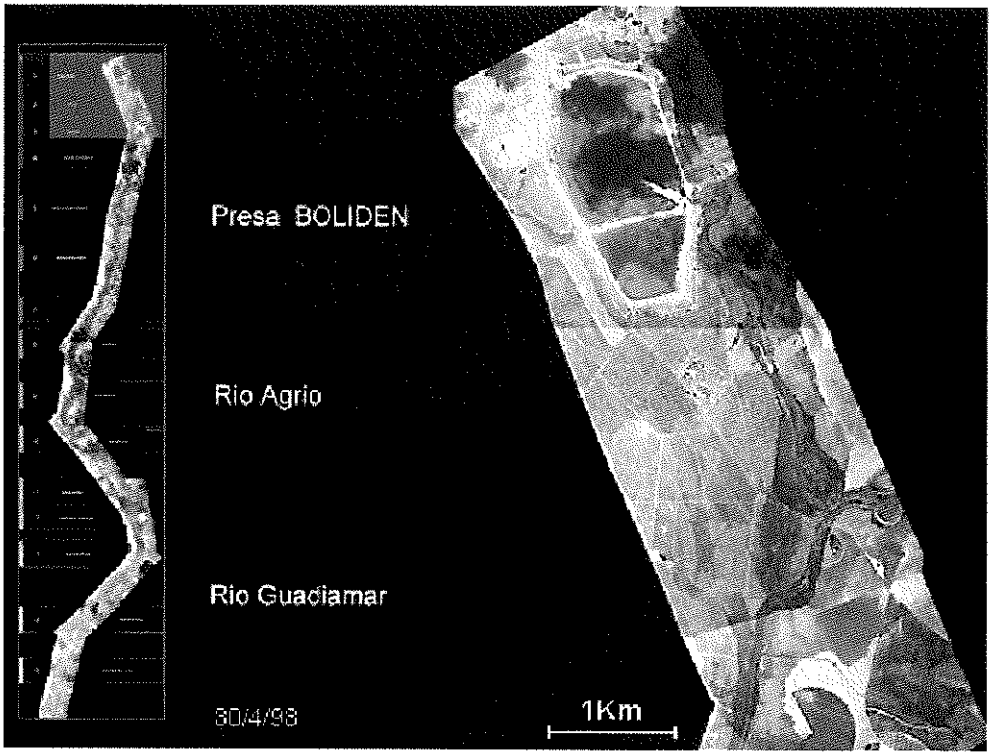


Figura 3.

Por otra parte, nos interesaba conocer el estado de contaminación de los suelos de la cuenca, así como la dinámica de la misma. Para ello elegimos en primer lugar una serie de zonas con características diferenciales (Figs. 4 y 5) y en cada una de ellas analizamos las aguas, los lodos, los suelos no alterados y los suelos contaminados (Fig. 6 y 7).

Del análisis de las gráficas anteriores podemos deducir lo siguiente: Dado que las aguas no contienen nada de bismuto, todo el bismuto que ha entrado lo ha hecho por el lodo, por lo que viendo la diferencia en el contenido en bismuto entre los suelos contaminados y los suelos no afectados sabremos la contaminación existente en bismuto y como sabemos la cantidad de bismuto existente en el lodo en cada zona, podemos saber exactamente la cantidad de lodo que ha entrado en las diferentes zonas estudiadas (Fig. 8).

La distribución desigual del lodo en los suelos se debe a la diferente estructura de los mismos (Fig. 9). Como conocemos la composición de los lodos en cada zona podemos saber lo que se debe de cada contaminante a la entrada por el lodo. El resto del contaminante existente (deducido por la diferencia entre suelos contaminados y suelos no afectados) habrá entrado por el agua.

En la Tabla 1 se presentan los porcentajes de los elementos contaminantes que han entrado en el suelo por el agua y por el lodo en las distintas zonas estudiadas.

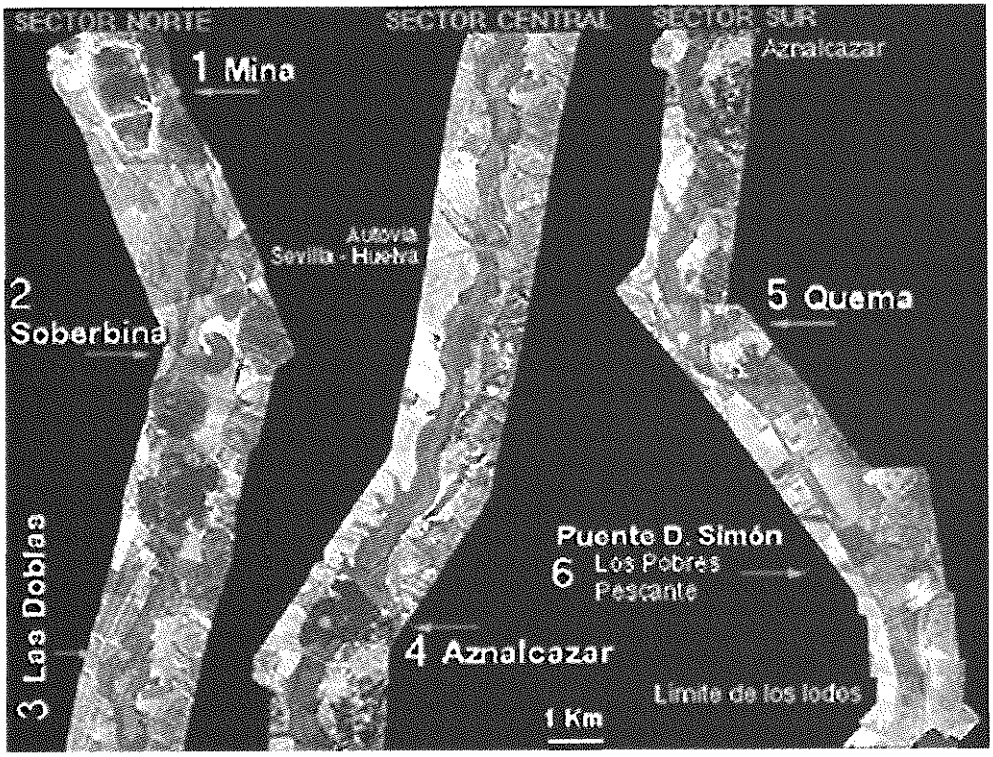


Figura 4.

Es de destacar en dicha tabla cómo Sb y Bi han entrado exclusivamente por el lodo, Cd, Cu, Zn entran en el suelo preferentemente por el agua y, por el contrario, Tl, Pb y As entran en el suelo principalmente por el lodo. Esto es debido a la diferente solubilidad de estos elementos.

En la Figura 10 se representa la contaminación de los suelos en Cd en las distintas zonas mostrando lo que ha entrado por el agua y lo que ha entrado por el lodo; se observa que la entrada de Cd en el suelo tiene lugar principalmente por el agua excepto en la zona del Pescante en que tiene lugar a partes iguales, lo que se debe a la estructura muy pedal del suelo en esta última zona (Fig. 9).

Podemos llegar todavía un poco más lejos. Dado que conocemos la capacidad de retención de agua, podemos saber el contenido retenido de cada uno de los contaminantes en el agua de los poros, la entrada por el agua de gravedad y la entrada por el lodo. En la Figura 11 mostramos la retención de Cd en los poros y la entrada por agua y lodo en los distintos sectores.

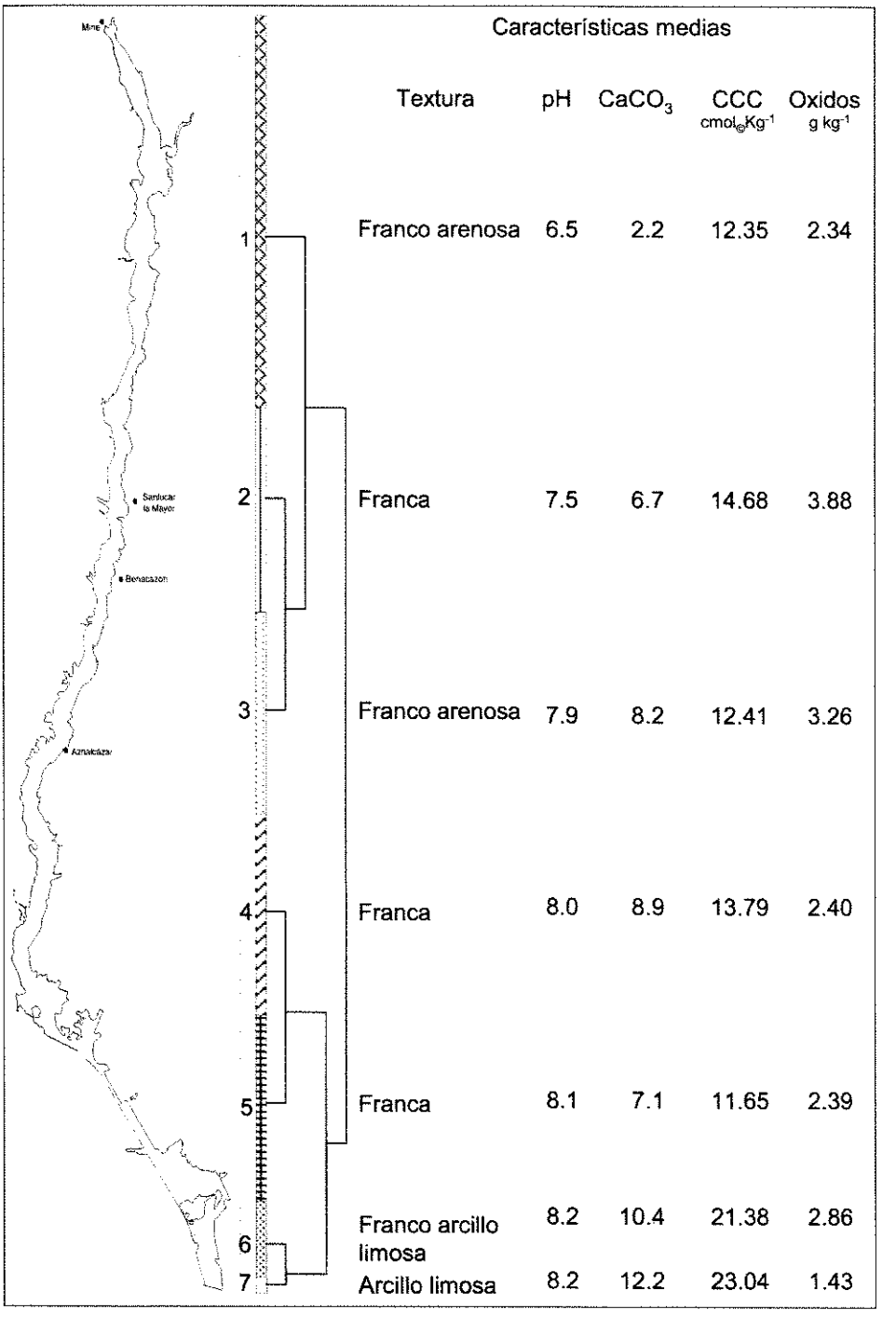

Características medias
Textura
pH
$CaCO_3$
CCC
$cmol_{(+)}Kg^{-1}$
Oxidos
$g\ kg^{-1}$
1
Franco arenosa
6.5
2.2
12.35
2.34
2
Franca
7.5
6.7
14.68
3.88
3
Franco arenosa
7.9
8.2
12.41
3.26
4
Franca
8.0
8.9
13.79
2.40
5
Franca
8.1
7.1
11.65
2.39
6
Franco arcillo limosa
8.2
10.4
21.38
2.86
7
Arcillo limosa
8.2
12.2
23.04
1.43

Figura 5.

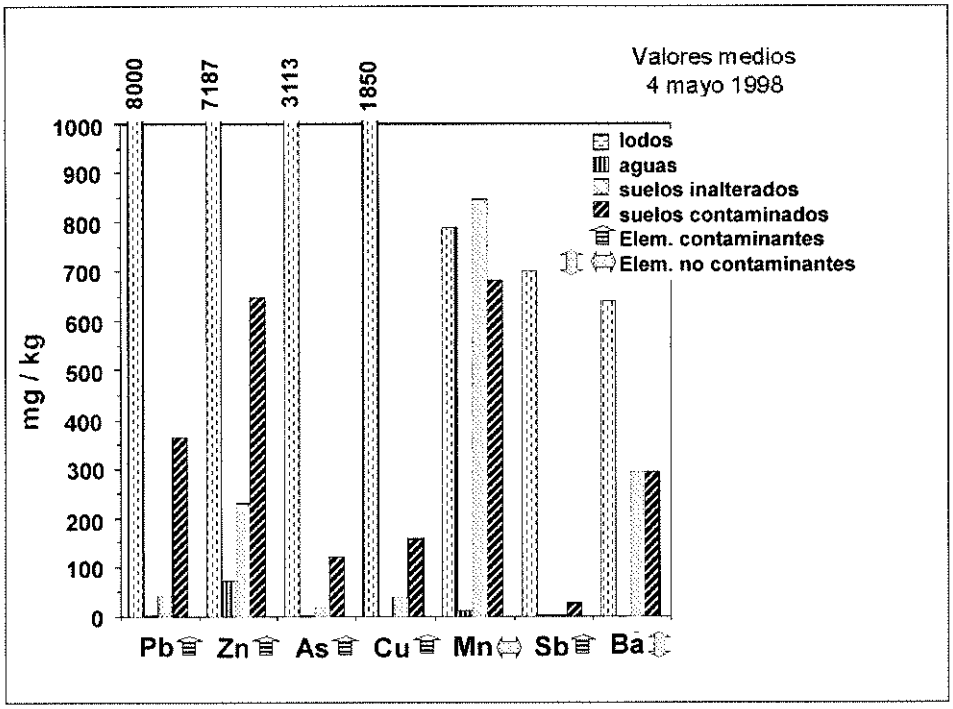


Figura 6.

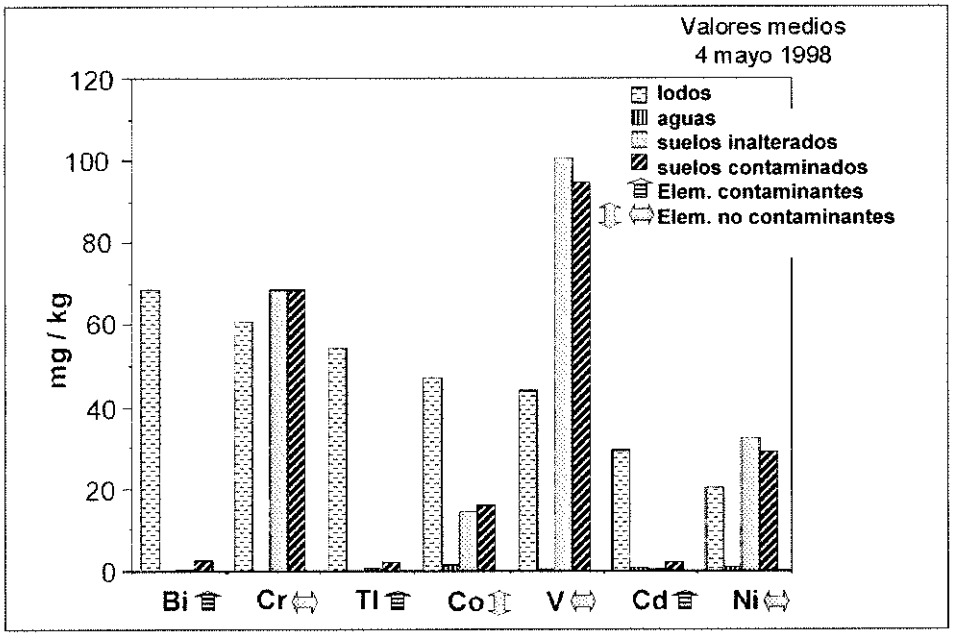


Figura 7.

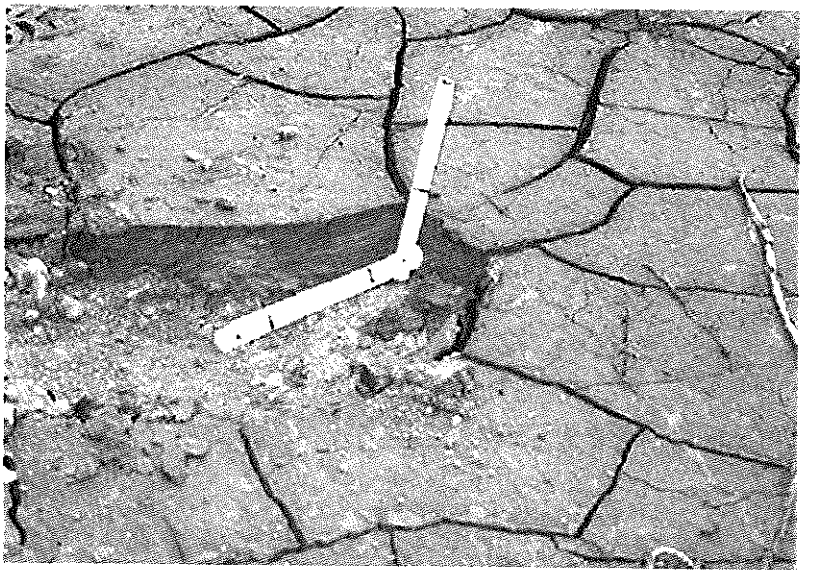
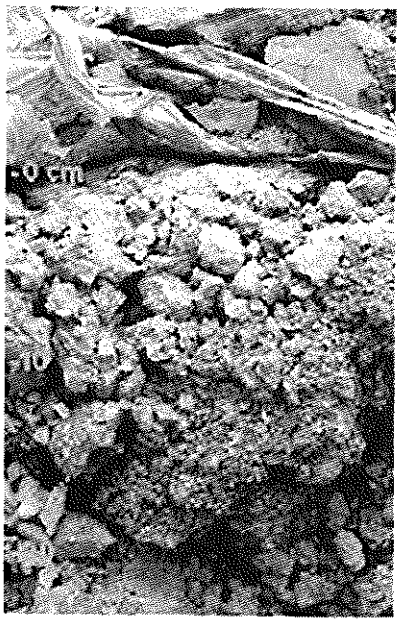


Figura 8.



QUEMA

Estructura poco desarrollada
Contacto neto. Penetración pequeña

PESCANTE

Estructura muy desarrollada
Amplias grietas. Penetración intensa

Figura 9.

Tabla 1. Contaminación por lodo y agua.

Sector	ZmQ/k	Param	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Bi	Ti	Pb
Mina	7,4	Sci-SNCi	16,8	98,7	115	0,41	2,59	0,31	0,32	42,6
		X %	71	54	95	52	100	100	96	76
		Y %	29	46	5	48	0	0	4	24
Sober-bina	1,7	Sci-SNCi	21,7	59,9	4,34	0,29	1,16	0,12	0,11	20,9
		X %	15	19	89	16	100	100	97	68
		Y %	85	81	11	84	0	0	3	32
Doblas	12,5	Sci-SNCi	124,8	472	52,1	2,32	9,78	1,07	0,86	198,3
		X %	22	21	98	19	100	100	97	60
		Y %	78	79	2	81	0	0	3	40
P.Aznal.	3,7	Sci-SNCi	41,5	345,1	16,1	1,76	2,93	0,32	0,25	58,3
		X %	19	8	95	8	100	100	97	61
		Y %	81	92	5	92	0	0	3	39
Quema	9,4	Sci-SNCi	153	261	34,8	1,44	7,22	0,76	0,57	100,2
		X %	12	25	100	19	100	100	100	90
		Y %	88	75	0	81	0	0	0	10
Pescante	153,5	Sci-SNCi	352,9	3266,4	572,2	9,18	129,9	11,7	8,69	1710,9
		X %	88	34	100	41	100	100	95	86
		Y %	12	66	0	59	0	0	5	14
Pobres	26,3	Sci-SNCi	62,6	411,9	62,6	1,27	10,2	1,01	0,89	149,2
		X %	46	40	97	47	100	100	98	85
		Y %	54	60	3	53	0	0	2	15

X = % de contaminante por la entrada de lodo Y = % de contaminante por la entrada de agua

En las diferentes zonas muestrales se procedió al análisis de los distintos contaminantes tanto en el lodo como en los suelos afectados para ver su evolución con el tiempo y, así, se analizaron lodos y suelos los días 4/5/98, 20/5/98 y 4/6/98. Los resultados obtenidos los recogemos en las Figuras 12 y 13. En dichas figuras vemos cómo en los extractos procedentes de lodos (Figura 12) la cantidad de elementos contaminantes aumenta del 4/5/98 al 20/5/98 y luego disminuye en los análisis de las muestras recogidas el día 4/6/98; en cambio en los suelos (Figura 13) la contaminación aumenta del 4/5/98 al 4/6/98. Esto ha ocurrido así porque ha tenido lugar un proceso de oxidación en los lodos, lo que puede deberse al oxígeno o al Fe^{3+} acompañado o no por thiobacillus. En función de cuál sea el oxidante se libera mayor o menor cantidad de protones, según las reacciones siguientes:

$$FeS_2 + 15/4\ O_2 + 1/2\ H_2O \longrightarrow Fe^{3+} + 2\ SO_4^{2-} + H^+$$
$$15\ Fe^{2+} + 15/4\ O_2 + 15\ H^+ \longrightarrow 15\ Fe^{3+} + 15/2\ H_2O$$
$$FeS_2 + 14\ Fe^{3+} + 8\ H_2O \longrightarrow 15\ Fe^{2+} + 2\ SO_4^{2-} + 16\ H^+$$

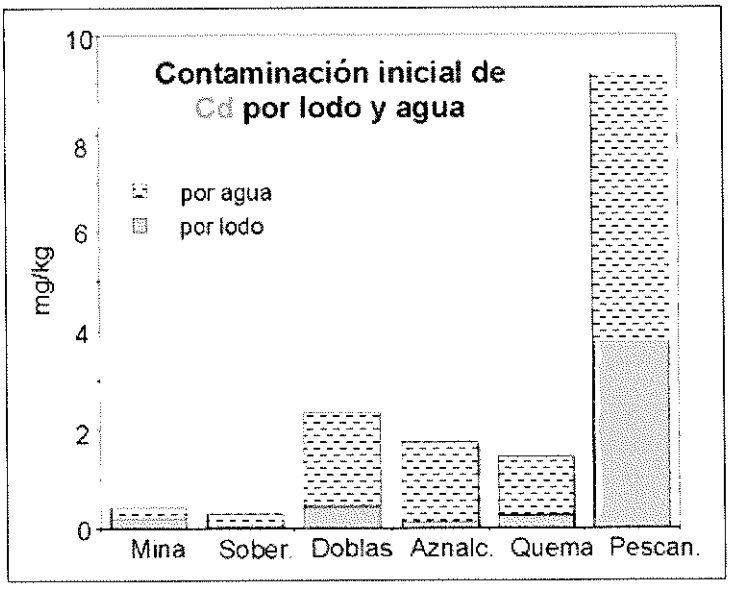


Figura 10.

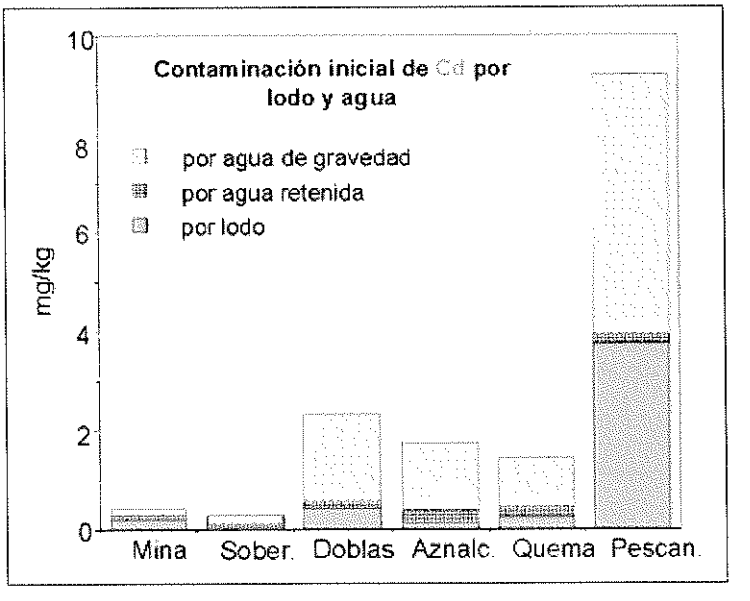


Figura 11.

y la oxidación va acompañada del paso de sulfuros a sulfatos, con el correspondiente descenso del pH, como podemos ver en la Figura 14. El paso de sulfuros a sulfatos se reconoce inmediatamente en el terreno porque el lodo pasa del color negro de los sulfuros al color blanco de los sulfatos (Figura 15).

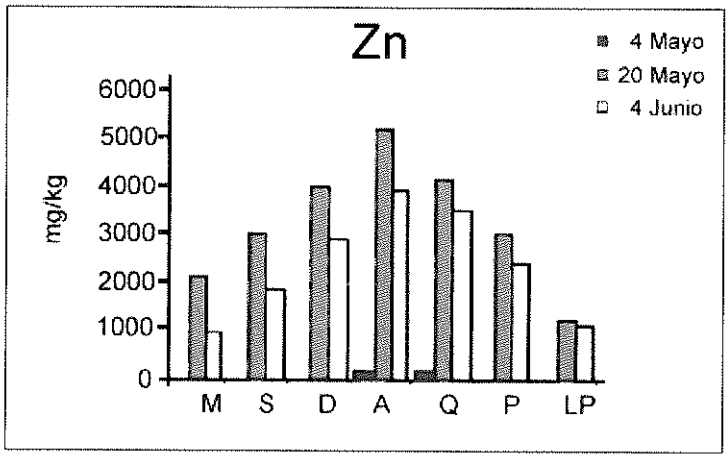


Figura 12.

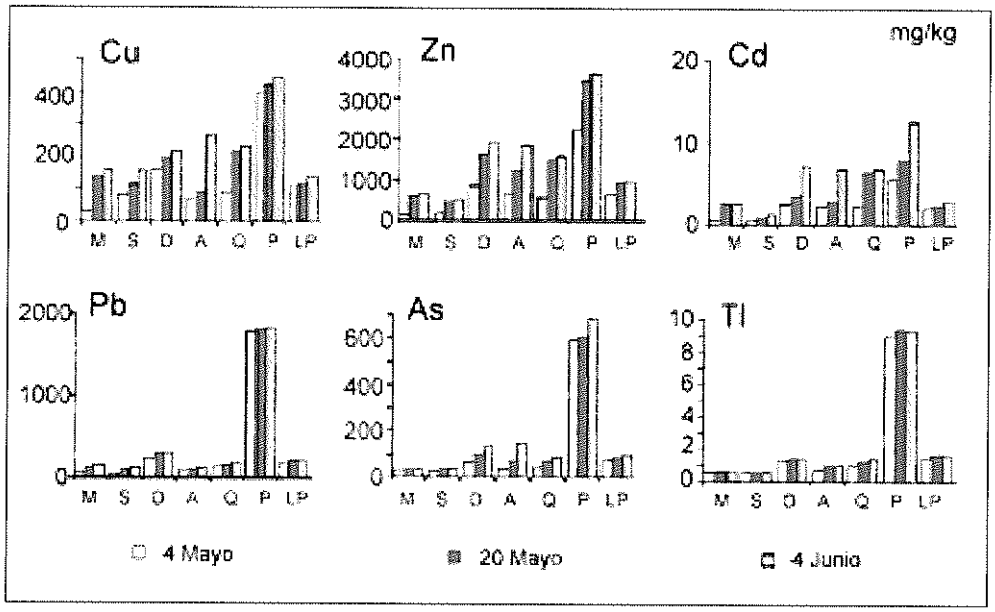


Figura 13.

Como estos sulfatos son solubles, se produce la solubilización de los contaminantes bajo la forma de sulfatos que entonces pueden pasar al suelo y condicionan un aumento en la contaminación del mismo, tanto mayor cuanto mayor es la oxidación de los lodos. Este proceso nos permite distinguir dos fases en la contaminación de los suelos: una primera contaminación inicial en la que se produce una entrada directa de los contaminantes al suelo por el agua y el lodo (Figura 16) y una contaminación secundaria donde se

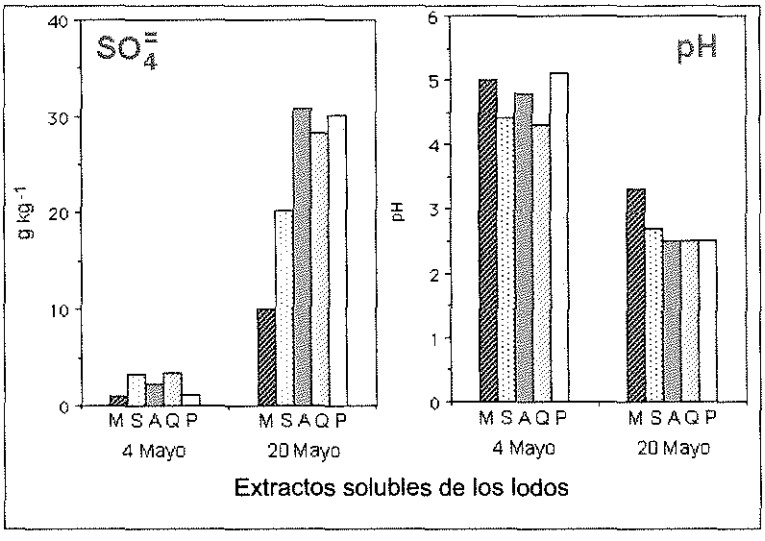


Figura 14.

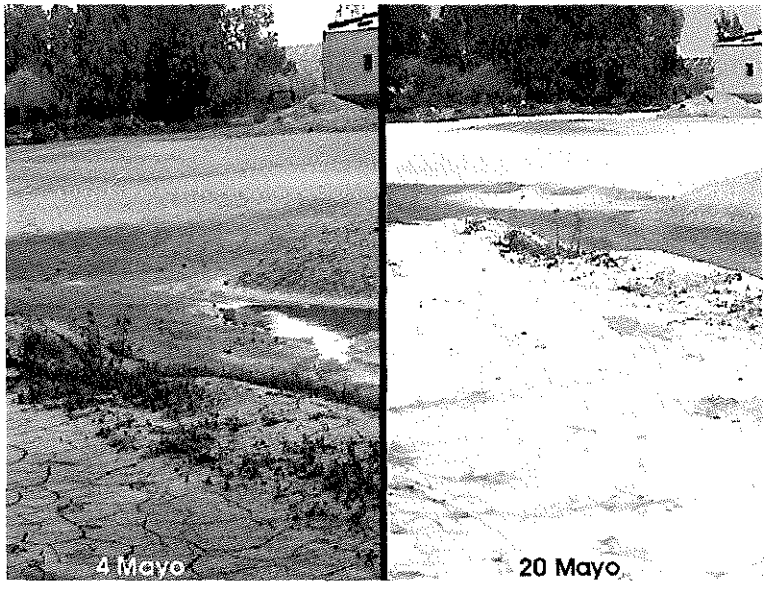


Figura 15.

produce una desecación, oxidación y disolución de los contaminantes en el lodo y su paso a suelos (Figura 17). Así, podemos conocer qué cantidad de contaminantes han entrado en el suelo por la vía de la oxidación, ya que será la diferencia entre la contaminación un poco antes de quitar los lodos y la contaminación inicial.

En la Figura 18 tenemos la contaminación en Zn producida en la contaminación inicial, debida al lodo y al agua, y la ocasionada por la contaminación secundaria, por

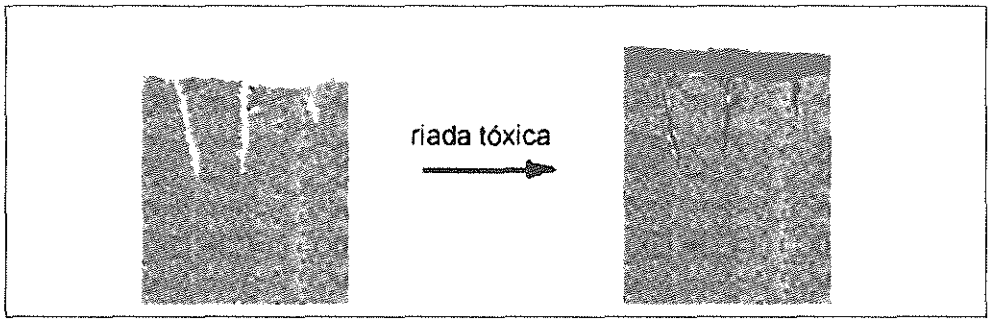


Figura 16. Contaminación inicial directa del suelo debida a las aguas y lodos.

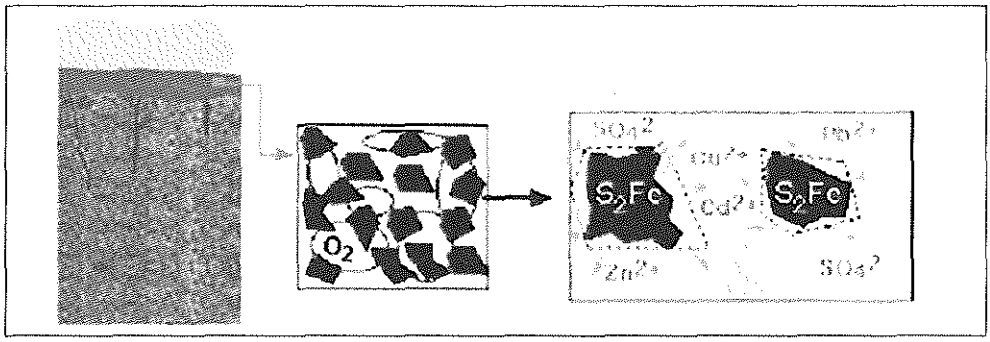


Figura 17. Contaminación secundaria. Desecación parcial, oxidación y disolución.

oxidación. Observamos que este último mecanismo el que produce una mayor contaminación. Por tanto, cuanto antes se quitaran los lodos menos se contaminarían los suelos. Está claro pues que la retirada de los lodos era urgente, pues en caso contrario hubiera entrado toda la carga contaminante existente en los mismos al suelo, por lo que ésta no hubiera hecho más que aumentar.

El proceso también se puede observar en las Figuras 19 y 20. En la Figura 19 se ve cómo al principio no existe nada entre el lodo y el suelo, el límite es abrupto pero con el tiempo aparece una orla difusa entre ambos medios. En la Figura 20 tenemos sobreimpreso el contenido en arsénico desde el lodo hasta el suelo y vemos cómo éste va disminuyendo progresivamente.

Hasta ahora sólo hemos hablado de los principales contaminantes (Cd, Cu, Zn, Tl, Pb y As) pero fueron analizados otros muchos como podemos observar en la Tabla 2 en la que exponemos los contenidos máximos, mínimos, medios y la desviación estándar.

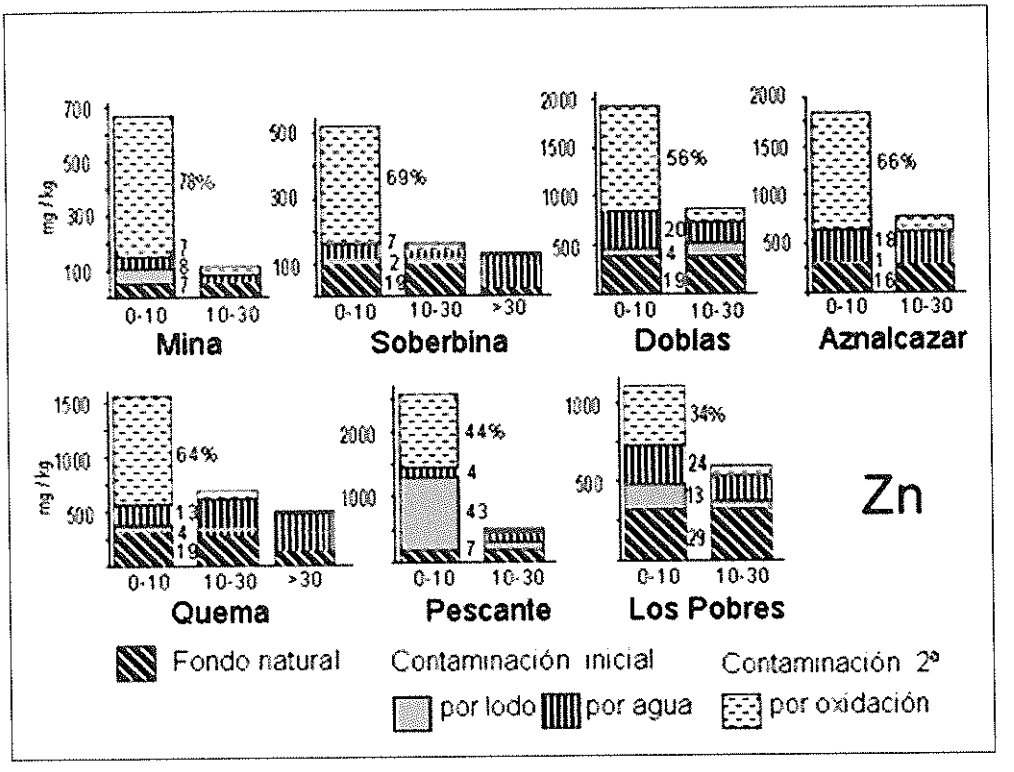


Figura 18.

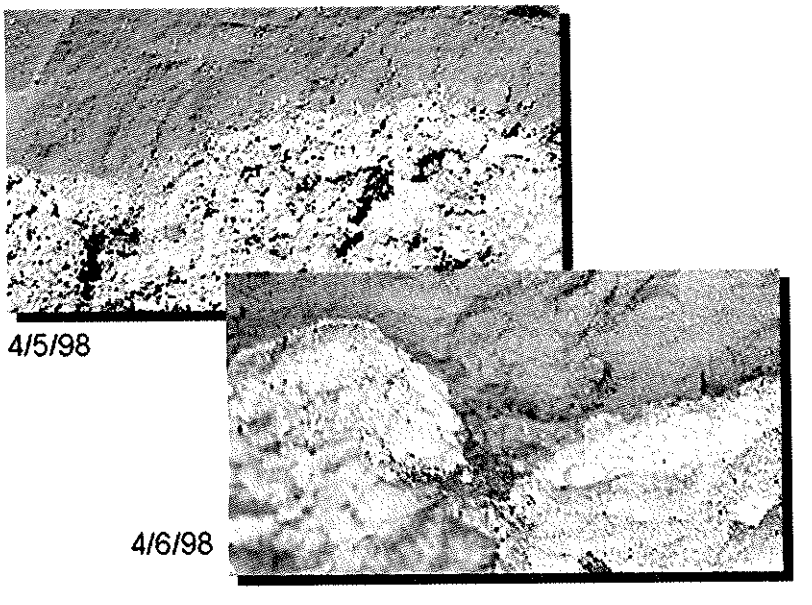


Figura 19.

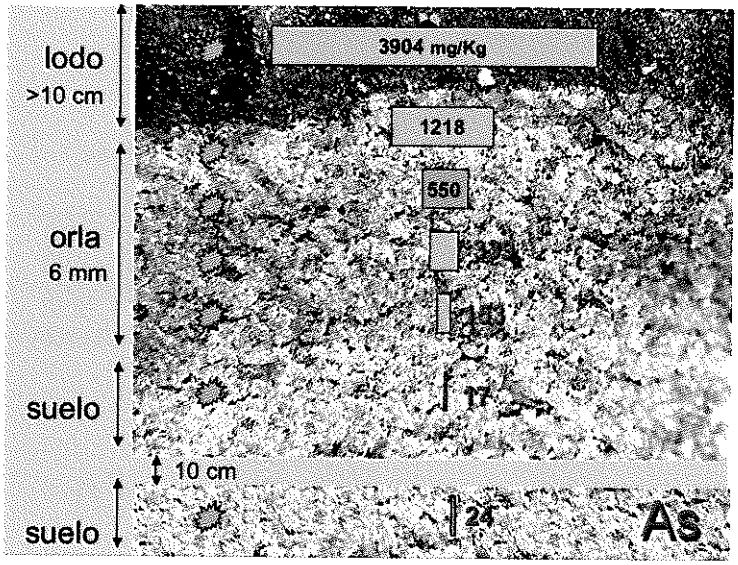


Figura 20.

Tabla 2. Análisis de suelos afectados (0-10 cm).

mg / kg				
Elem.	Máximo	Mínimo	Media	Ds
Mn	1030,0	470,6	681,9	172,8
Zn	2235,2	144,6	747,9	705,7
Pb	1785,5	60,0	370,4	627,6
Cu	400,8	33,8	132,8	124,2
As	603,7	29,0	127	211,1
Sb	145,6	0,4	27,7	52,1
Ba	378,3	216,6	292,1	55,4
V	127,7	75,6	94,7	17,4
Ti	8,9	0,5	2,1	3,1
Cr	103,2	45,1	68,5	18,8
Co	22,7	10,2	15,9	3,8
Bi	12,6	0,5	2,6	4,4

mg / kg				
Elem.	Máximo	Mínimo	Media	Ds
Cd	5,7	0,4	2,2	1,8
Ni	40,4	17,4	29,1	7,5
Sn	4,8	0	1,0	1,8
Y	22,2	12,5	18,3	3,6
Be	2,7	1,0	1,8	0,6
U	2,2	1,1	1,7	0,4
Th	19,5	9,1	13,9	4,1
Sc	16,5	6,2	10,9	3,3
Hg	0,6	0,2	0,4	0,1
Mo	2,1	0	0,7	0,7
In	0,6	0,1	0,2	0,2
Se	3,4	0	0,5	1,3

LA RETIRADA DE LOS LODOS

Había pues que quitar los lodos y se procedió a la retirada de los mismos. Dicha retirada se llevó a cabo en un tiempo récord, conseguido gracias a un gran despliegue de medios económicos y de todo tipo. Podemos destacar la numerosa flota de camiones (Figura 21) y, a pesar de los inevitables accidentes, la sincronización que hubo. El material que se iba extrayendo se iba depositando en una antigua corta (Figura 22). Fué durante este período cuando se alcanzaron los niveles más altos de aerosoles y de metales pesados en las partículas atmosféricas (Figura 23); la contaminación eólica alcanzó los niveles más elevados en esta fase (Figura 24) a pesar de que las medidas que se dictaron fueron exhaustivas (Figura 25).

Una vez retirados los lodos, el terreno parecía limpio (Figura 26) pero con las primeras lluvias se demostró que esto era sólo aparente (Figura 27). Existía una contaminación, que se demostró que era en mosaico, como podemos observar en la Figura 28, donde vemos que las zonas menos contaminadas son las que soportan más vegetación. Por otra parte, determinando el pH observamos que las zonas carentes de vegetación presentan valores de pH más bajos mientras que las zonas con más vegetación son las que tienen valores pH más elevados.

Figura 21.

Figura 22.

Figura 23.

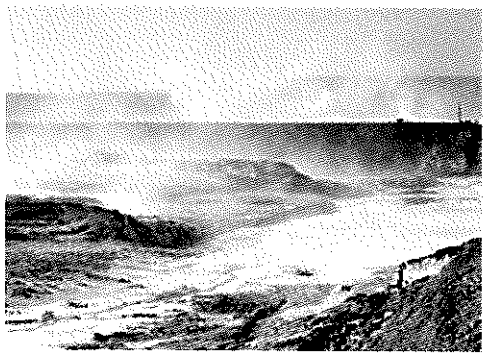


Figura 24.

Figura 25.

Figura 26.

Figura 27.

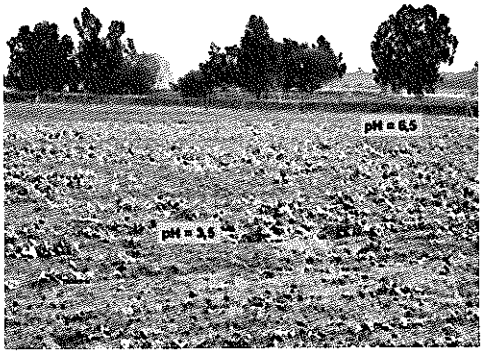


Figura 28.

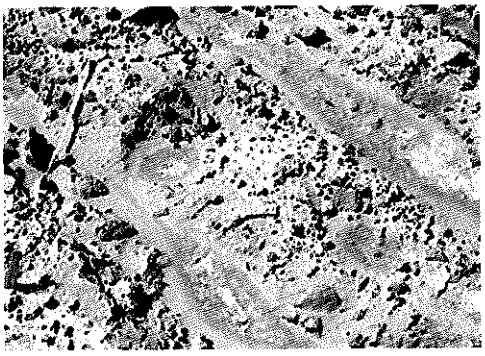


Figura 29.

En las áreas donde se existen irregularidades del terreno, con pequeñas elevaciones y depresiones, podemos observar acumulaciones de sulfatos y de compuestos de hierro (Figura 29), lo que también debe ocurrir en el interior del suelo cuando penetra el agua. Se produce pues una contaminación que podemos llamar terciaria que es similar a la secundaria pero que se produce en el interior del suelo y, además, tienen lugar removilizaciones superficiales.

Según lo expuesto la contaminación se realiza en tres etapas consecutivas, las cuales tienen las siguientes características:

1. Contaminación inicial

Llegada del vertido, con una penetración en los suelos muy desigual, siendo los contaminantes principales: Zn, Pb, Cu, As, Sb, Bi, Cd y Tl

Hay una tendencia a la acidificación pero que es neutralizada por los carbonatos existentes

2. Contaminación secundaria

Los lodos se secan y se produce una oxidación de los mismos, por lo que los sulfuros se transforman en sulfatos

Con la lluvias se solubilizan los sulfatos y el suelo se contamina por infiltración

3. Contaminación terciaria

Una vez retirada la capa superficial de lodos se crea una acción similar a la etapa anterior pero en el interior del suelo

Además se reproducen removilizaciones superficiales

RED DE MUESTREO

Está pues claro que, a pesar de haber retirado los lodos, subsiste una contaminación, contaminación que tenemos que conocer, y para esto diseñamos por ordenador una red de muestreo centrada en el interior de 400 m de lado (Figura 30). Ahora bien, no podemos olvidar el tipo de contaminación presente, en mosaico, por lo que, para tener en cuenta este hecho, hicimos un diseño de muestreo en el que se tomaban muestras compuestas y elegidas completamente al azar, como indicamos en la Figura 31. La forma de proceder es la siguiente: al llegar al punto muestral seleccionado, localizado con el GPS, lanzamos cualquier objeto al aire y desde donde cae indicamos tres pares de números, el primer número corresponde a los grados a girar con respecto a la dirección. Una vez realizados los tres pasos entonces ése es el punto central. Tomamos otra muestra compuesta de 10 a 30 cm con los puntos de una diagonal de ese cuadrado y, finalmente, una muestra simple a más de 50 cm en el punto central tal y como se indica en la Figura 32.

Con este procedimiento obtuvimos 333 puntos de muestreo de los que se tomó uno de cada 4 puntos, con lo que resultaron 100 puntos de muestreo, En cada punto se muestreó a 3 profundidades, la muestra de 0-10 cm constituida por 5 submuestras, la de 10-30 cm constituida por 3 submuestras y finalmente la muestra tomada a más de 50 cm constituida por una sola submuestra.

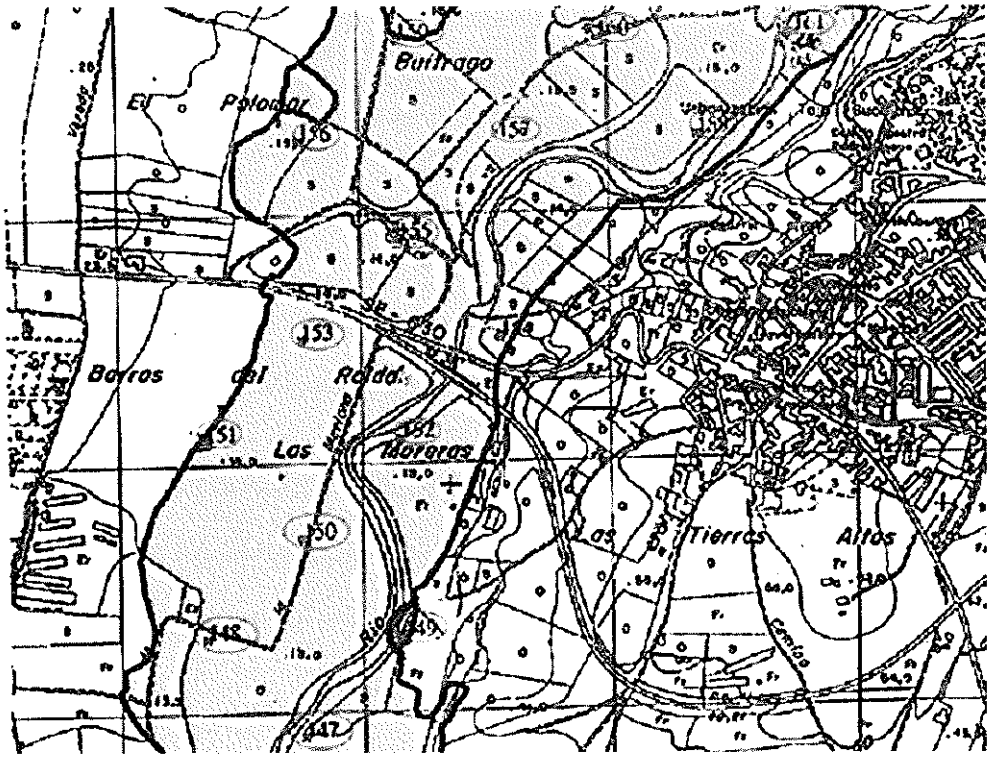


Figura 30.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: En la Figura 33 se representan los resultados para el Cd. En dicha figura podemos observar que el nivel de referencia es de 2 mg kg^{-1} para los suelos ácidos y de 3 mg kg^{-1} para los suelos neutros y básicos y que el

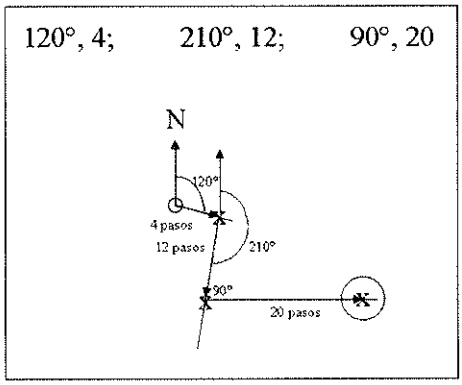


Figura 31.

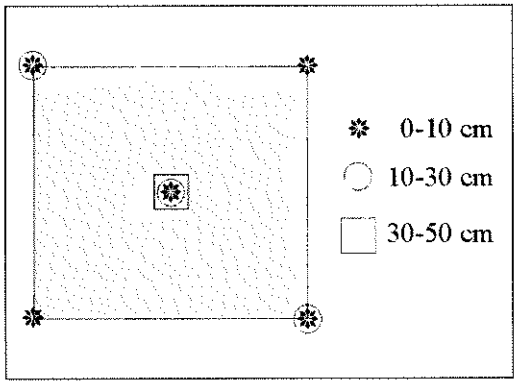


Figura 32.

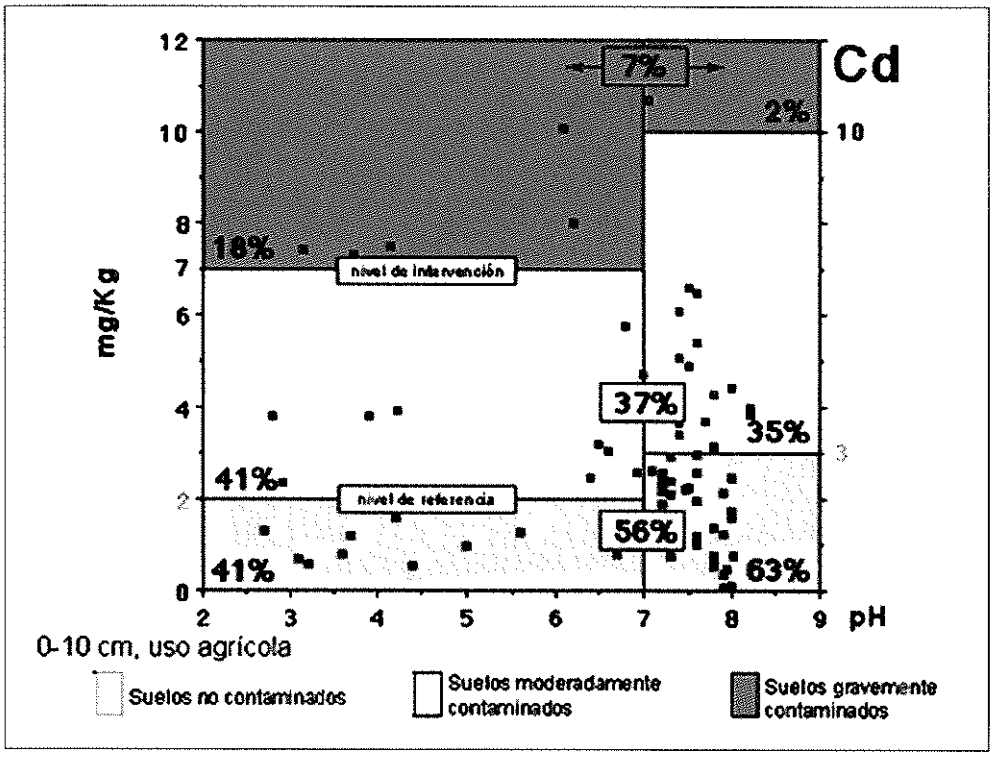


Figura 33.

nivel de intervención es de 7 mg kg^{-1} para los suelos ácidos y de 10 mg kg^{-1} para los suelos básicos (Aguilar et al., 1999). Igualmente observamos que el 7% de los suelos presentan una contaminación grave en Cd, por encima del nivel de intervención, el 2% de los suelos básicos y el 18% de los suelos ácidos. El 37% de los suelos presenta una contaminación moderada, comprendida entre el nivel de referencia y el nivel de intervención, el 35% de los suelos básicos y el 41% de los suelos ácidos, y el 56% de los suelos no están contaminados en cadmio, el 41% de los suelos ácidos y el 63% de los suelos básicos.

En la Figura 34 presentamos la contaminación por cobre, cuyo nivel de intervención es 300 mg kg^{-1} para suelos ácidos y 500 mg kg^{-1} para suelos básicos. El 8% de los suelos está gravemente contaminado, el 2% de los suelos básicos y el 24% de los suelos ácidos. El 65% de los suelos presenta una contaminación moderada, el 64% de los suelos básicos y 76% de los suelos ácidos.

La Figura 35 representa la contaminación por Talio, con un nivel de referencia de 1mg kg^{-1} y un nivel de intervención de 5mg kg^{-1} Aguilar et al. (1999). Como la conducta del Tl es independiente del pH solo existe un nivel de referencia y un nivel de intervención idénticos para suelos ácidos y básicos. Presentan una contaminación grave el 11% de

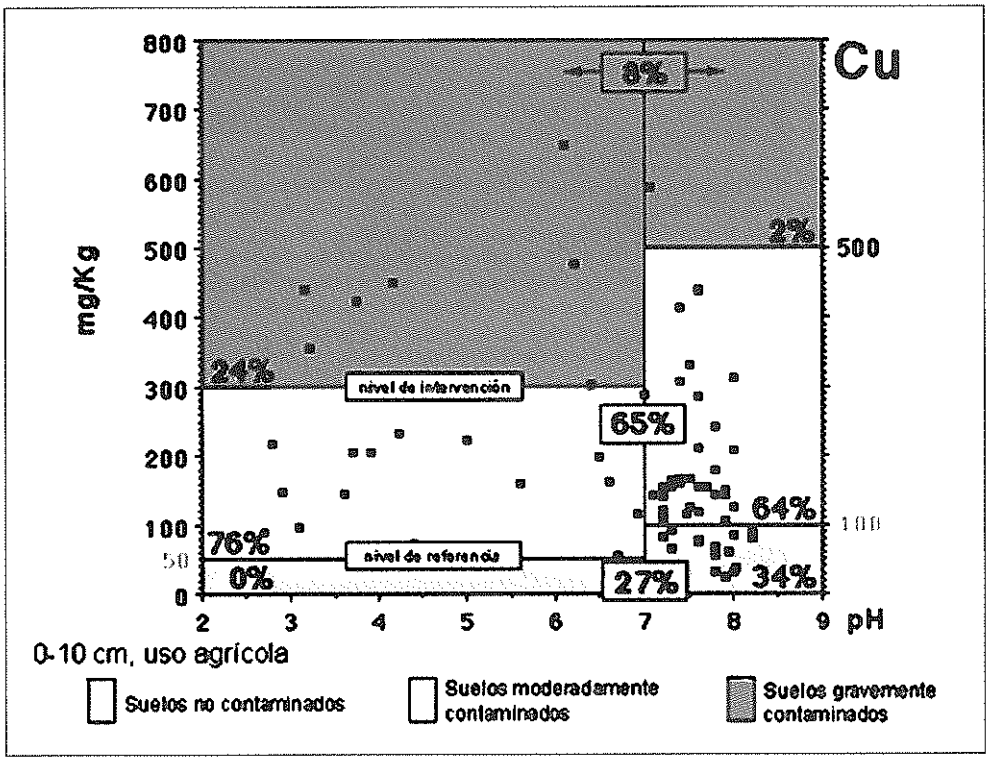


Figura 34.

los suelos, el 5% de los suelos básicos y el 29 % de los suelos ácidos, una contaminación moderada el 61% de los suelos y no están contaminados el 28% de los suelos analizados.

La contaminación por Pb se presenta en la Figura 36, que pone de manifiesto que un 26% de los suelos tiene una muy alta contaminación, un 33% presenta una contaminación moderada y el 41% de los suelos se encuentra por debajo del nivel de referencia.

En las Figuras 37 y 38 se puede ver la contaminación por cinc y por arsénico respectivamente, con valores ciertamente importantes de contaminación grave para estos elementos, 42% y 68% respectivamente.

En las figuras anteriores hemos considerado la contaminación a la profundidad de 0-10 cm. La Figura 39 representa la contaminación por arsénico a las 3 profundidades estudiadas (0-10, 10-30, 30-50 cm), y en ella vemos cómo la contaminación grave disminuye con la profundidad y aumentan la contaminación moderada y el porcentaje de suelos no contaminados.

Los resultados anteriores sólo nos informan de si existe o no existe contaminación, pero no nos dicen nada del peligro real existente, es decir, si existe o no existe toxicidad. Para esto había que hacer una fraccionamiento y para realizar éste tratamos con los siguientes reactivos:

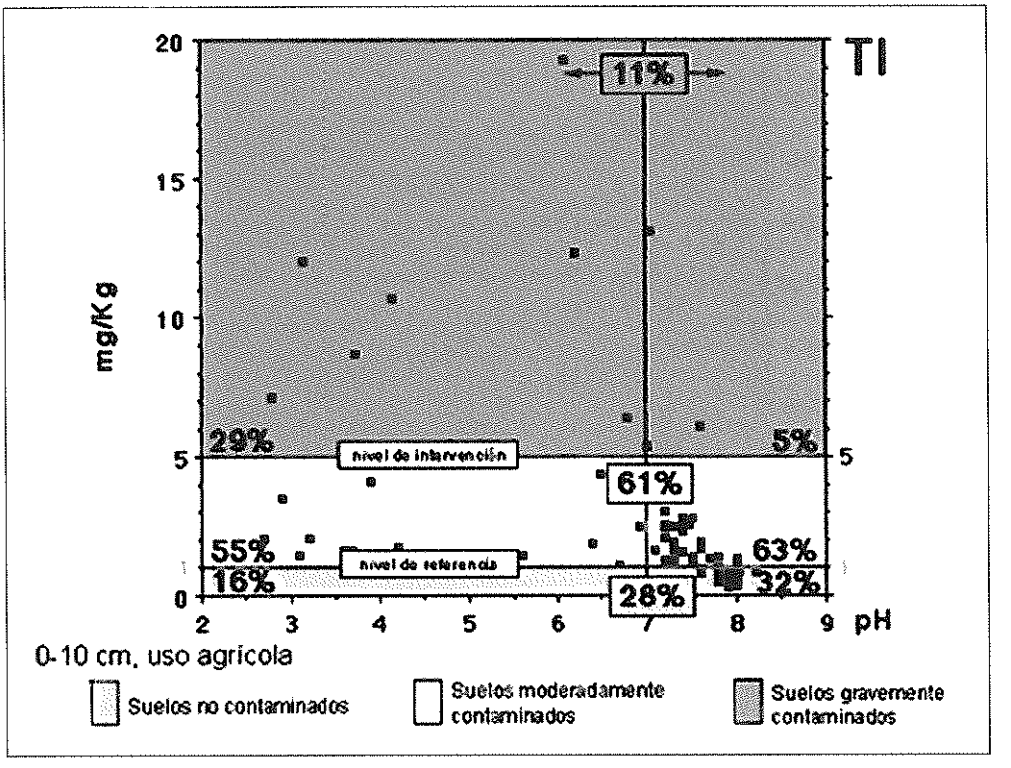


Figura 35.

Agua para obtener el extracto de saturación, con lo que tratamos de conocer los compuestos solubles. EDTA 0.05 M a pH 7 con ello extraemos las cantidades biodisponibles de los diferentes elementos analizados. Además utilizamos otros extractantes como el $CaCl_2$ 0.01 M, que nos da los elementos cambiables, y el ácido acético y oxálico/oxalato, que nos dan las cantidades ligadas a carbonatos y compuestos de hierro respectivamente.

De cada uno de los elementos As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn llevamos a cabo los mapas de distribución de las cantidades solubles, extraíbles con EDTA y totales a lo largo de toda la cuenca.

En los mapas anteriores observamos que no sólo hay contaminación sino también toxicidad. De acuerdo con los datos contenidos en ellos, hemos confeccionado las Tablas 3 a y b, donde se resumen los suelos que superan o no superan el nivel crítico, tanto para fines agrícolas como para otros fines (corredor verde).

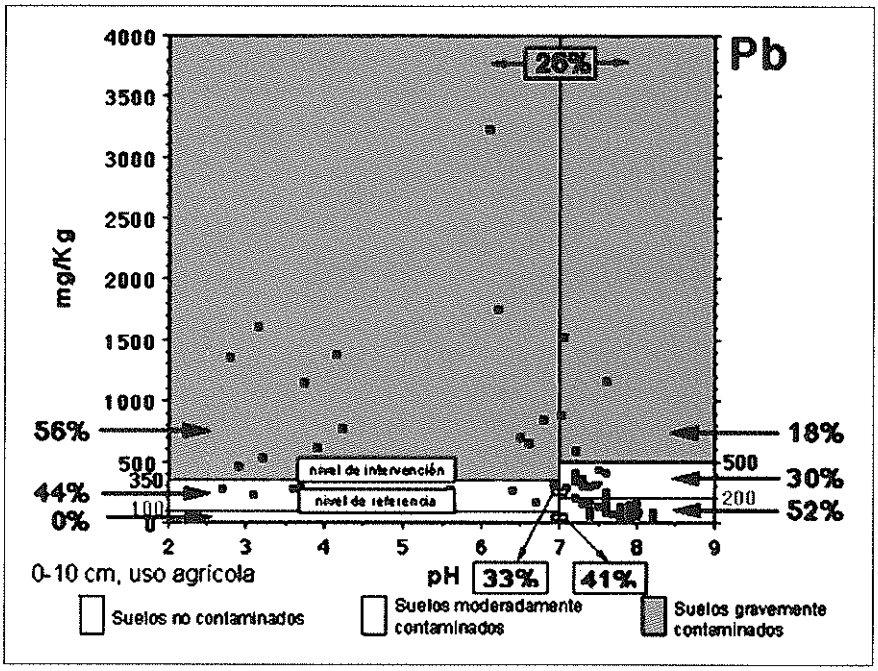


Figura 36.

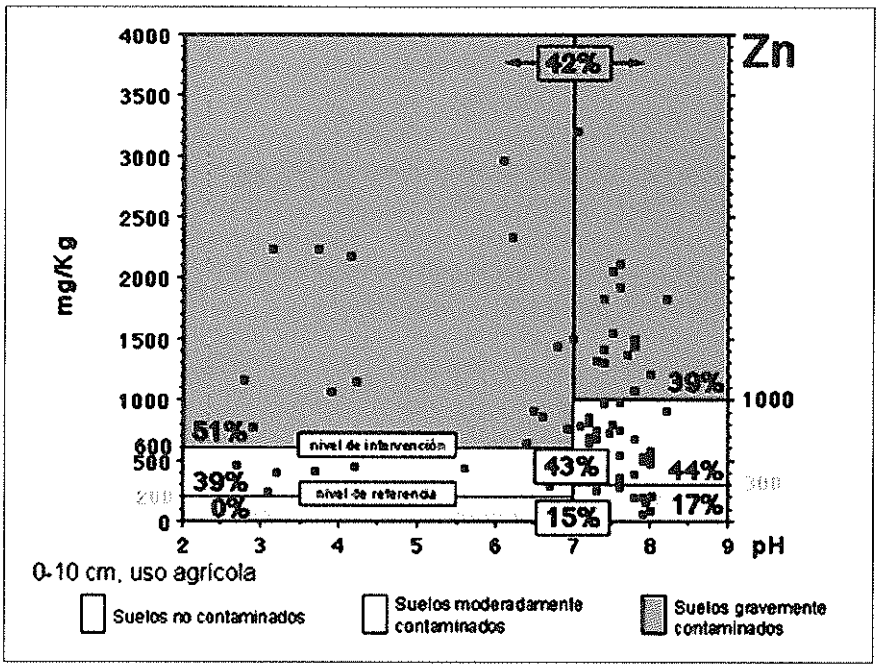


Figura 37.

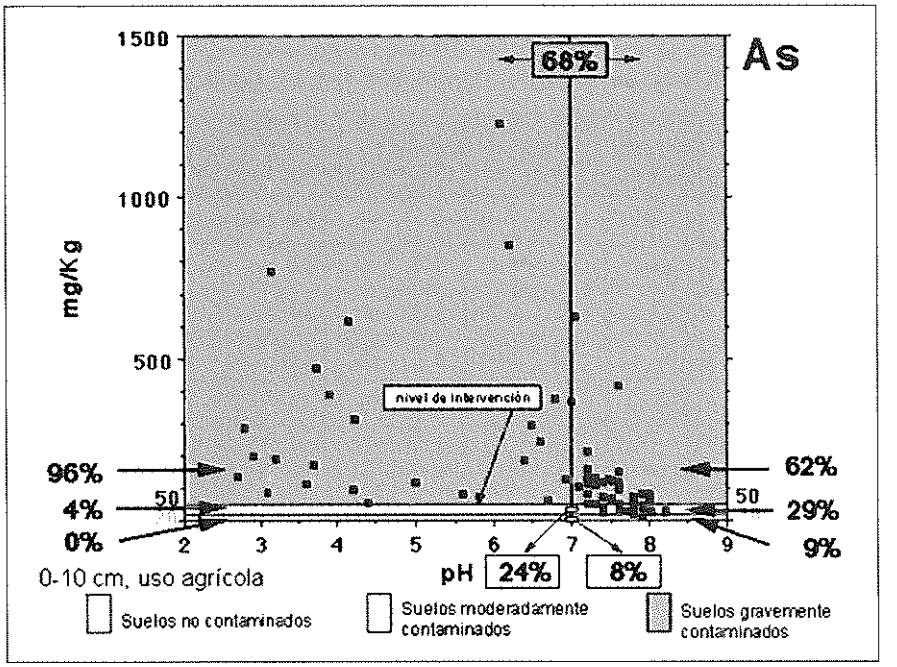


Figura 38.

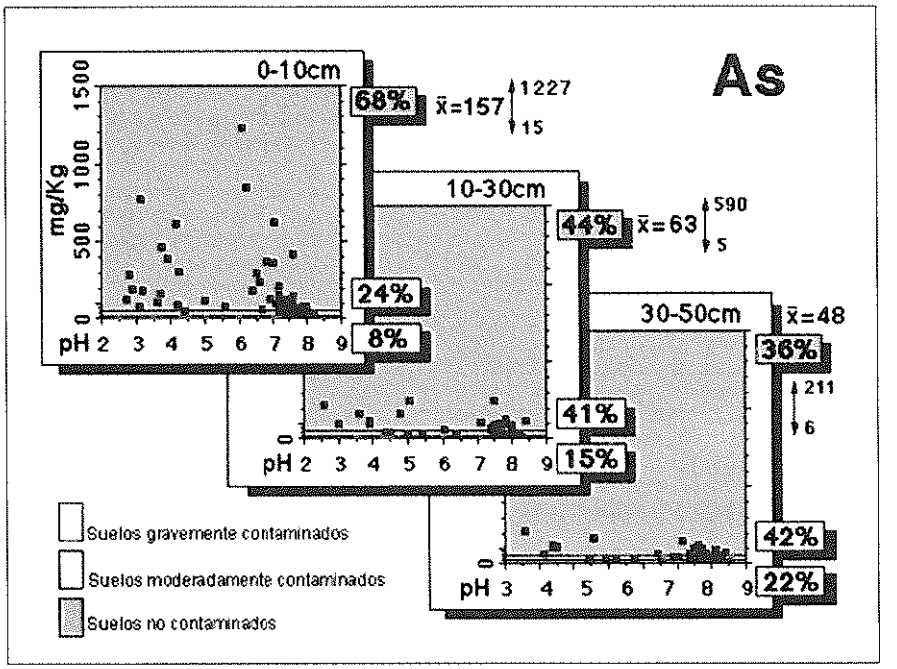


Figura 39.

Tabla3a.
Porcentaje de superficie ocupada por los distintos rangos considerados de la formas totales, fácilmente y potencialmente asimilables de los elementos contaminantes.

	As (T)	As (S)	As (EDTA)	Pb (T)	Pb (S)	Pb (EDTA)	Zn (T)	Zn (S)	Zn (EDTA)	Cu (T)	Cu (S)	Cu (EDTA)	Cd (T)	Cd (S)	Cd (EDTA)
Rango	0	2	1	2	16	<1	<1	<1	<1	<1	50	13	33	3	22
	<1	3	2	14	41	<1	1	0	2	24	3	39	64	21	37
	2	12	13	48	27	2	19	1	8	64	7	30	2	27	26
	19	21	49	10	13	22	46	8	30	12	34	17	1	13	14
	70	28	21	19	3	46	34	23	50	<1	4	1	<1	33	1
	9	34	14	7	0	30	0	68	10	0	2	0	0	3	0

Si consideramos tentativamente que para uso agrícola el nivel crítico para cada contaminante y su forma se establece a partir del marrón y que para corredor verde sería a partir del rojo, los porcentajes de la superficie que superan (SNC) y no superan el nivel crítico (NSNC), según el uso, serían los de la tabla 3b.

Tabla 3b.
Porcentaje de superficie que superan (SNC) y no superan (NSNC) el nivel crítico de contaminación según el uso.

	As (T)	As (S)	As (EDTA)	Pb (T)	Pb (S)	Pb (EDTA)	Zn (T)	Zn (S)	Zn (EDTA)	Cu (T)	Cu (S)	Cu (EDTA)	Cd (T)	Cd (S)	Cd (EDTA)
Corredor verde															
SNC	79	62	35	26	3	76	34	91	60	<1	6	1	<1	36	<1
NSNC	21	38	65	74	97	24	66	9	40	>99	64	99	>99	64	>99
Agricultura															
Rojo	98	83	84	36	16	98	80	99	90	13	40	18	1	49	14
Granate	2	17	16	64	84	2	20	1	10	87	60	82	99	51	86

MEDIDAS DE RECUPERACIÓN

Si el estado de la cuenca era el señalado anteriormente, ¿Qué se puede hacer?

Las medidas de descontaminación son muy variadas pero las únicas aplicables en la cuenca son las que resumimos en la Tabla .

Tabla 4.

Recomendaciones	Objetivo
Laboreo profundo	Dilución
Revisar la limpieza	Eliminación
Añadir carbonatos	Bloqueo
Añadir óxidos de Fe	Bloqueo
Añadir adsorbentes	Bloqueo
Biorremediación	Eliminación

Vamos a ver a continuación como funcionarían las diversas medidas señaladas anteriormente:

Labranza

La labranza supone una mezcla mecánica de los 25 cm superiores cuyos efectos resumimos en las Figuras 40 y 41. En la Figura 40 tenemos lo que pasaría en el caso del arsénico que, al mezclar los 25 primeros centímetros, supondría una reducción de la contaminación grave del 68% de los suelos al 61%. En la Figura 41 tenemos el caso del cinc, donde la contaminación grave se reduciría del 42% al 31%.

Relimpieza

En una pequeña área de la zona de Soberbina, muy contaminada, llevamos a cabo una operación de relimpieza, con los resultados que se pueden observar en la Figura 42. Después de retirar 10 cm de suelo vemos cómo el arsénico pasa de 435,4 a 302,8 mg kg^{-1} y el cinc pasa de 1559,8 a 1160; con ello, si bien la reducción es importante, las cantidades que quedan están muy por encima del nivel de intervención.

La operación de relimpieza llevada a cabo por la Junta de Andalucía, ha sido espectacular, llegando en ocasiones hasta la grava. Es desaconsejable quitar más suelo, ya que esto dificultaría e incluso impediría la revegetación prevista para el corredor verde.

Sin embargo, a pesar de todo lo anterior, la contaminación continúa. Por un lado, porque las cantidades que habían entrado en el suelo eran muy grandes, en segundo lugar por tratarse de una contaminación en mosaico, como ya hemos visto, y, en tercer lugar, por la propia dinámica de la limpieza llevada a cabo, en húmedo, que introdujo lodos hasta zonas profundas del perfil del suelo.

Quedaban pues restos de contaminación en el suelo y entonces la única actuación posible era el

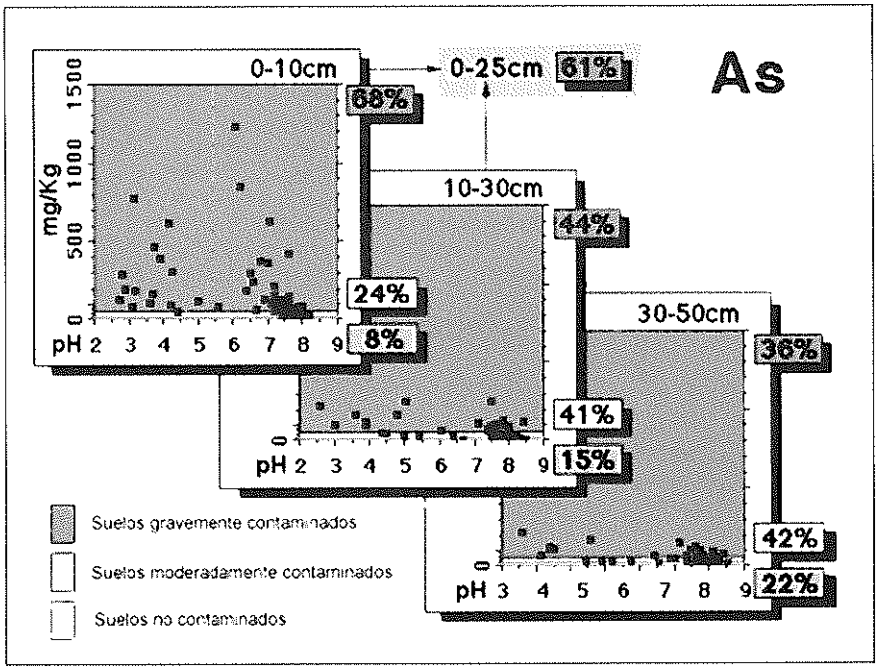


Figura 40.

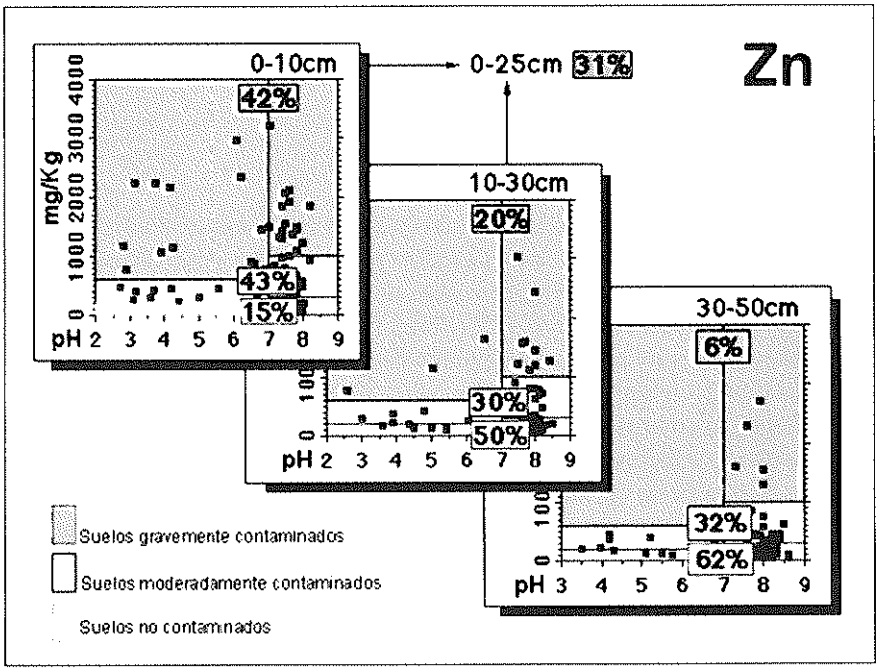


Figura 41.

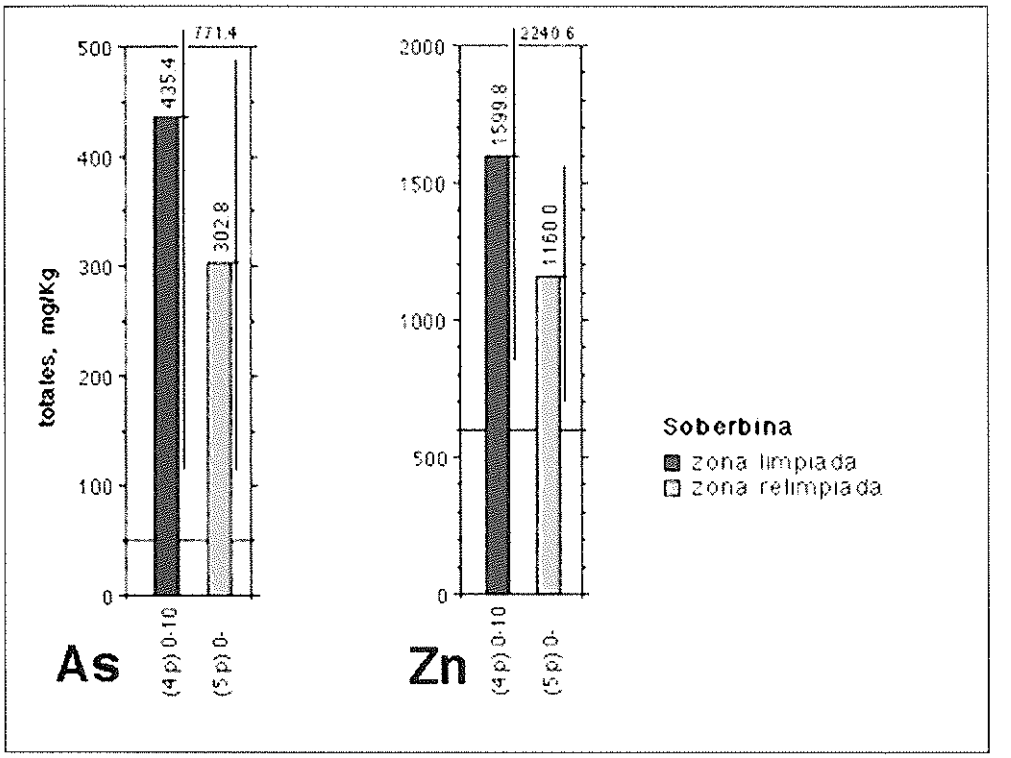


Figura 42.

Bloqueo

Con objeto de analizar los parámetros del suelo que intervienen en la fijación y retención de los elementos contaminantes, llevamos a cabo una experiencia con 6 suelos con propiedades diferentes a los que añadimos extracto de oxidación del lodo del vertido.

En la Tabla 5 presentamos las características de dichos suelos y pudimos comprobar que el suelo 6, rico en $CaCO_3$, es el más efectivo para fijar los elementos contaminantes y después del suelo 6 el más efectivo es el suelo 4, rico en arcilla y óxidos de hierro. Por tanto, si tenemos en cuenta estos resultados, para proceder a un bloqueo efectivo de los contaminantes aún existentes en los suelos tendremos que adicionar $CaCO_3$ y óxidos de hierro y/o arcilla, de ahí la necesidad de encalar y adicionar otros materiales de préstamo. Para este fin la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía nos envió unos materiales, asesorados por los Prof F. Macías y Rosa Calvo de la Facultad de Biología de Santiago, que tenían las características que mostramos en las Tabla 6 a, b y c

Tabla 5.
Características de los horizontes de suelos tratados con extracto de lodo (valores medios de 2 horizontes de características equivalentes).

Suelo	M.O %	Arcilla %	CCC $cmol_c kg^{-1}$	Fed %	PH	$CaCO_3$
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

Tabla 6a.

Parámetro	Cenizas procedentes de la CALDERA DE RECUPERACIÓN en el proceso de fabricación de pasta de celulosa
Boro	5,58 ppm
Cloruros	24 meq/l
Cobre	69 ppm
Calcio total	24,18 %
Magnesio total	3 %
Potasio total	0,5 %
Fósforo total	0,37 % P/P
Hierro	1741 ppm
Manganeso	5246 ppm
Nitrógeno total	0,018 %
pH en agua	10,36
Mo (s.M.S)	14,43 %

Tabla 6b.

Parámetro	Cenizas procedentes de la CALDERA DE CORTEZAS en el proceso de fabricación de pasta de celulosa
Cobre	152 mg Cu/kg
Calcio total	34,44 %CaO
Magnesio total	2,9 %
Calcio total	24,18 %
Magnesio total	3 %
Potasio total	0,5 %
Fósforo total	0,37 % P/P
Hierro	1741 ppm
Manganeso	5246 ppm
Potasio total	0,54 %K2O
Fósforo total	0,57 %P_2O_5
Hierro	2060 mg Fe/kg
Manganeso	7100 mg Mn/kg
Cinc	264 mg Zn/kg
Nitrógeno kjeldhal	0,09 %
pH extracto 1:5	10,52
Relación C/N	112,18
Materia orgánica por calc.	20,3 %
Cenizas	79,7
Salvo humedad todos referidos a materia seca	

Tabla 6c.

Parámetro	Espumas de carbonatacion de azucareras
Carbonato calcico	70,75 %
Carbonato magnesico	3,60 %
Carbonato potasico	4,20 %
Carbonato sodico	0,50 %
Materia organica	5,40 %
Nitrógeno total	0,50 %

Todos ellos son materiales para el encalado de los suelos, y con ellos llevamos a cabo una cinética de reacción y vimos que para todos esos materiales se necesitan del orden de 16 Tm/Ha para neutralizar un suelo de pH 4 consiguiendo un pH de 7. Con esto, no obstante, no resolveríamos totalmente el problema, pues en el suelo con ese pH de 4

todavía existe lodo, de modo que si le sometemos a la acción de un oxidante (H_2O_2) obtendremos el pH de oxidación que alcanza valores tan bajos como 2. En este caso, la cinética de reacción muestra que son necesarias del orden de 120 Kg/Ha de producto para alcanzar la neutralización. Ésta es la cantidad total a adicionar, aunque naturalmente se hará fraccionadamente en 5 ó 6 veces para que no existan cambios muy bruscos de pH que pudieran modificar la fauna del suelo. En cuanto al material a emplear, el idóneo es la espuma de azucarera ya que contiene una cierta proporción de materia orgánica, muy necesaria para la instalación del corredor verde. Las cantidades a aplicar del material encalante está en función de su pH y del contenido en azufre pirítico o de su pH de oxidación y serán diferentes a lo largo de la cuenca.

Una vez que se aplique la totalidad del material encalante sólo nos quedaría fijar el arsénico presente en sus diversas formas a lo largo de la cuenca. Para solventar este problema diseñamos varias experiencias en el término de "El Vicario". Tomamos 13 parcelas pequeñas de 9 m^2, en cada una de las cuales añadimos los siguientes bloqueantes: 3 parcelas las dejamos como testigo, en dos de ellas añadimos zeolitas, una a concentración de 15 Tm/Ha y otra a concentración de 25 Tm/Ha; 2 parcelas fueron adicionadas de levadura A; una con 2.5 Tm/Ha y otra 5 Tm/Ha; en 1 parcela se adicionó Levadura B y en otra Levadura C; en 2 parcelas se adicionó Bentonita, en una Oxidos de Fe y en otra Oxidos de Fe + zeolitas.Pudimos observar cómo son los tratamientos con óxidos de Fe y con zeolitas + óxidos de Fe los que mejor van, los que más reducen el arsénico soluble. Por otra parte tenemos la estrecha correlación existente entre As y Fe que nos decidió a recomendar la aplicación de suelos rojos del Aljarafe ricos en arcilla y óxidos de Fe. Con todo ello esperamos bloquear todos los componentes y muy especialmente el Arsénico y pasár a una situación controlada. Aunque, como es lógico, el equilibrio alcanzado es frágil y necesita de un seguimiento de al menos 3 ó 4 años que nos permita corroborar que los elementos contaminantes siguen bloqueados.

En el bloqueo, naturalmente, también influyen los componentes propios del suelo, como ponemos de manifiesto en la Tabla 7, donde se observa que pH y contenido en $CaCO_3$ son los factores más influyentes y, como estos pueden variar con el tiempo, habrá que realizar un seguimiento también de estos caracteres de los suelos.

Tabla 7. Coeficientes de regresión entre la cantidad de elemento precipitado o adsorbido por el suelo y las principales propiedades de éste.

Elemento ($mg\ kg^{-1}$)	Oxidos ($g\ kg^{-1}$)	CCC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	pH	$CaCO_3$ ($g\ kg^{-1}$)	Arcilla ($g\ kg^{-1}$)
P_{Cu}	0,011	0,013	6,34	0,35	-0,16
P_{Zn}	-6,28	5,26	9,19	1,22	-0,173
P_{Cd}	-0,09	0,10	0,13	0,011	-0,006
P_{Pb}	-4,07	11,25	9,81	1,23	-0,93
P_{Tl}	-0,007	0,019	0,017	0,002	-0,0015

CAPÍTULO 4

CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA INTEGRACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL DE ESPACIOS AFECTADOS POR ACTIVIDADES MINERAS

Miguel Villalobos Megía

Director del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio
NUBIA CONSULTORES
E-mail: miguelvillalobos@nubiaconsultores.es

Resumen:

Las actividades mineras generan inevitablemente un cierto impacto ambiental, a veces grave. La restauración ambiental del espacio afectado por tales actividades suele ser muy difícil y costosa si el diseño técnico de la explotación no ha previsto en origen la integración de la variable medioambiental; por el contrario, si ésta se ha incorporado desde el inicio de la toma de decisiones hasta el desarrollo y ejecución del proyecto minero, tales problemas resultan minimizables y corregibles de modo considerable. En esta comunicación tratamos de profundizar en los problemas y soluciones técnicas más comunes utilizadas en los proyectos de restitución morfológica y restauración ambiental de los espacios naturales afectados por este tipo de actividades.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Fases de una explotación MINERA

1.1.1. Prospección e investigación

Prospección: Localización de anomalías debidas a la existencia de depósitos minerales mediante la utilización de técnicas geofísicas y geoquímicas, principalmente. No generan impacto en sí mismas.

Investigación: Definición geométrica y primera evaluación del yacimiento mediante la realización de excavaciones, calicatas y/o sondeos de investigación. Puede generar un cierto impacto, a veces de magnitud considerable.

1.1.2. Evaluación de reservas y diseño de explotación

Definición de los parámetros técnicos, económicos y financieros para tomar la decisión de desarrollar el proyecto. Es esencial la fase de modelización, sobre la que se realiza la evaluación de reservas y los diseños alternativos de explotación. El modelo debe incluir criterios de viabilidad ambiental.

1.1.3. Desarrollo y puesta en marcha

Previo al inicio de la explotación es preceptivo (R.D.L 1/2008) realizar la correspondiente Evaluación de Impacto Ambiental. El Proyecto de Explotación y el Proyecto de Restauración deben redactarse de manera simultanea y coordinada.

Obtenida la correspondiente Autorización Ambiental , comienza la preparación del terreno de mina e instalaciones, ejecutándose las primeras medidas del Proyecto de Restauración. La correcta ejecución del diseño técnico previamente establecido es vital en el futuro desarrollo ambiental de la explotación.

1.1.4. Explotación

Durante el período de vida, la explotación se realizará de acuerdo con los Planes de Labores Anuales aprobados, observándose todas las medidas incluidas en los correspondientes Planes Anuales de Restauración, de acuerdo con el Plan General de Restauración aprobado en el correspondiente procedimiento ambiental..

1.1.5. Abandono

Tras finalizar la vida productiva de la explotación se activa el Plan de Abandono y Clausura. Incluye el desmantelamiento y demolición de las instalaciones obsoletas y la restitución morfológica y paisajística de los huecos de mina y depósitos de estériles que no han sido restaurados durante el período de vida activa de la explotación. Si es posible, y si así estaba previsto, debe procurarse dar una reutilización a los terrenos.

1.2. Sistemas de explotación minera

1.2.1. Minas subterráneas

Aunque la minería subterránea produce, en general, menor impacto morfológico que la minería a cielo abierto, si puede generar otras afecciones importantes, tales como la generación de aguas ácidas de mina, en el caso de sulfuros metálicos, acopio de estériles, presencia de instalaciones minerometalúrgicas asociadas, etc.

1.2.2. Cortas

Sistema de explotación a cielo abierto por banqueo descendente en forma rectangular, troncocónica o circular. Es tradicional en la minería metálica y en la del carbón. La profundidad puede llega a superar los 300 metros.

La posibilidad de rellenar la corta con estériles es, por lo general, escasa, produciendo grandes escombreras asociadas, para materiales de rechazo, y presas o balsas de residuos, para almacenamiento de lodos procedentes de las plantas de concentración. Cuando el relleno de una parte definitivamente abandonada de la explotación se realiza con los estériles de la parte activa se dice que se realiza una "minería de transferencia".

Un fenómeno común a la minería metálica, subterránea o a cielo abierto, y a la del carbón es el constituido por la producción de aguas ácidas, como consecuencia de la oxidación del mineral.

1.2.3. Canteras

Sistema común a las explotaciones de rocas industriales y ornamentales. El escaso valor relativo del producto hace que las canteras, especialmente cuando benefician material para áridos de construcción, se sitúen cercanas a los centros de consumo, en un sistema de diseminación territorial. El método de explotación es casi siempre por banqueo descendente en uno o varios niveles.

1.2.4. Graveras

Los materiales detríticos, arenas y gravas, asociados a la dinámica fluvial, suelen llevarse a cabo por extracción directa de un único banco normalmente no superior a 20 metros de profundidad.

1.3. Escombreras, infraestructura minera e instalaciones

1.3.1. Escombreras

Las actividades mineras producen gran cantidad de materiales de desecho que deben ser almacenados en condiciones de seguridad, estabilidad e integración medioambiental. Los rechazos de plantas de tratamiento, de granulometrías finas, se almacenan en estructuras tipo presa.

Los principales tipos de escombreras exteriores según su situación son en vaguada, en ladera, en divisoria o en llanura. Según la secuencia de construcción pueden ser de vertido libre, vertido por fases adosadas, con dique de retención en pie y en fases ascendentes superpuestas.

Hasta hace poco tiempo el criterio de selección del lugar de ubicación para una escombrera era exclusivamente la distancia de transporte, ya que afecta muy directamente al coste total de la operación minera. La elección debe, no obstante, atender a otros criterios, especialmente los de estabilidad, superficie mínima de área afectada y facilidad de minimización del impacto paisajístico y ecológico.

1.3.2. Infraestructura e instalaciones mineras

Las actividades mineras pueden llevar asociadas una serie de instalaciones tales como naves, edificaciones auxiliares, plantas de tratamiento, etc., así como caminos de acceso y de servicio que deben ser objeto igualmente de tratamiento ambiental, tanto en la fase de instalación como en la fase de restitución del paisaje una vez abandonada la explotación. Debe de procurarse, una vez acabada la vida de la explotación, su desmantelamiento.

1.4. Principales problemas ambientales de la explotación minera

Las explotaciones mineras pueden generar fuertes impactos ambientales sobre diferentes variables del medio natural: atmósfera, aguas, suelos, flora, vegetación y fauna, procesos geofísicos, morfología y paisaje e incluso en el ámbito sociocultural. Estos problemas tendrán mayor o menor incidencia según el tipo de explotación minera de que se trate (subterránea, a cielo abierto, etc.) y el entorno medioambiental en el que se ubique.

En líneas generales podríamos agrupar estos problemas en cuatro grandes grupos:

a) Aquellos que afectan a variables de tipo ecológico: vegetación, flora, fauna, perdida de endemicidad, alteración sustancial de procesos ecológicos o degradación de hábitats singulares, etc.
b) Aquellos que afectan a la calidad del medio receptor: contaminación hídrica, contaminación atmosférica, etc.
c) Aquellos que afectan al paisaje, impactos geomorfológicos, alteraciones de volúmenes, modificaciones fisiográficas, etc.
d) Aquellos que inciden de manera directa y negativa en el medio humano, y que, además de los efectos inducidos por todos los anteriores, pueden relacionarse con el aumento de tráfico en zonas próximas a núcleos habitados o del ruido ambiental, etc.

1.5. Contexto legal y criterios ambientales en la explotación

El contexto legal que condiciona a una explotación minera va a depender de la fecha de inicio de la actividad en relación con la de la legislación minera, ambiental y sectorial vigente. Así, pueden considerarse diferentes escenarios:

1.5.1. Apertura de una nueva explotación

En el caso de apertura de nuevas explotaciones mineras existen mecanismos de control para garantizar su integración ambiental desde la apertura. La planificaciózn previa y el correcto diseño de la explotación permiten corregir en origen un altísimo porcentaje de los problemas ambientales que afectan a la mayor parte de las explotaciones antiguas. Los instrumentos legales de control son los siguientes:

e) a) Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental y disposiciones legales concordantes. La mayor parte de las Comunidades Autónomas han desarrollado su legislación propia en la materia, en el caso andaluz la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, anterior incluso al referido texto refundido

f) b) Disposiciones generales y particulares de la minería, especialmente el Real Decreto 975/2009 de 9 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.
g) El primero de estos instrumentos, el ambiental en sentido estricto, determinará la viabilidad ambiental de la explotación. Si es viable, debe tomar posición claramente sobre diversos aspectos, esencialmente sobre las medidas de diseño técnica y económicamente viables para la corrección y minimización de impactos ambientales en origen y durante la actividad, y sobre la idoneidad del Plan de Restauración presentado.
h) El segundo texto legal, que opera en el ámbito de las competencias sustantivas en materia de minería, exige la presentación de un Plan de Restauración del espacio afectado por la explotación que se solicita, que incluirá entre otros contenidos un Plan de Gestión de Residuos. El Plan de Restauración debe tener prevista la clausura de la explotación y la reutilización del espacio afectado tras su abandono y restauración.

1.5.2. Explotación activa

En el caso de una explotación activa con anterioridad a la entrada en vigor de los instrumentos legales antes señalados, y con independencia de las que estableciera la Administración Minera en el contexto del derogado Real Decreto 2994/1982, de 15 de octubre, sobre restauración del espacio natural afectado por actividades mineras y de aquellas otras regulaciones sectoriales específicas en materia de ruidos, emisiones, vertidos, etc., el único mecanismo de control es el Plan de Restauración que se aprobara. La reglamentación establece incluso la posibilidad de no realizar medidas de restauración simultáneas a la explotación si ello dificulta técnicamente la misma. En este caso la Administración Minera exigirá unas garantías financieras para acometer por sus propios medios la restauración del espacio afectado tras su abandono.

1.5.3. Abandono de explotación

En el caso de abandono de una explotación podrían darse las siguientes circunstancias:

— Se ejecuta el Plan de Restauración y, en su caso de Reutilización, previsto en origen en el Proyecto de Restauración (bien por el Promotor o bien por la Administración Minera si el promotor optó por pagar un canon anual para su restauración final).
— No se ejecuta Plan de Restauración alguno.

2. CRITERIOS AMBIENTALES PARA EL DISEÑO PREVIO DE EXPLOTACIONES

Por lo que a las explotaciones de nueva apertura se refiere, y a pesar del condicionante que supone la presencia de la explotación en lugares geológicamente determinados, el lugar preciso y el modo de iniciar la explotación, la planificación en definitiva, permite minimizar y corregir en origen los impactos de tipo estético o paisajístico, siempre teniendo en cuenta criterios de viabilidad técnico-económica. Es muy importante, por tanto, tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Planificar debidamente la retirada, almacenamiento y reutilización de los suelos fértiles afectados (figura 1)
- La protección u ocultación de vistas aprovechando factores topográficos y el manejo de la vegetación, lo que repercute además en un menor impacto sónico (figura 2).
- La selección apropiada del lugar de inicio del ataque a la explotación y la dirección del avance, así como la orientación de los frentes de trabajo. (figura 3)
- Una planificación apropiada de los accesos a la explotación y de las instalaciones asociadas (figura 4).
- Prever la restitución morfológica final y la posible reutilización de los terrenos (figura 5).
- Planificación desde el inicio del vertido orientada a posibilitar una restauración simultanea de las escombreras (figuras 6 y 7).

3. LA RESTITUCIÓN DE EXPLOTACIONES PARCIAL O TOTALMENTE ABANDONADAS

En el caso de trabajar sobre una explotación ya finalizada, bien en una de sus fases o bien totalmente, sin una planificación ambiental previa, los problemas a solucionar serán notablemente más graves, y, a veces, de difícil y costosa solución. El trabajo a realizar deberá orientarse hacia los siguientes aspectos:

- Corrección total de riesgos geotécnicos que puedan afectar a la seguridad de las personas y bienes.
- Restitución morfológica del área afectada (huecos y escombreras), al menos hasta posibilitar la revegetación.
- Drenaje (muy especialmente si la explotación plantea problemas por generación de aguas ácidas)

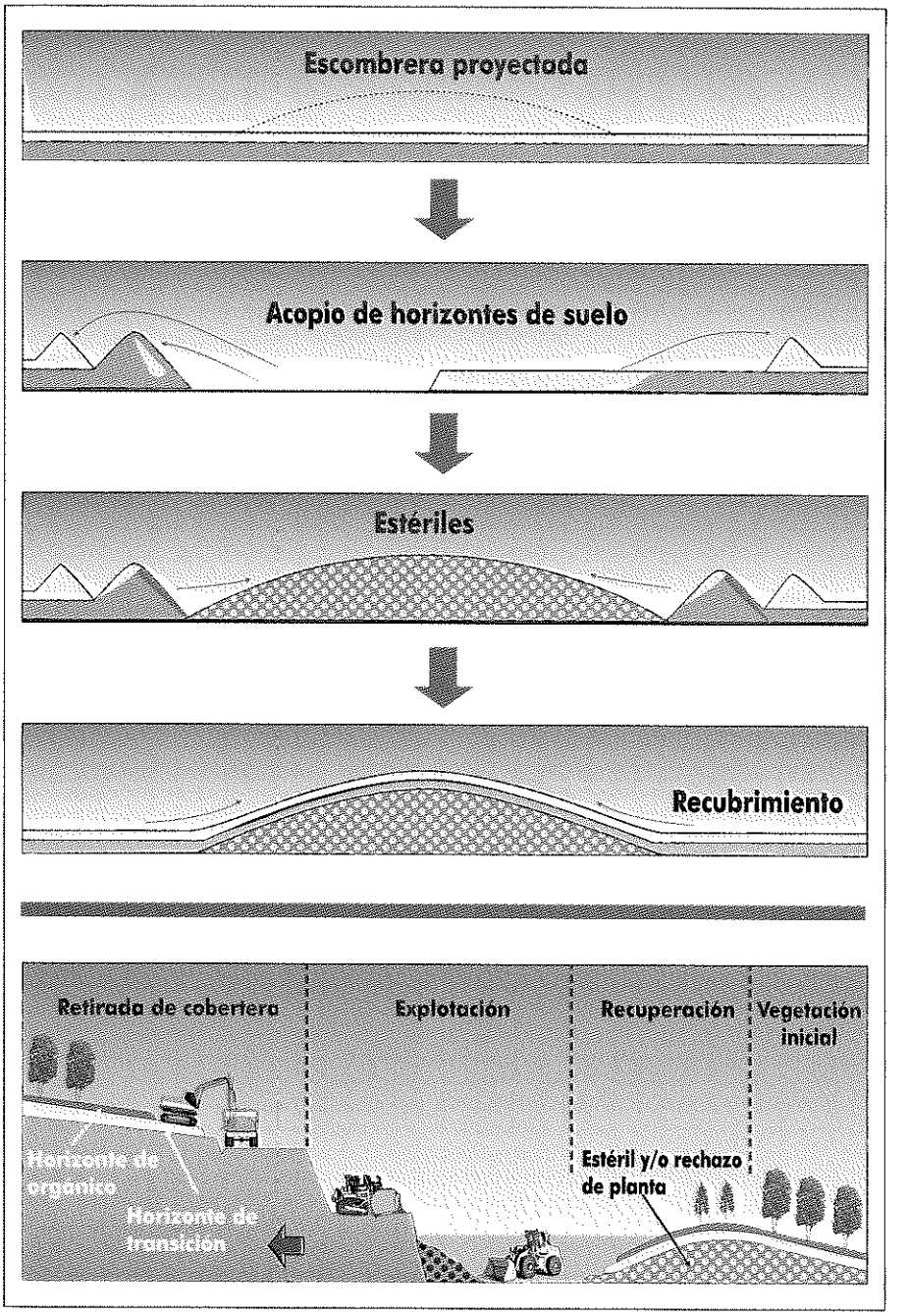


Figura 1. Acopio y utilización de suelo vegetal (S. Manglano, 1994).

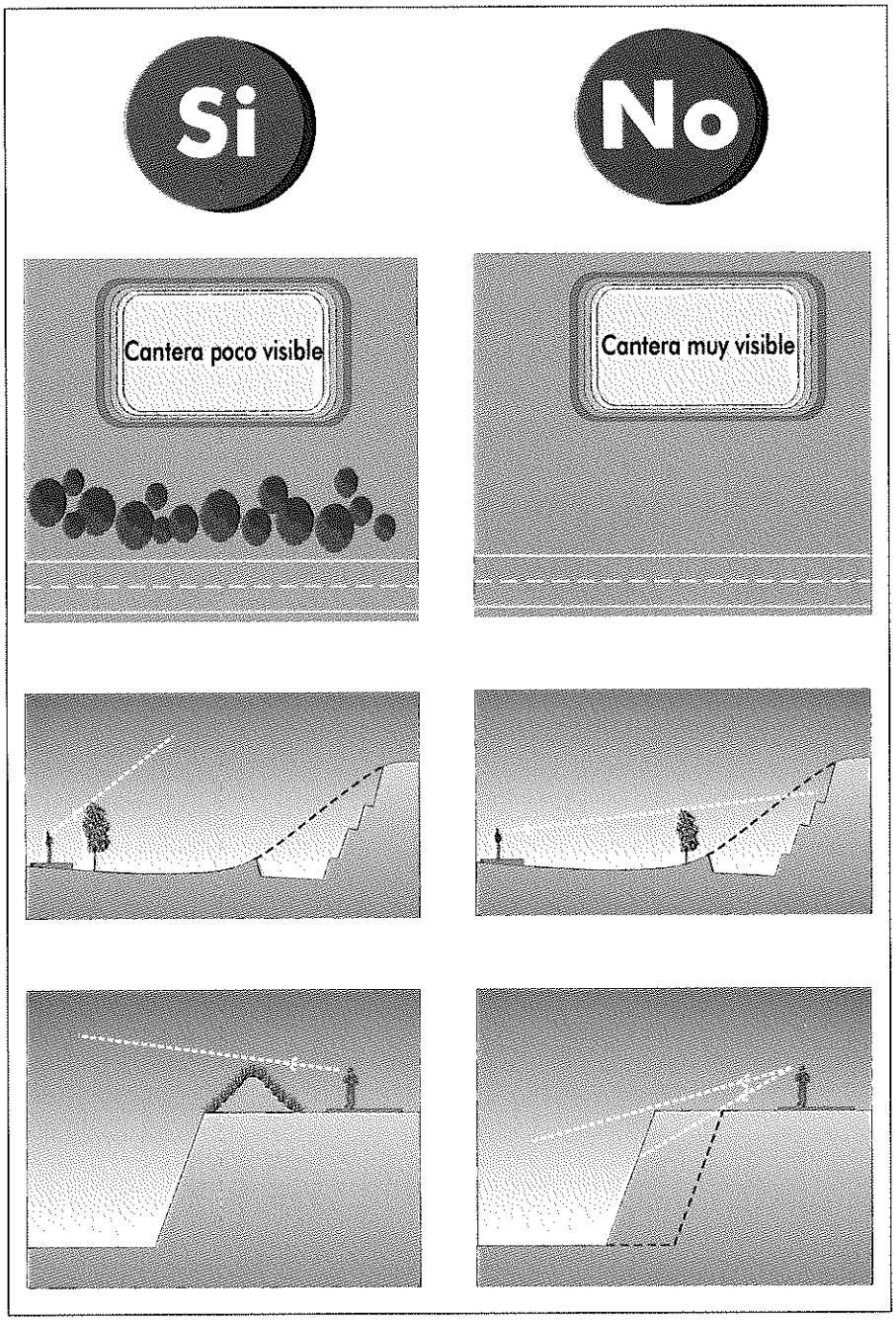


Figura 2. Criterios para la protección u ocultación de vistas (S. Manglano, 1994).

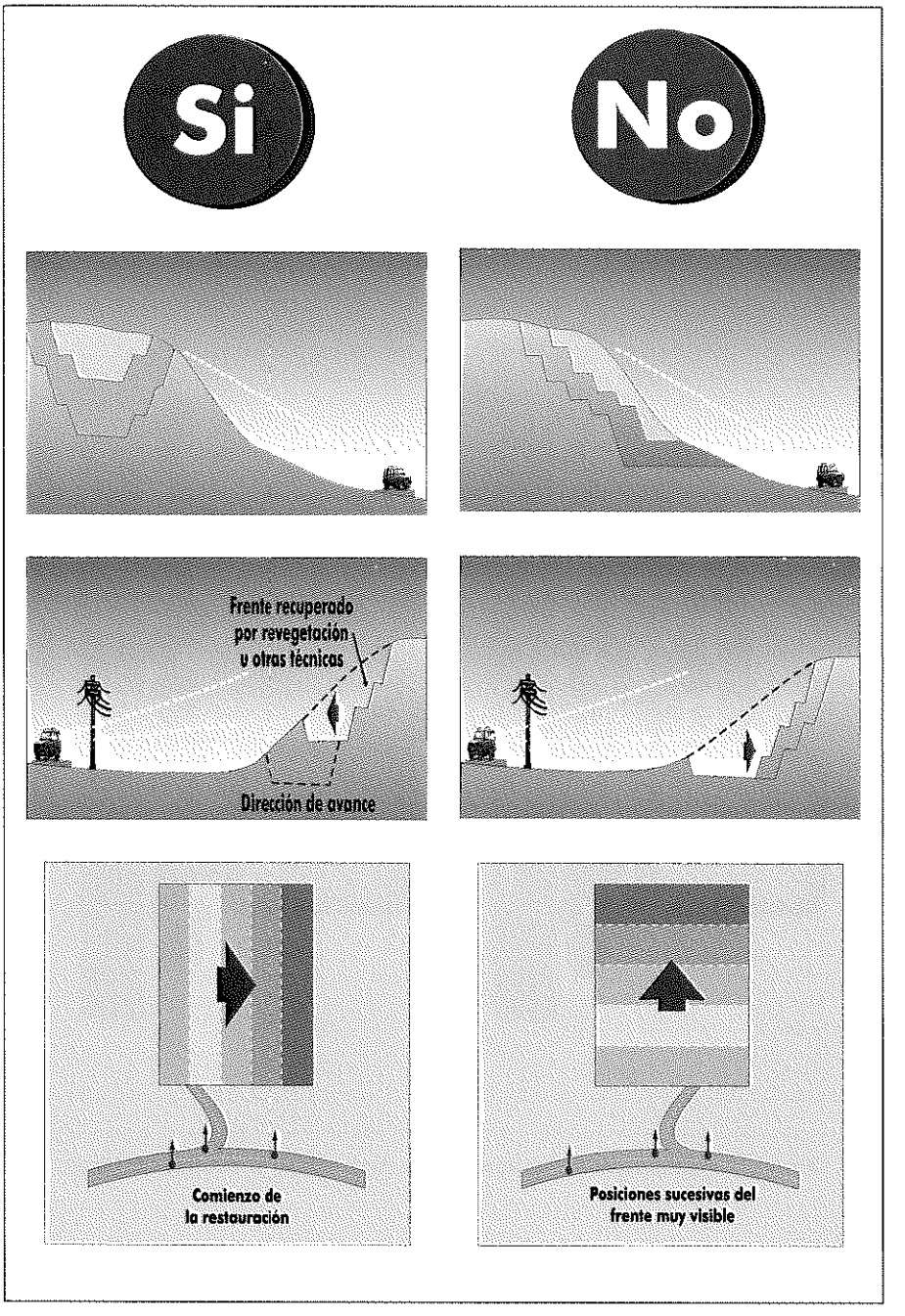


Figura 3. Selección de ataque y planificación de avance (S. Manglano, 1994).

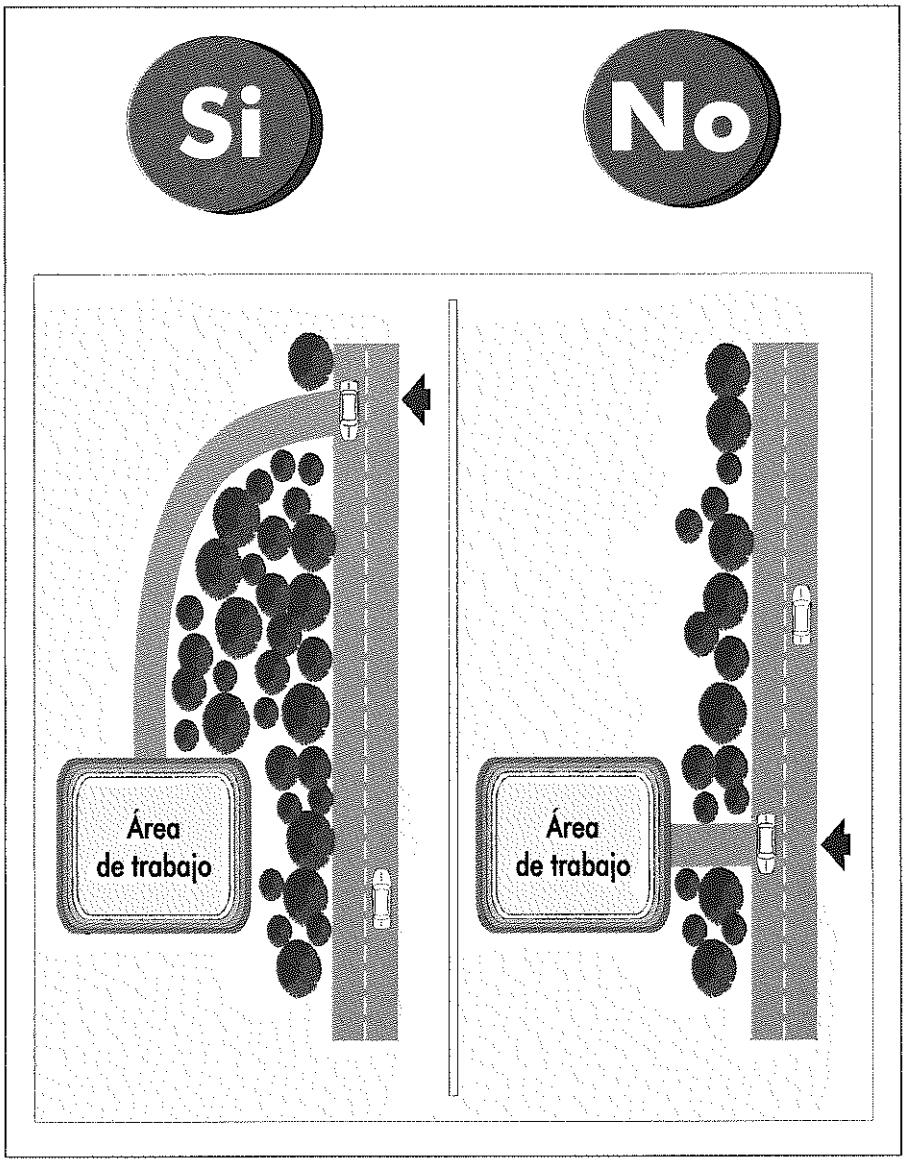


Figura 4. Planificación de los accesos a la explotación (S. Manglano, 1994).

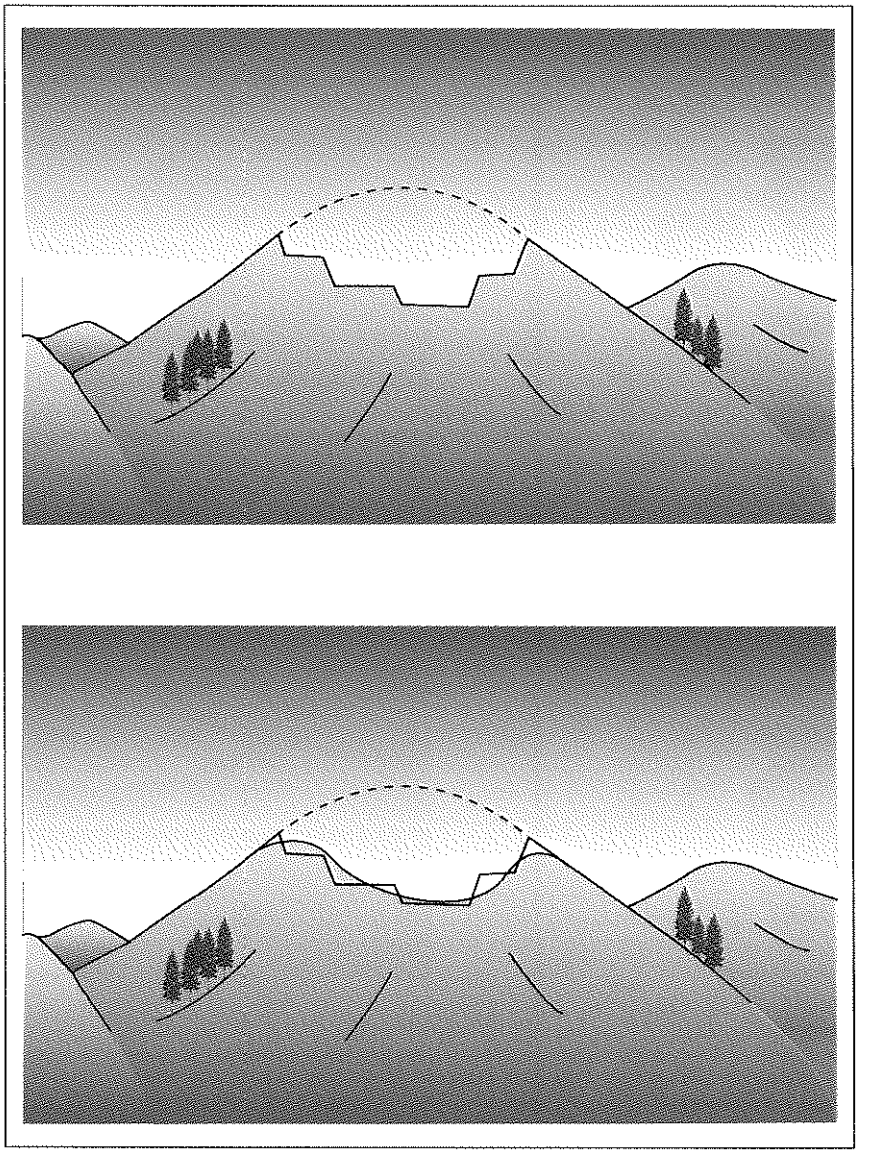


Figura 5. Modelado del terreno. opciones de tratamiento de taludes y huecos (S. Manglano, 1994).

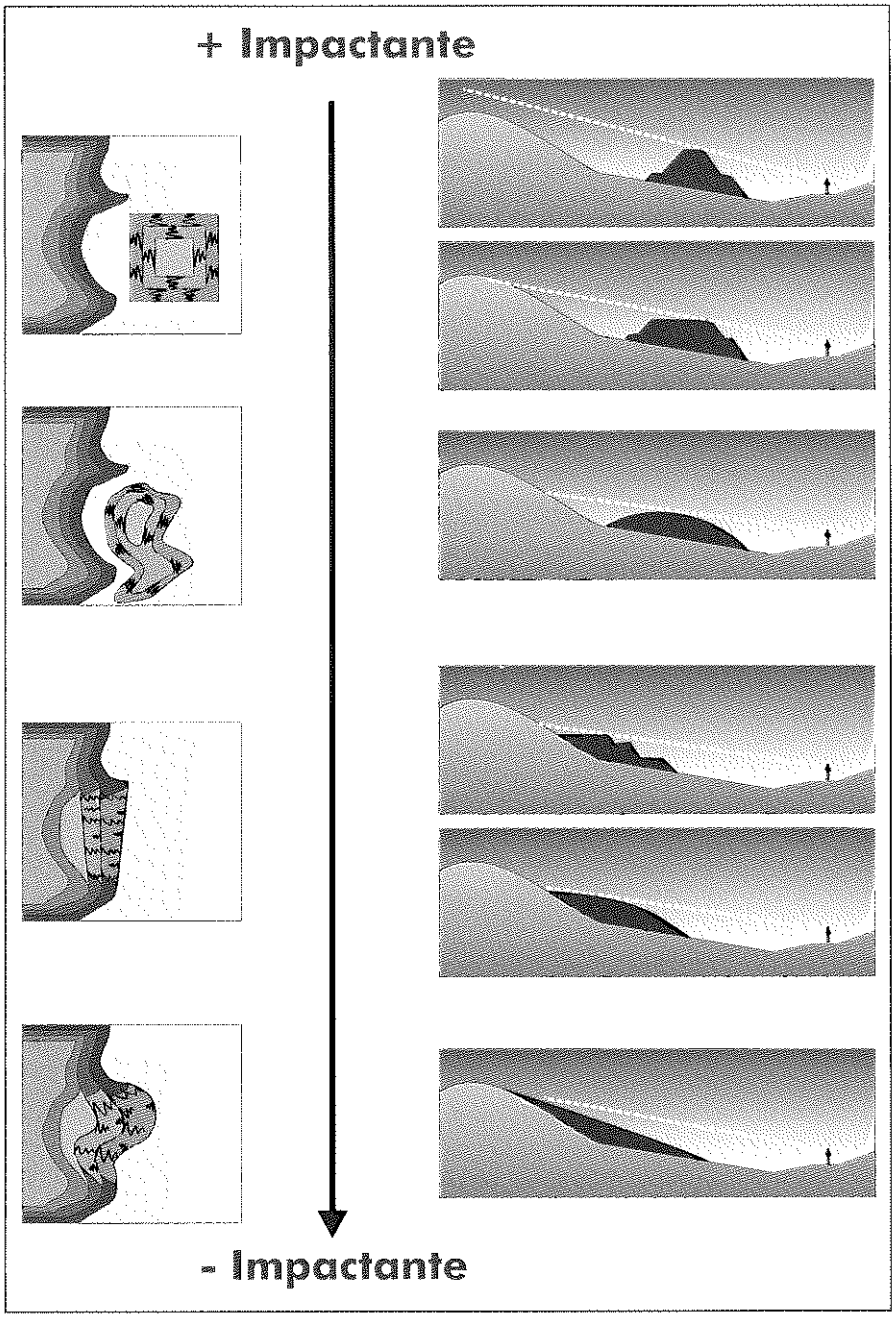


Figura 6. Diseños de una escombrera, más o menos impactante, según su emplazamiento y forma (S. Manglano, 1994).

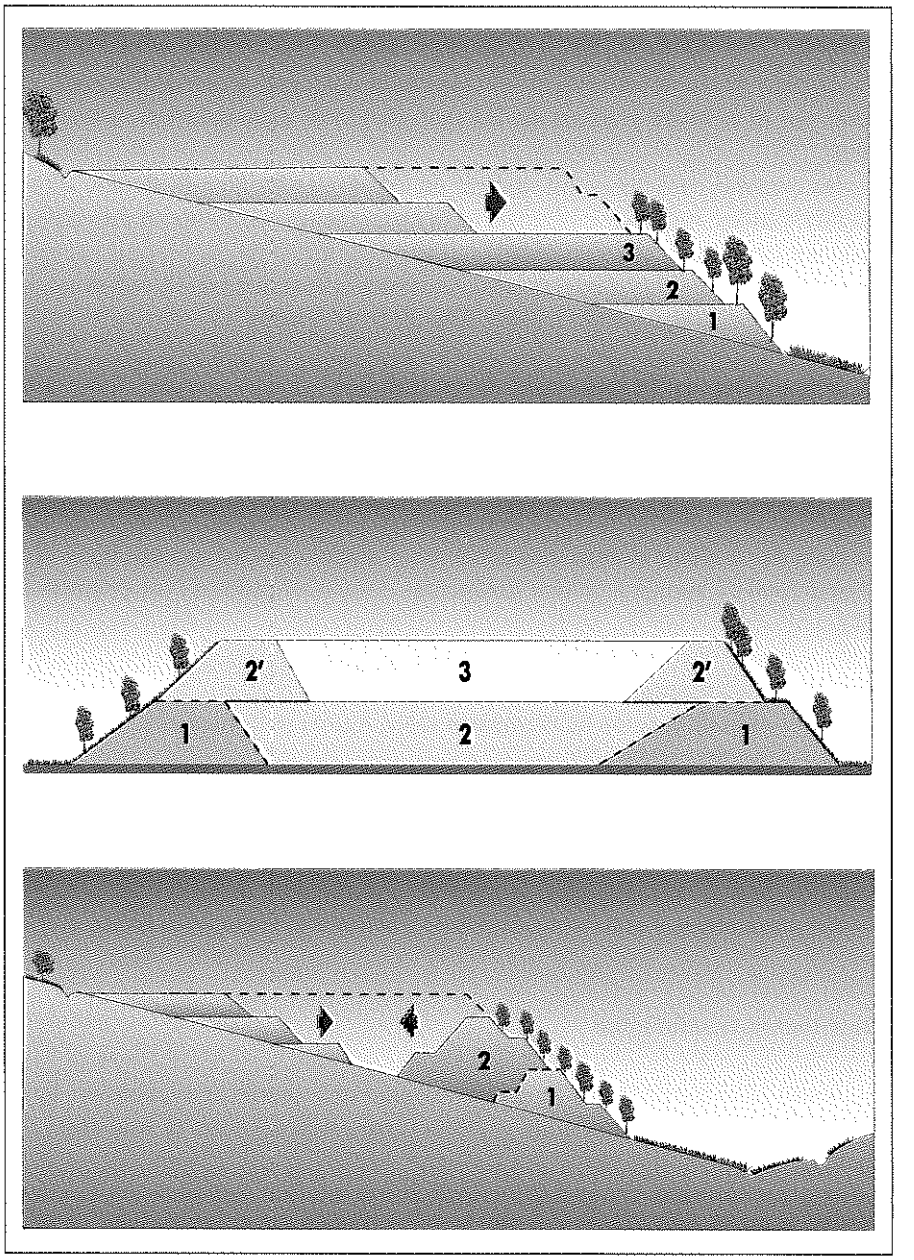


Figura 7. Restauración progresiva de escombreras (S. Manglano, 1994).

3.1. Corrección de riesgos geotécnicos

En el caso de explotaciones subterráneas la corrección de riesgos pasa ineludiblemente por el sellado y cierre de las instalaciones, especialmente pozos y bocas de minas.

En las canteras será necesario realizar un estudio geotécnico de detalle sobre la estabilidad de taludes, muy especialmente si la restauración comporta un proyecto de reutilización social del área de extracción.

La corrección de riesgos en canteras, detectada la necesidad de llevarlos cabo, puede comportar la necesidad de llevar a cabo diferentes soluciones:

- **Modificaciones en la geometría de los taludes**

  Consisten en soluciones tales como la eliminación de masas inestables, el descabezamiento de los taludes o la construcción de contrafuertes en el pie de los taludes.

- **Drenaje**

  Se trata de eliminar el agua contenida en el macizo rocoso con el objeto de disminuir el peso total de la roca y reducir las fuerzas desestabilizadoras (ver epígrafe 3.3 y figura 11).

- **Empleo de elementos resistentes**

  Consiste en la utilización de elementos tales, muros de contención, bulones o carriles y cables de anclaje (figura 8).

- **Correcciones superficiales**

  Para corregir el riesgo de pequeños desprendimientos se suelen utilizar mallas de guiado o proyección de hormigón, aunque este último método sólo para acciones muy localizadas y extremas, ya que imposibilita el tratamiento vegetal posterior.

3.2. Restitución morfológica

La restitución morfológica en canteras tiene dos objetivos esenciales: la corrección de inestabilidades que puedan inducir riesgo y posibilitar la reintroducción de vegetación.

Las soluciones serán tendentes a reducir la inclinación y altura de los taludes (figuras 9 y 10). Estos factores serán a su vez función de la litología y el grado de tectonización de los materiales.

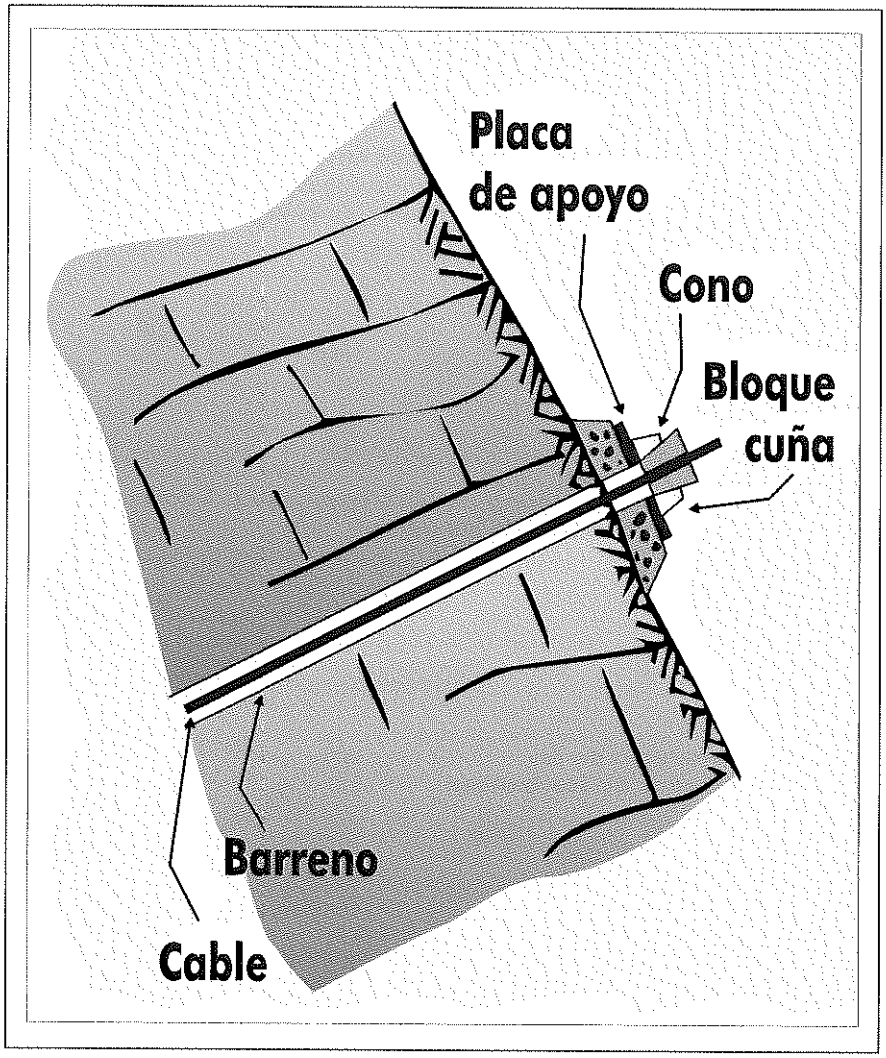


Figura 8. Cable de anclaje para estabilización de un talud rocoso.

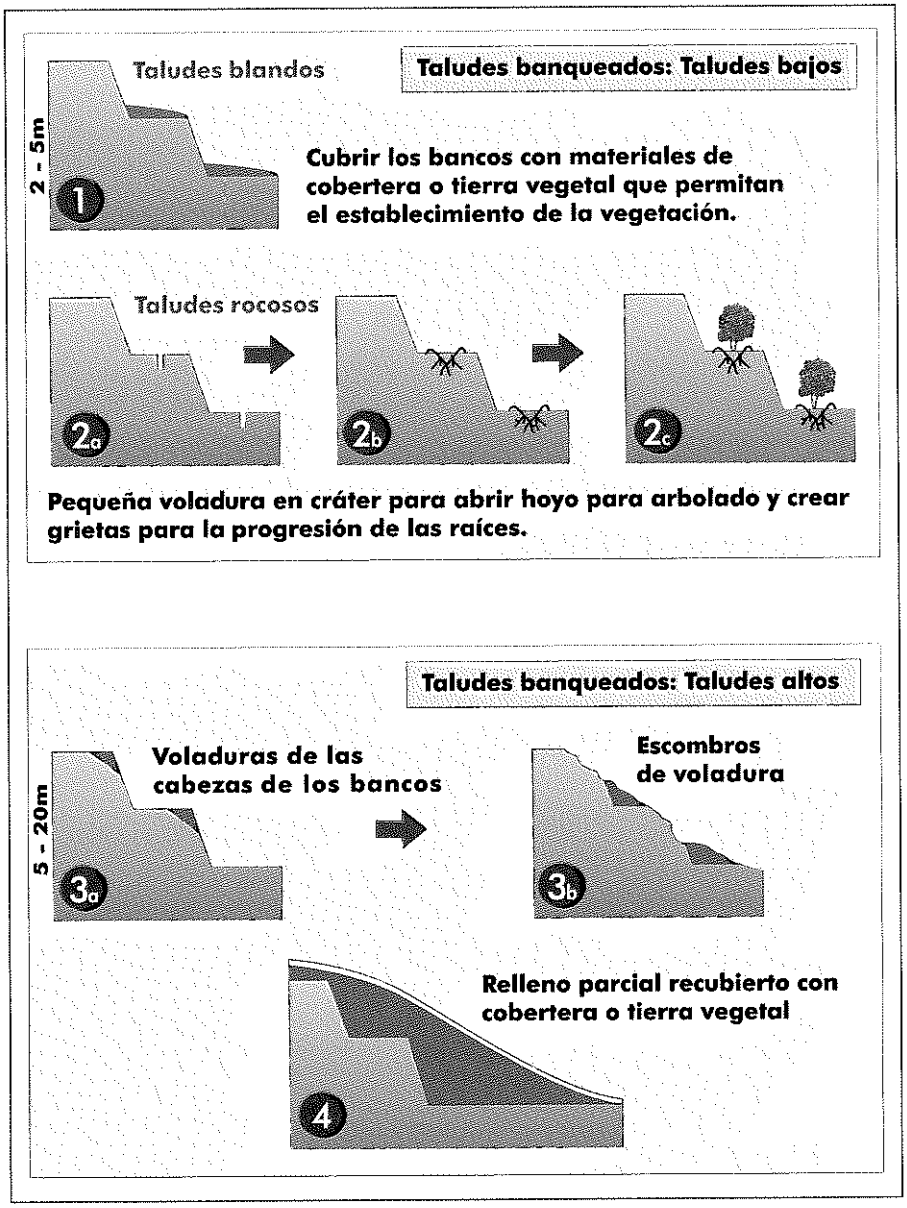


Figura 9. Posibilidades de tratamiento morfológico en taludes banqueados.

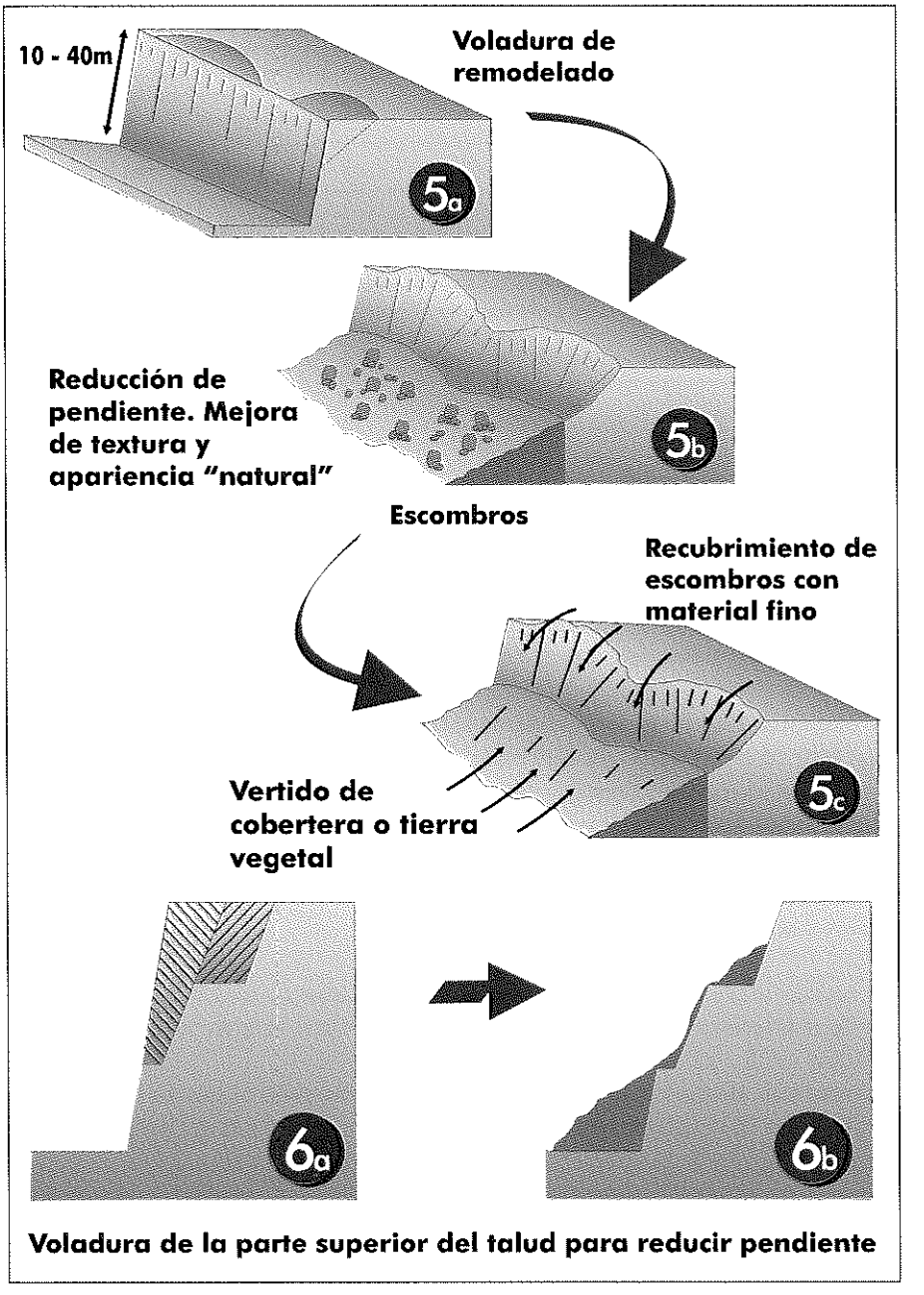


Figura 10. Posibilidades de tratamiento morfológico de un talud único de gran altura (S. Manglano, 1994).

Opciones de tratamiento según altura de bancos (Manglano, 1994).

Opción	Taludes altos		Taludes bajos
	Único	Banqueado	
Relleno total			
Relleno parcial para reducción de pendiente			
Relleno puntual selectivo para revegetación			
Voladura en cabeza para creación de pendiente continua			
Voladura en cabeza para disminución de pendiente			
Revegetación			

3.3. Drenaje

El contenido en agua de los materiales de un talud de mina, cantera o escombrera incide directamente en su inestabilidad.. La reducción de la humedad mejora considerablemente las propiedades resistentes.

En el caso de generarse aguas ácidas de mina el impacto puede provocar una alteración de magnitud muy considerable, tanto sobre el medio biológico como sobre el medio humano. Este caso lo trataremos individualmente en el epígrafe siguiente.

Por lo que se refiere a drenajes convencionales, pueden llevarse a cabo de dos maneras: mediante secado parcial y mediante aislamiento.

3.3.1. Desecación parcial

Se realiza mediante **sondeos o barrenos inclinados** revestidos de tuberia porosa. Se complementan con bajantes superficiales que canalizan el agua hasta el drenaje principal (figura 11.1)

Otra técnica utilizada son los **contrafuertes de drenaje**: el propio peso del contrafuerte estabiliza la pendiente y funciona además como drenante del agua infiltrada (figura 11.2).

3.3.2. Aislamiento hídrico

Reduce la acumulación de agua en el material y la erosión superficial. Se realiza mediante la construcción **de cunetas perimetrales de desagüe (cunetas de guarda).** Se construyen a pie y en cabecera de talud (figura 11.3).

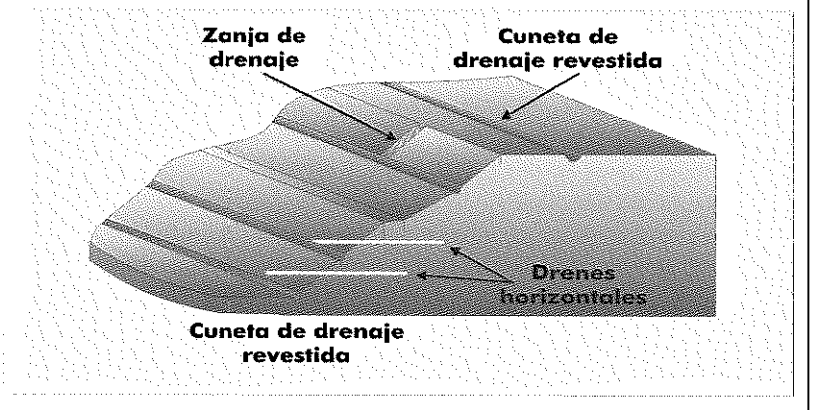


Fig 11.1.- Sistemas de drenaje en taludes

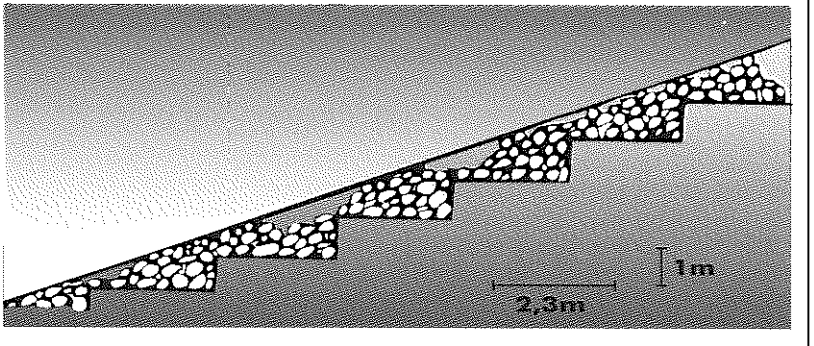


Fig 11.2.- Contrafuertes de drenaje (Hackett, 1972)

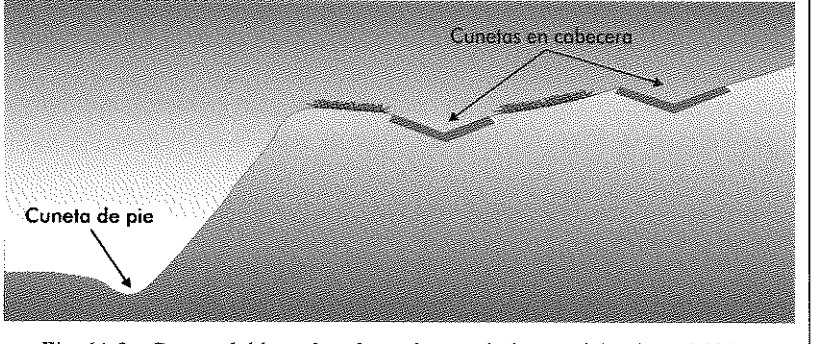


Fig. 11.3.- Cuneta doble en la cabeza de un talud para aislamiento hídrico

Figura 11. Técnicas de desecación parcial y aislamiento hídrico.

3.4. Las aguas ácidas de mina

Un problema ambiental característico de explotaciones mineras asociadas a yacimientos de sulfuros metálicos, subterráneas o a cielo abierto, o a la minería de carbón, es la generación de aguas ácidas de mina.

La formación de aguas ácidas por oxidación de sulfuros se produce cuando concurren las siguientes circunstancias:

— Existen cantidades suficientes de agua y oxigeno (condiciones aerobias)
— Presencia de bacterias catalizadoras del proceso de oxidación (esencialmente la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans).*

El proceso químico de la oxidación del mineral se sintetiza en tres fases:

1.- Oxidación del sulfuro

$$FeS_2 + H_2O = Fe^{2+} + 2\ H^+ + 2\ SO_4^{2-}$$

2.- Oxidación del sulfato ferroso a férrico

$$2\ FeSO_4 + H_2SO_4 + ½\ O_2 = Fe_2(SO_4)_3 + H_2O$$

3.- Formación de hidróxido férrico y ácido sulfúrico

$$Fe^{+3} + 3/2\ (SO_4^{2-}) + 3\ H_2O = Fe(OH)_3 + 3/2\ H_2SO_4$$

La magnitud del problema puede evaluarse si se tiene en cuenta, a la vista de lo expuesto, que una tonelada de material pirítico genera tonelada y media de ácido sulfúrico.

No existe una solución general al problema de las aguas ácidas de mina. Existen diversos métodos para minimizar los vertidos ácidos, pero en muy pocos casos se puede controlar totalmente su formación.

La elección de un método exige, en cualquier caso, un conocimiento muy detallado de la hidrogeología de la zona. Existen dos tipos de soluciones a estos problemas:

3.4.1. Técnicas preventivas

Limitan la formación de aguas ácidas mediante la inhibición de los mecanismos de oxidación de los sulfuros. Existen tres grandes grupos de métodos:

1. **Métodos de barrera**: intentan aislar los sulfuros de los agentes meteorizantes o del sistema de transporte hidrológico.
   a. **Revegetación de los terrenos**: en la práctica la explanación y revegetación de los terrenos ayuda a mejorar la calidad de las aguas, ya que la compactación reduce la exposición de los sulfuros al agua y al oxígeno.

La vegetación aumenta la evapotranspiración y restringe la movilidad del agua. Las respiración radicular y la descomposición de orgánicos reduce también la presencia de oxígeno en el suelo.

b. **Aislamiento del agua**: consiste en aislar el agua del material pirítico, mediante su colocación selectiva en vertederos con barreras impermeables.

c. **Aislamiento del oxígeno**: en ocasiones se han inundado labores mineras para eliminar la presencia de oxígeno libre. Es un método muy cuestionado desde el punto de vista ambiental.

2. **Métodos químicos**: intentan neutralizar la formación de aguas ácidas por diferentes procedimientos.

   a. **Adición alcalina**: sustancias como el hidróxido sódico, la caliza, cal o bicarbonato sódico añadidas provocan la neutralización de las aguas ácidas, ya que las bacterias que oxidan el hierro exigen un ambiente ácido.

   b. **Adición de fosfatos**: la adición de fosfatos a los estériles tóxicos ralentiza la oxidación de la pirita.

3. **Métodos de inhibición bacteriana**: los detergentes aniónicos, los ácidos orgánicos y los conservantes de alimentos consiguen eliminar las bacterias occidentes y reducir la acidificación a veces en un 50%.

3.4.2. Técnicas correctoras

Las técnicas de corrección más usadas son las siguientes:

— Plantas de neutralización química
— Plantas de ósmosis inversa
— Plantas de intercambio iónico
— Neutralización con aguas frescas
— Tratamientos biológicos
— Tratamientos en ciénegas
— Trampas calizas anóxicas
— Biolixiviación en escombreras

Las plantas de tratamiento de aguas ácidas son muy costosas y sólo aplicables a minas en actividad. Los tratamientos biológicos están aún en fase de experimentación. Los tratamientos en ciénegas y las trampas calizas anóxicas, o una combinación de ambas técnicas, son muy útiles, especialmente para bajos caudales, y baratas. Consisten en la reproducción de este tipo de medios, donde musgos y plantas emergentes del tipo anea (*Typha*) son capaces de reducir de modo natural la concentración de hierro, manganeso y calcio, elevando su pH. Se combina con trampas anóxicas haciendo pasar las aguas contaminadas, antes y después de su paso por la ciénega, por lechos de caliza enterrada.

4. RESTITUCIÓN DE ESCOMBRERAS ABANDONADAS

Una vez desestimada la viabilidad de proceder al reciclado de los materiales (veáse epígrafe 5.2), es necesario proceder a la restitución de la escombrera con las siguientes finalidades: corregir riesgos de inestabilidad, facilitar el drenaje, posibilitar la revegetación y corregir el impacto paisajístico y ecológico.

a) En escombreras más o menos llanas (con pendientes inferiores al 20º) las labores de restitución consistirán en la eliminación de elementos gruesos destacables, refino o escarificado del terreno, si lo necesita, hasta obtener una superficie fina que admita la enmienda edáfica.

b) En escombreras escarpadas o con fuerte pendiente (> 20º) es necesario adoptar otras medidas como la remodelación, el drenaje y las protecciones superfiales.
   - **Remodelación:** disminución de la pendiente mediante movimiento de tierras. Normalmente es muy caro y de difícil ejecución técnica debido a la necesidad de emplear maquinaria pesada en zonas de acceso complicado. Las soluciones más empleadas serán el reperfilado de superficie, el descabezado y acopio a muro y el aterrazado (figura 12).
   - **Drenaje:** (ver epígrafe 3.3)
   - **Protecciones superficiales:** se utilizan en taludes de fuerte inclinación, en materiales no cohesivos y sometidos a una fuerte erosión hídrica. Los sistemas más frecuentes son el **estaquillado**, la construcción de **muros y muretes de contención** o la fijación con **entramados geotextiles** (figura 13).

5. REUTILIZACIÓN

5.1. Huescos de explotación

Las operaciones extractivas constituyen un uso temporal de los terrenos que con frecuencia no suele exceder de unos 20 ó 30 años, excepto en el caso de grandes yacimientos metálicos.

Por ello, la reutilización de los huecos de explotación debe ser un factor esencial a tener en cuenta desde los primeros pasos de planificación en el diseño de la explotación, siempre que este aspecto no cuestione los de viabilidad técnica o económica.

En el caso de explotaciones abandonadas, un análisis detallado de aspectos tales como superficie, volumen, morfología, características geomecánicas y geotécnicas de los materiales, condiciones climáticas, entorno medioambiental, medio social circundante, demandas potenciales de uso, etc. permitirá conocer el destino más adecuado de los terrenos. Es, por ejemplo, esencial determinar de una manera precisa la permeabilidad de la formación geológica a efectos de reutilizar los huecos para rellenos, incluso de inertes (figura 14).

- Urbanístico e industrial
- Recreativo intensivo y deportivo
- Agrícola

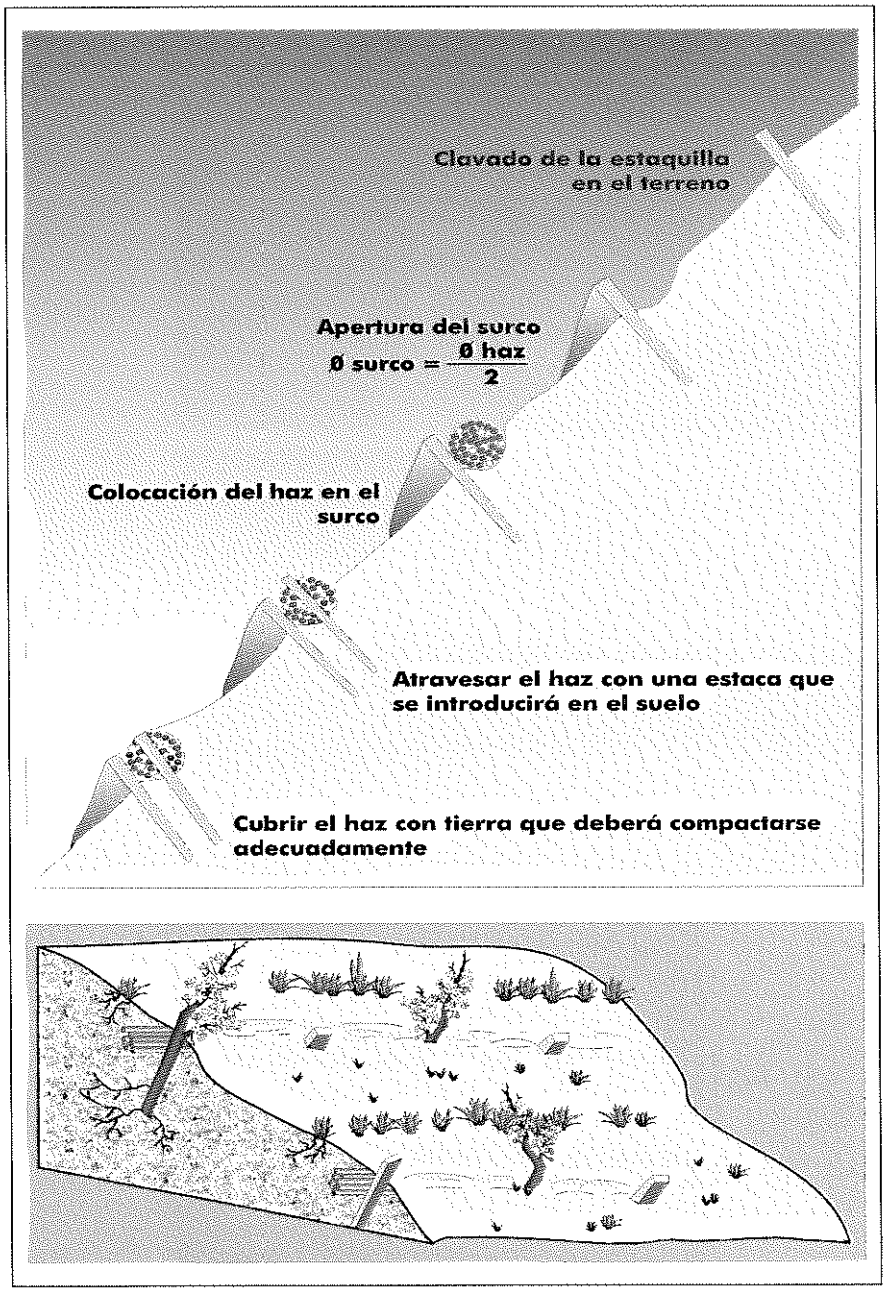


Figura 12. Técnicas de estaquillado para estabilizaciones superficiales. Taludes de escombreras.

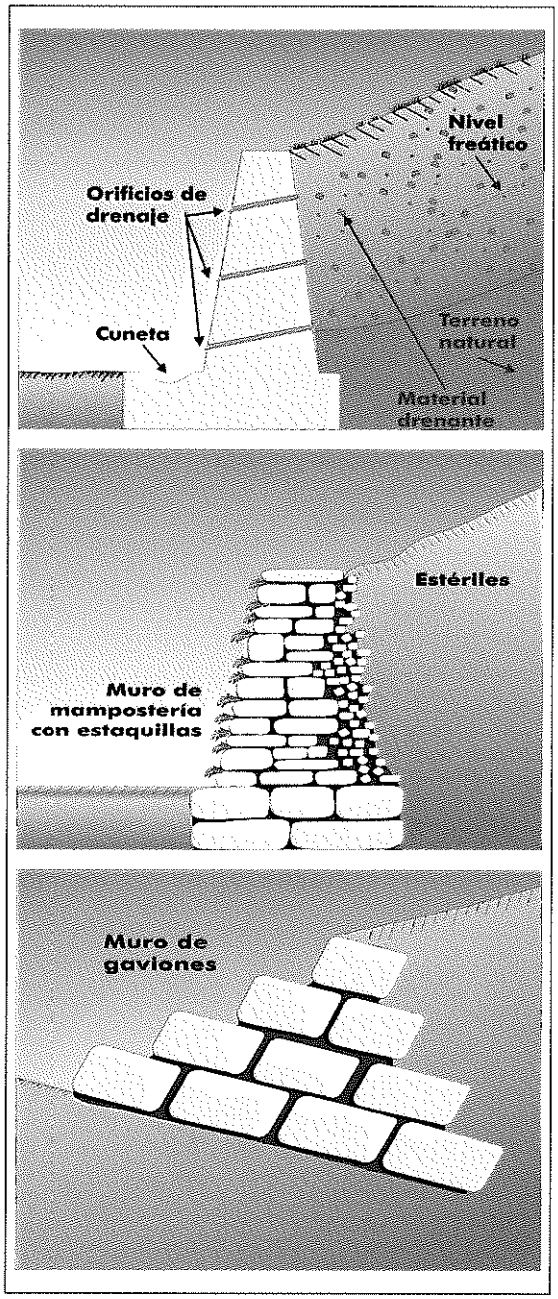


Figura 13. Detalle de muros de contención y diques de consolidación para protección de escombreras.

CLASE	1. IMPERMEABLE	2. SEMIPERMEABLE	3. PERMEABLE
Coeficiente de permeabilidad	$K <= 10^{-9}$ m/s (0,01 mm/d) en 5 m	10^{-9} m/s $< K <= 10^{-6}$ m/s (0,1 mm/d y 10 cm/d)	$K >= 10^{-6}$ m/s (10 cm/d)
Ejemplos	Margas, esquistos arcillosos, pizarras	Medios areno - arcillosos, areniscas	Aluviones, gravas
Consideraciones	Terrenos favorables, pero se necesita: Drenar los efluentes, y Evitar la entrada de agua de escorrentía	Terrenos utilizables si: La zona no saturada puede garantizar la depuración del agua lixiviada	Alto riesgo de contaminación de los acuíferos
Residuos admisibles	Ciertos tipos de residuos especiales	Residuos asimilables a basuras urbanas	Residuos inertes exclusivamente

TECNOLOGIA DE LA NATURALEZA S.L.

Figura 14. Clasificación de los terrenos para su utilización como vertederos.

— Forestal
— **Recreativo no intensivo y educacional**
— Almacenamiento de infraestructuras de depósito (agua, etc).
— Almacenamiento de inertes

En explotaciones históricas se va imponiendo, cada vez con mayor intensidad, el criterio de estudiar la viabilidad de su puesta en valor mediante proyectos de interpretación y uso recreativo en general con finalidad turística y educacional.

5.2. Escombreras

En primer lugar debe analizarse cuidadosamente la posibilidad de reciclar el material de la escombrera, total o parcialmente. Algunas de las posibles aplicaciones son las siguientes:

— Rellenos y construcción de terraplenes
— Carreteras y diques de presas
— Fabricación de ladrillos y briquetas
— Material para restauración
— Fertilizantes y enmiendas (carbón)
— Combustibles especiales (carbón)
— Aditivos para minerales energéticos (carbón), etc.

La viabilidad del reciclado dependerá de las características petrográficas, mineralógicas, químicas y fisicoquímicas de los estériles en relación a la demanda de uso en ubicaciones geográficas relativamente próximas, ya que el movimiento y transporte de este tipo de materiales condiciona la viabilidad económica de la operación.

Los estériles residuales deberán ser objeto de un posterior proyecto de restitución morfológica y, en su caso, de reutilización de los terrenos liberados.

ANEJO 1.- BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

AYALA, F.J. et al. (1987).- Manual de taludes. IGME, 1987.

AYALA, J.F. y RODRÍGUEZ,J.M. (1986).- Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. IGME, 1986.

GALIANA, F y TORRECILLA, I. (1988).- Restauración de zonas aluviales alteradas por la extracción de áridos. I Seminario sobre Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo. Madrid,1988.

HACKETT, B. (1972).- Landscape development of steep slopes Oriel Press Ltd. Newcastle Upon Tyne. England, 1972.

IGME (1986).- Abandono DE minas. Impacto Hidrológico.

IGME (1988).- Programa nacional de Estudios geoambientales aplicados a la minería. Provincia de León.

IGME (1988).- Programa nacional de Estudios geoambientales aplicados a la minería. Navarra.

IGME (1990).- Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Serv. Public. MINER. Serie: Ingeniería Medioambiental. Madrid.

IGME (1992).- Programa nacional de Estudios geoambientales aplicados a la minería. La Coruña.

IGME (1995).- Guía visual para la evaluación y corrección de impactos visuales.

IGME (1996).- Guía de Restauración de Graveras.

LÓPEZ JIMENO, C. (1988) .- La restauración de canteras a través de un diseño más racional. II Jornadas sobre restauración del Espacio Natural Afectado por Explotaciones Mineras. Consejería de Industria. Gobierno Autónomo de Canarias. 1988.

MANGLANO ALONSO, S (1988).- Criterios de diseño de canteras y minas a cielo abierto. I Seminario sobre Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo. Madrid,1988.

ANEJO 2.- NORMATIVA LEGAL

Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas

Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas

Real decreto legislativo 1/2008 de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental.

Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

Y demás legislación autonómica concordante en materia de Evaluación de Impacto Ambiental.

ANEJO 3: PRINCIPALES ALTERACIONES AMBIENTALES EN LA MINERÍA Y MEDIDAS CORRECTORAS (IGME, 1999)

ALTERACIONES EN LA ATMÓSFERA Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impactos sobre la ATMÓSFERA	Acciones correctoras o de recuperación
— Contaminación por polvo.	— Riego periódico de pistas de minas con agua o disoluciones salinas. — Estabilización química de pistas. — Pavimentación de accesos permanentes a la mina. — Retirada de las pistas de material formado por acumulación de polvo. — Revegetación de los terrenos restituidos. — Control del polvo durante la perforación por medio de captadores y reducción del número de tajos con voladuras. — Extinción de los puntos de combustión espontánea del carbón. — Reducción del tiempo entre las fases de explotación y restitución.
— Contaminación por ruido.	— Reducción de la velocidad de circulación y minimización de los cruces de pistas. — Empleo de pantallas vegetales o artificiales contra el viento, que dificulta su libre circulación en los niveles superficiales. — Sustitución de los volquetes por cintas transportadoras. — Riego de las pilas de materiales que se cargan sobre lo volquetes. — Estudio de la ubicación de plantas de tratamiento de acuerdo a las direcciones predominantes de los vientos. — Situar las plantas lo más alejadas posible de las zonas habitadas. — Construir barreras sónicas perimetrales. — Emplear cintas transportadoras mejor que volquetes. — Instalar silenciadores en los equipos móviles. — Estudiar rutas alternativas de transporte en zonas próximas a las áreas habitadas. — Realizar un mantenimiento preventivo adecuado y recubrir de goma los elementos metálicos que sufren los impactos de las rocas. — Utilizar equipos accionados eléctricamente. — Limitar el trabajo de las unidades más molestas a horas diurnas. — Disminuir las cargas operantes de explosivo y emplear detonadores y accesorios de microrretardo. — Cubrir el cordón detonante expuesto al aire libre. — Reducir al máximo las operaciones de taqueo de bolos con explosivos, etc.

ALTERACIONES EN LAS AGUAS Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impacto sobre el AGUA SUPERFICIAL	Acciones correctoras o de recuperación
— Alteración permanente de los drenajes superficiales (severa en escombreras y moderada en la implantación de viales e infraestructuras).	— Creación de sistemas de drenaje, generales para la recogida de las aguas externas de la zona, y particulares para cada escombrera o talud. — Reducción de las pendientes de los taludes de vertederos y excavaciones para disminuir la velocidad y, por tanto, la capacidad erosiva de las láminas de agua, y favorecer al mismo tiempo la implantación de la cubierta vegetal que va a sujetar las tierras. — Diseño de vertederos con superficies cóncavas y longitudes continuas de declive reducidas, unidas por pequeñas terrazas de separación, con una ligera pendiente hacia el interior de los taludes. — Construcción de obras auxiliares de canalización para la protección de canales, escombreras, taludes de explotaciones, etc.
— Contaminación de aguas superficiales.	— Recogida y canalización de las aguas contaminadas en las minas hacia balsas reposadores donde se produzca la decantación de los sólidos antes del bombeo al exterior. — Adecuación de la planta de tratamiento más conforme a las características de los contaminantes del agua (depuración, balsa de decantación, etc.). Este sistema de tratamiento deberá alimentarse con todos los efluentes de la zona explotada y se situará antes de la descarga a la corriente fluvial receptora. — Establecimiento de un sistema de análisis periódicos que detecte las variaciones y anomalías inadmisibles en las características del agua, a la salida de la planta, y antes de su entrada en el receptor. — Revegetación de áreas restituidas y reducción de la superficie afectada por las labores mineras, ambas acciones para reducir la erosión. — Aislamiento de materiales fácilmente disgregables y contaminantes, cubriendo con otros materiales procedentes de la propia explotación.

Impactos sobre los ACUÍFEROS	Acciones correctoras o de recuperación
— Alteración temporal del régimen de caudales subterráneos motivada por la creación de huecos y excavación de galerías y bombeos del agua de los niveles freáticos seccionados. Impacto temporal, recuperable al cesar las operaciones de menor entidad. — Contaminación de acuíferos (aceites, hidrocarburos, etc.) temporal y de efectos preocupantes, derivada del mantenimiento de maquinaria.	— Los aceites son un contaminante importante y difícil de tratar. Deberán recogerse los aceites usados tras el mantenimiento de la maquinaria, si éste se realiza en la zona de explotación.

ALTERACIONES DE LOS SUELOS Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impactos sobre el SUELO	Acciones correctoras o de recuperación
— Ocupación irreversible del suelo fértil por la creación de huecos y escombreras. — Inducción de efectos edáficos negativos en los alrededores de la explotación por las operaciones derivadas por la creación de huecos, escombreras y pistas.	— Retiradas y acopio de la tierra vegetal de las zonas ocupadas por la explotación. — Diseño de un modelado en la recuperación que permita la utilización productiva y ecológica del terreno una vez explotado. — Adopción de medidas que eviten la producción de polvo, desprendimientos y deslizamientos.

ALTERACIONES SOBRE LA FLORA Y LA FAUNA Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impactos sobre la FLORA y la FAUNA	Acciones correctoras o de recuperación
— Eliminación o alteración de hábitats vegetales terrestres para la fauna, así como desplazamiento o concentración de especies o individuos, motivados por la construcción de huecos y por la creación de pistas. — Cambios en las pautas de comportamiento de la fauna por perturbaciones causadas por el tráfico de volquetes y maquinaria pesada, y por la creación de pistas e infraestructuras. — Eliminación o reducción de la cubierta vegetal, así como provocación de dificultadas para la regeneración de la vegetación.	— Revegetación con especies autóctonas de los ecosistemas afectados. — Adecuar medidas para la optimización del tráfico y para la disminución de ruidos. — Preparación del suelo, mejora del microclima (riesgo, abonado) y revegetación con especies autóctonas de los ecosistemas afectados.

ALTERACIONES EN LSO PROCESOS GEOFÍSICOS Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Riesgos geofísicos	Acciones correctoras o de recuperación
— Aumento del riesgo de los desprendimiento, deslizamientos o hundimientos de tierras, motivado por la creación de escombreras (impacto severos) y por la construcción de huecos y galerías subterráneas (impacto moderado).	— Colocar sobre el terreno natural, antes del comienzo del vertido de la escombrera, una capa de espesor suficiente de material grueso drenante seleccionado, con objeto de lograr en el interior de la escombrera un nivel freático bajo. — Utilizar en lo posible, para el núcleo interior de la escombrera, el material de mayor granulometría para favorecer la estabilidad y drenaje. — Evitar romper el equilibrio de los estériles. — Evitar ubicar la escombrera en terreno pendiente. — Modelar la escombrera de modo que su factor de seguridad sea superior a 1,2. — Diseñar un sistema de drenaje superficial que desagüe las aguas directamente interceptadas por la escombrera o las conecte con la red externa de drenaje. — Evitar ubicaciones de escombrera en zona con peligro de hundimientos (minería subterránea, litologías con socavamientos, etc.).
— Aumento de la carga de sedimentación aguas abajo, producido por la adición de material sólido, derivado de la creación de escombreras, de pistas e infraestructuras. — Aumento de la erosión, derivada de las operaciones que son precisas para la creación de escombreras y pistas, de la propia existencia de escombreras y taludes, y del tráfico de volquetes y maquinaria pesada. — Aumento del riesgo de subsidencia, producido por la creación de las escombreras.	— Adoptar medidas que eviten la producción de polvo. — Establecer sistemas de drenaje generales y particulares. — Revegetación rápida tras los movimientos finales de tierra en cada zona. — Disminución de pendientes y de longitudes de declive en taludes de pistas y escombreras, situándose en los límites inferiores que permitan la correcta explotación. — Establecimiento de sistema de drenaje generales y particulares. — Revegetación rápida tras los movimientos finales de tierra. — Evitar la ubicación de las escombreras en zonas con peligro de hundimiento (minería subterránea abandonada, zonas kársticas, etc.).

ALTERACIONES DE LA MORFOLOGÍA Y DEL PAISAJE Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impactos sobre la MORFOLOGÍA y el PAISAJE	Acciones correctoras o de recuperación
— Perturbación de carácter global del paisaje, generalmente grave en el caso de las escombreras, severa en el de los huecos de explotación y de menor entidad por su mayor facilidad de control y temporalidad las derivadas de la construcción de edificios y plantas, y de la implantación reaccesos e infraestructura.	— Reducir en lo posible el tamaño de excavaciones y vertederos. — Remodelar la topografía alterada de modo que se ajuste lo más posible a la natural. Utilizar los productos de las excavaciones para rellenar en otros lugares. — Redondear taludes, en planta y en alzado, evitando las aristas y superficies planas. — Plantación de árboles y arbustos que actúen como pantallas visuales. — Medidas protectoras de la vegetación existente: cercar los árboles grandes que ya existan, cuidar que no se corten raíces principales, regar y fertilizar. — Compensar el deterioro del medio con la creación de zonas, pasillos o cinturones verdes en el interior o inmediaciones de las instalaciones industriales. — Plantaciones tipo jardín, con especies adecuadas, no necesariamente autóctonas, dirigidas a mejorar la apariencia general de las instalaciones. — Empleo de materiales del lugar. — Empleo de colores que contribuyan a disminuir el contraste con el medio (en general, mates y oscuros). — Adaptación de las instalaciones e infraestructuras a la topografía local (no superar líneas naturales de horizonte, elección de situaciones cerradas visualmente, etc.). — Revegetación general con las especies autóctonas de la zona y el esquema de plantación adecuado para la adaptación de la zona afectada por la explotación al paisaje circundante.

ALTERACIONES DEL ÁMBITO SOCIO-CULTURAL Y MEDIDAS CORRECTORAS.

Impactos	Acciones correctoras
— Alteración de lugares significativos que son considerados como un patrimonio cultural y social por su valor singular (histórico, artístico, científico, educativo, natural, etc.). — Aumento de la densidad de tráfico sobre las vías públicas con el consiguiente peligro de accidentes, deterioro de firmes, así como el embarrado de las carreteras.	— Adecuación de la zona alterada tras la recuperación de la forma que pueda mantener su uso tradicional. — Adecuación alternativa para el uso perdido. — Traslado y reinstalación en el caso de ser obras del hombre. — Trata con especial cuidado si se trata de endemismo de flora o fauna. — Construcción de pistas de uso interno. — Mejora de carreteras ya existentes. — Instalación de estaciones automáticas de lavado de ruedas y bajos de todos los vehículos que accedan a la red viaria. — Disposición de carteles indicadores de peligro.

CAPÍTULO 5

EL IMPACTO AMBIENTAL EN LA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS. EL PROYECTO DE RESTAURACIÓN DEL TAJO DE SAN PEDRO DE LA ALHAMBRA DE GRANADA

José Luis de Justo Alpañés
Profesor Emérito, Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias

Percy Durand Neyra
Profesor Titular de Universidad

Narciso Vázquez Carretero
Profesor Titular de Universidad

Manuel Vázquez Boza
Becario del Plan de Formación de Personal Docente e Investigador

Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla
E.T.S. Arquitectura, Av. Reina Mercedes 2- 41.012 Sevilla jlj@us.es

J. M. Azañón
Catedrático de Universidad

Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada

Miguel Villalobos Megía
Director del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio
NUBIA CONSULTORES
E-mail: miguelvillalobos@nubiaconsultores.es

Resumen:

El tajo de San Pedro es un diedro de 65,5 m de altura que ha progresado hasta colocarse a 23,8 m de la muralla palacio de La Alhambra que es Patrimonio de la Humanidad. El entorno paisajístico es de una calidad indiscutible al tratarse de uno de los paseos urbanos más hermosos del mundo. Los mecanismos focales de los terremotos modernos indican un estado actual de deformaciones de extensión, que aflojan el terreno y activan su caída, con dirección principal NE-SW, compatibles con la existencia de fallas normales de dirección predominante NW-SE. Una falla principal coincide con la cara occidental del diedro. El coeficiente de seguridad del Tajo sometido a un terremoto de período 100 años es de 0,73. La solución propuesta para su preservación debe causar un mínimo impacto ambiental, que implica mínima intervención y coste. Esto se consigue mediante una malla de alambre postensada de alto límite elástico y vegetación autóctona. Con este refuerzo, el coeficiente de seguridad frente a un terremoto se eleva a un valor en torno a 1,00.

Abstract:

San Pedro cliff is a dihedral 65,5 m high, which has progressed to place itself at 23.8 m from the Alhambra wall-palace that that was granted a World Heritage award in 1984. The surrounding landscape is remarkable, being one of the most beautiful urban environments of the world. Focal mechanisms of modern earthquakes show a current extension tectonic regime that loosens the ground and activates the ground falls. One major fault coincides with the west face of the dihedral. The factor of safety of the cliff subject to the 100 years period earthquake is 0.73. The proposed solution for its preservation must cause a minimum environmental impact, which implies minimum intervention and cost. This is achieved with a post-tensioned high elastic limit wire mesh and autochthonous vegetation. With this reinforcement, the factor of safety under that earthquake raises to a value around 1.00.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades colgadas, construidas en el borde de un acantilado y sometidas a frecuentes deslizamientos, ocupan un lugar significativo dentro de los problemas planteados en la preservación de sitios históricos. Estos corrimientos han sido corregidos hasta ahora con métodos caros y no siempre eficientes.

Un ejemplo de este problema es el Tajo de San Pedro, un diedro de 65,5 m de altura, que ha progresado hasta colocarse a una distancia de 23,8 m de la muralla-palacio de La Alhambra, que es Patrimonio de la Humanidad (Fig. 1).

GEOGRAFÍA, GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

La ciudad de Granada está emplazada al borde de una zona plana rodeada de montañas, que se conoce geográficamente con el nombre de Depresión de Granada. Desde

Figura 1. El Tajo de San Pedro bajo las murallas de La Alhambra, con el Darro a sus pies y frente a la Iglesia de San Pedro y San Pablo. Delante El Albaicín.

un punto de vista geológico, esta depresión se conoce como Cuenca de Granada y corresponde a un área que se rellena de sedimentos al tiempo que se levantan los relieves circundantes de las sierras Nevada, Arana, Parapanda, Gorda, Tejeda y Almijara. El relleno comienza en condiciones marinas hace unos 19 Ma, pasa a condiciones continentales hace unos 5-6 Ma y termina aproximadamente hace tan sólo 0,5 Ma. Posteriormente, toda la región ha debido de sufrir levantamiento hasta la altitud actual, al tiempo que se ha ido instalando sobre ella la red de drenaje actual, tributaria en su totalidad del río Guadalquivir. El sustrato de la Cuenca de Granada son materiales metamórficos de edad paleozoica a triásica y sedimentos de edad Triásica-cretácica. Los materiales más antiguos del relleno de la cuenca son conglomerados, calcarenitas y margas, depositados en condiciones marinas, cuya edad es Tortoniense inferior (Fig. 2).

Posteriormente, en el Messiniense (5-6 Ma), se retira el mar y comienza el relleno en condiciones continentales y con una paleogeografía más parecida a la actual, en la que la Cuenca de Granada debía de estar ya individualizada. Este relleno continental consiste en conglomerados, lutitas, areniscas y calizas, que se depositan por la acción de ríos que drenarían las sierras circundantes y que conectarían con medios lacustres situados en la parte central de la cuenca.

Figura 2. Mapa geológico de la ciudad de Granada.

El relleno de la cuenta de Granada ha sido en buena parte sincrónico de la actividad de fallas localizadas en su borde fundamentalmente y que han controlado el depósito. Estas fallas son de carácter normal, dominando las de dirección NW-SE, con buzamientos hacia SW y hundimiento de los bloques situados al SW. Al final del proceso de relleno de la cuenca, las fallas han producido el levantamiento de las formaciones sedimentarias depositadas al principio del proceso de relleno, es decir, los depósitos marinos tortonienses se observan en relieves emergidos, situados principalmente en los bordes de la cuenca.

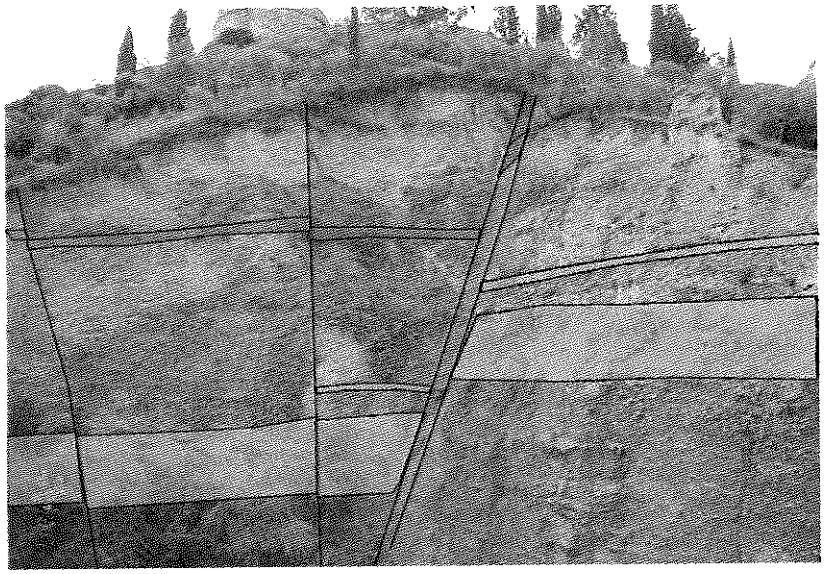


Figura 3. Vista del diedro mostrando el salto de falla.

Las relaciones entre las distintas formaciones de relleno de la cuenca son de discordancia en los bordes y paraconformidad hacia el centro; no obstante, en muchas localidades las relaciones que se observan actualmente son tectónicas (fallas normales).

En la ladera norte de la colina de La Alhambra desde el Tajo de San Pedro hasta la fuente del Avellano se reconocen un buen número de fallas normales de dirección N130-N150 y fuerte buzamiento (65-75°), tanto hacia el SW (dominante) como el NE (subordinado). En el Tajo de San Pedro, existe una falla de esta familia coincidiendo con la arista del diedro (Fig. 3), la cual tiene un salto de unos 7 m y es aproximadamente paralela al lado occidental del tajo (orientado aproximadamente N150°E); de hecho, este lado del tajo corresponde en nuestra opinión al escarpe de falla con un cierto retroceso debido a desprendimientos y otros procesos activos sobre la ladera.

La actividad de estas fallas es posterior al depósito de la Formación Alhambra, es decir, posterior al Pleistoceno inferior. En cualquier caso, es razonable atribuir a estas fallas una actividad cuaternaria o incluso actual, ya que no aparecen fosilizadas por ningún depósito. Su funcionamiento ha podido ser cosísmico, de modo que las fallas acumularían desplazamientos importantes como consecuencia de terremotos repetidos a lo largo del tiempo.

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL TAJO DE SAN PEDRO

El Tajo de San Pedro es una consecuencia de las riadas del río Darro, la tectónica, la erosión y quizá las filtraciones provenientes del palacio de La Alhambra. Las fracturas producidas por el régimen tectónico de extensión han favorecido el ataque de la ladera

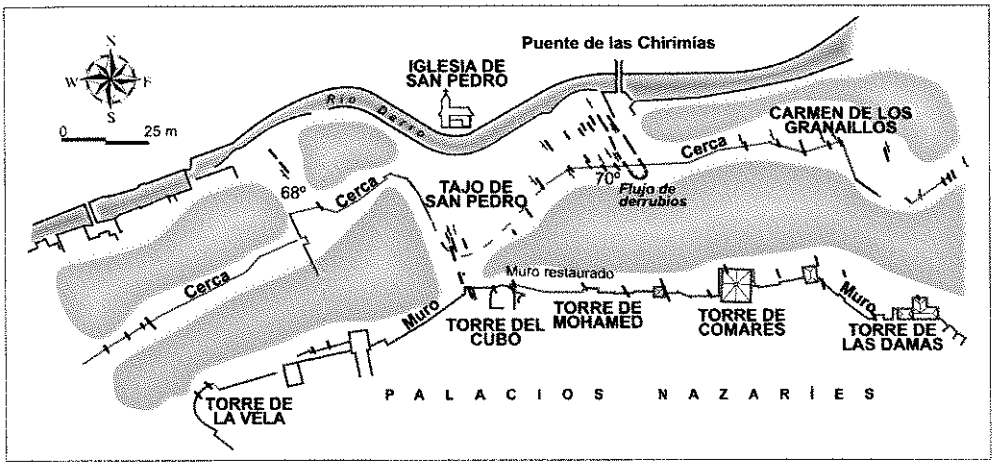


Figura 4. Esquema de planta mostrando las principales roturas de la valla y muro de La Alhambra y fallas en la ladera de la colina.

de la colina de La Alhambra por el río durante las crecidas. Estas riadas han creado un meandro convexo hacia el Tajo (Fig. 4).

En la época árabe debía existir una cerca, alineada con el río, que contorneaba un Tajo de dimensiones muy inferiores a las actuales. Esta cerca pudo, tal vez, ser derruida por el terremoto de 1431.

Las noticias sobre desprendimientos en el Tajo arrancan de poco después de 1524, en cuya fecha un incendio acabó con la vegetación del Cerro de La Alhambra, dejando el terreno desprovisto del armado que aportaban sus raíces. También parece que se dispuso un aliviadero de los aljibes de La Alhambra sobre la terrera de protección construida en su pie en 1520, lo que pudo contribuir a su destrucción.

Del grabado de Hüfnagel de 1564 parece deducirse que la cuña de retroceso del Tajo se encontraba en esa época a 60 m en horizontal de la muralla de La Alhambra, y que la altura total del Tajo era de 33 m (Fig. 5).

El 5 de marzo de 1600 una nueva crecida del Darro socava la base de la colina roja de La Alhambra, a lo que pudo contribuir la plataforma ampliada para la construcción de la Iglesia de San Pedro y San Pablo, que deja el Tajo en una situación que empieza a parecerse a la actual.

Aparecen desprendimientos documentados en 1601, 1763, 1788, antes de 1927, 1963, 1970 y 1985, pero ya no se citan como causas las crecidas del Darro, sino vertidos y reblandecimientos provocados por el agua que circula por la acequia de Santa Ana, explosiones, escorrentías o filtraciones de la propia Alhambra. Estos desprendimientos van provocando la rotura de la cerca cristiana.

De la comparación de grabados y planos topográficos se deduce que el retroceso medio de la cuña (en horizontal) es de 8 cm/año, siendo ésta la cifra que se deduce de la comparación de los planos de 1930 y 1994.

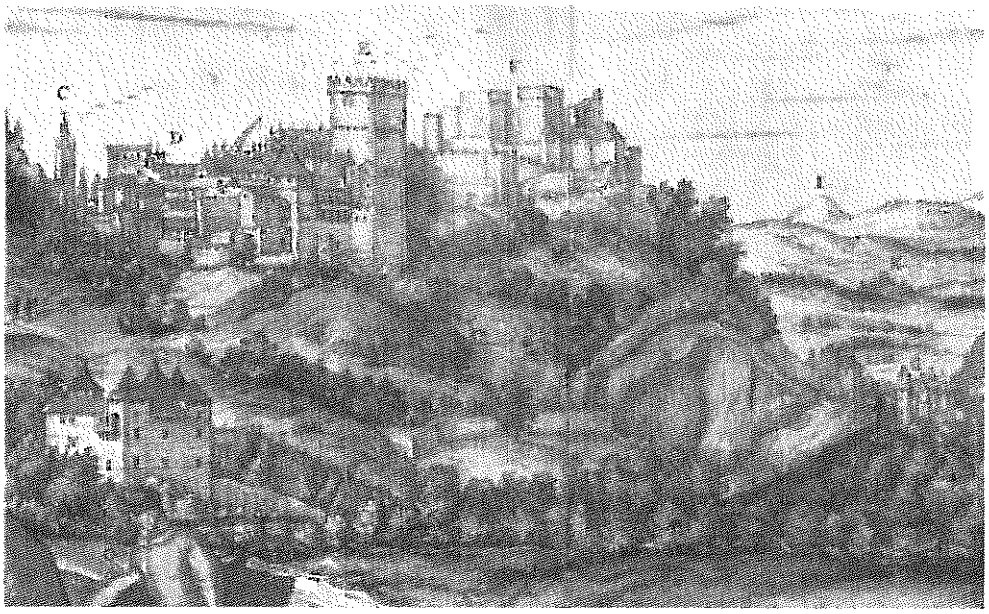


Figura 5. Grabado de Hüfnagel de 1564.

SISMICIDAD

La actividad sísmica en la Depresión de Granada es alta, con un gran número de terremotos, pero todos ellos de magnitud moderada o baja ($M_b \leq 5,5$) (De Miguel et al., 1989). En tiempos históricos ha habido terremotos importantes con cuantiosos daños materiales (Tercedor, 1951), pero de magnitud difícilmente evaluable. Por la incidencia que pueden tener en la estabilidad del Tajo de San Pedro se van a citar a continuación los terremotos más significativos, sobre todo los que han afectado a La Alhambra:

— En 1169-1170 se produjo el terremoto de Andujar: "*Se derrumbó el alminar de Granada*".
— El 1 de Julio de 1431 se produjo la Batalla de Higueruela. Un terremoto afectó al campamento de Juan II de Castilla que sitiaba La Alhambra al pie de Sierra Elvira. "*En este tiempo tremió la tierra en el Real é mas en la ciudad de Granada, é mucho más en el Alhambra, donde derribó algunos pedazos de la cerca della*"
— El 22 de Septiembre de 1522 un terremoto de intensidad VI cuarteó las torres de La Alhambra.
— El 4 de julio de 1526 un terremoto derribó la torre Turpiana de Granada.
— En 1612 aparece una relación sobre la caída de 50 tapiales de muralla desde la puerta principal al monasterio de los Mártires, achacados a un terremoto.
— El 9 de octubre de 1680 se produjo el terremoto de Málaga que causó destrozos en Granada.

— En 1734 aparece una profunda grieta en la cara este de la Torre de Comares, probablemente debida a un terremoto.
— El día de Todos los Santos de 1755 se produjo el terremoto de Lisboa que en Granada tuvo una intensidad de VI a VII.
— Los días 12, 13 y 14 de noviembre de 1778 aparecen relatadas 24 sacudidas y varios edificios quebrantados.
— Los días 13, 14 y 15 de enero de 1804 se produjeron daños en la catedral, iglesias y edificios.
— El 29 de 1822 aparecen datados daños en la Torre de Comares y otras construcciones.
— El 25 de diciembre de 1884 se produjo el Terremoto de Andalucía de intensidad VII.
— En 1910, 1951, 1975 y 1979 se produjeron terremotos de intensidad VI.
— En 1956 se detectó un terremoto de intensidad VII.

CRECIDAS DEL DARRO

Como se ha mencionado anteriormente las crecidas del río Darro han sido probablemente el origen del Tajo de San Pedro. Entre las más importantes podemos citar:
— El 21 de Junio de 1478 se produjo un desbordamiento del Darro que arrasó el Zacatín y la Alcaicería.
— El 11 de abril de 1482 se produjo un nuevo desbordamiento con varias victimas mortales.
— El 5 de marzo de 1600 aparece relatada una nueva crecida del Darro que socava la base de la colina roja de La Alhambra y origina el desprendimiento de lo que hoy se conoce como Tajo de San Pedro.
— El 21 de septiembre de 1614 una nueva crecida del río Darro arrasa varios molinos del cauce urbano.
— El 28 de agosto de 1629 se produjo una crecida que arrasó viviendas en El Albaicín y en la ciudad. Según se relata: "*por los barrancos de las laderas de La Alhambra bajaba el agua torrencialmente, hundiéndose 54 viviendas de sus riberas*".
— En 1635 y 1642 se recogen nuevos desbordamientos del Darro.
— En 1684, un desbordamiento del Darro arrasa varios molinos del cauce.
— En 1701, durante una crecida del río, se rompe el puente de La Gallinera.
— En 1803, la crecida del Darro produjo daños en la ciudad.

LA FORMACIÓN ALHAMBRA

El Tajo de San Pedro corta una serie de niveles densos conglomerados que constituyen la llamada formación Alhambra, de edad Plioceno inferior a Pleistoceno, y corresponden a abanicos aluviales procedentes de la erosión de Sierra Nevada. En ese momento, el relieve sufrió un rejuvenecimiento. En años posteriores (Pleistoceno

medio y superior) una densa fracturación produjo el hundimiento de la depresión de Granada.

El terreno atravesado por los sondeos es un conglomerado de color gris claro con finos limosos, de color marrón, en el que se intercalan capas de limo de color rojizo. La perforación del sondeo realizada con corona de widia de 86 mm ha partido las piedras, lo que hace que el tamaño máximo que aparece en los análisis granulométricos sea de 63 mm. El contenido de finos aumenta de arriba abajo. Existe entre un 13 y un 35% de matriz de tamaño <0,08 mm, que suele ser limo arenoso (a veces arcilloso). Existen también capas de hasta 1 m de limo arcilloso. Por otro lado, al pie del talud aparecen derrubios de bloques, gravas, arena y limo.

Se realizaron ensayos estáticos y dinámicos cuyos resultados se resumen a continuación:

Propiedades del terreno:

— w_L = 21,4-27,5 I_P = 2-11 USCS = CL a GM

— CO_3Ca 7,1-11,5%

— Ángulo de rozamiento interno: ϕ' = 43,8–46,9° (conglomerado)

— c' = 32 kPa ϕ' = 34° q_u = 400 kPa (arcilla y limo arenoso)

— Presiómetro:

p_f = 1000-3700 kPa p_l 2300-7400 kPa
E_p = 33-116 Mpa K_0 = 1 (media)

— γ = 20-22 kN/m^3

— Coeficiente de permeabilidad: $k = 6 \times 10^{-10}$ m/s a drenaje libre

Ensayos dinámicos:

— Velocidad de las ondas longitudinales: V_p = 1500-2400 m/s
— Velocidad de las ondas transversales: V_s = 800-1150 m/s
— Coeficiente de Poisson dinámico: V_d = 0,30-0,35
— Módulo de elasticidad dinámico: E_d = 3700-8300 MPa
— Existe un cierto incremento de la resistencia y rigidez del terreno (estática y dinámica) con la profundidad, sobre todo en la última capa, situada por debajo de la cota 738.

PAISAJE

El entorno paisajístico de la actuación es de una calidad indiscutible, al tratarse de uno de los paseos urbanos más hermosos del mundo.

El paseo por la orilla derecha del río, desde Plaza Nueva hasta el Paseo de los Tristes (conocido como *Carrera del Darro*) está catalogado como uno de los más románticos

de España. A lo largo del río, cuatro puentes de piedra permiten su franqueo, el de Cabrera y el de Espinosa (Fig. 6), en la Carrera, construidos en época cristiana en el siglo XVI, y los de Chirimías y del Aljibillo en el Paseo de los Tristes. Este último comunica el barrio del Albaicín con La Alhambra a través de una empinada cuesta llamada de los Chinos.

Ascendiendo por el río, la Carrera del Darro se inicia en Plaza Nueva, a escasos 300 m de la actuación. El pretil del río, cuyo cauce discurre a los pies de la Colina de La Alhambra, descubre un paisaje de abigarrado colorido y caprichosa estructura, compuesto por el paredón de la Iglesia de Santa Ana. En la acera de la izquierda, palacios y casas solariegas castellanas lucen portadas plateresca, renacentistas y barrocas, alternando con construcciones monumentales árabes y con conventos de modesta fachada.

Figura 6. Puentes de Espinosa y Cabrera.

Esta valoración viene refrendada por el reconocimiento internacional que ostentan las dos colinas entre las que discurre el cauce del Darro: la de La Alhambra, sobre el Conjunto Monumental de la Alhambra y Generalife, y la del Albaicín, en la que se asienta el barrio del mismo nombre.

Ambos conjuntos han sido catalogados como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. A ello se suma el carácter histórico de la vía sobre la que se han identificado al menos tres Bienes de Interés Cultural (BIC) y un conjunto de casas señoriales.

FLORA, VEGETACIÓN Y FAUNA

La flora presente en un área tan humanizada está formada fundamentalmente por especies de carácter antropófilo a la que se añaden especies silvestres que "soportan" una presión más o menos intensa del hombre.

Del amplio elenco de especies que pueden encontrarse en el Tajo de San Pedro se ha hecho una revisión de aquellas que pudiesen tener algún interés para su conservación por tratarse de especies protegidas o con un estatus poblacional restringido, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especies de flora amenazadas localizadas en el emplazamiento. En la tabla se presenta la única especie incluida en listados de protección de flora nacionales e internacionales, o en catálogos de recomendada protección (columnas sombreadas), que ha sido detectada en la zona de estudio.

FLORA AMENAZADA DEL ÁREA DE ESTUDIO							
Especie	Berna	Directiva Hábitat	CNEA	LFFSA	UICN	CGERPA	LRFVE
Celtis australis	—	—	—	IE	LR	LR	—

Especies protegidas por legislación: **Berna**= Convenio de Berna. **Dir. Hábitat**.= Directiva 92/43 de la Unión Europea relativa a la Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestre. **CNEA**= Real Decreto 439/90, en el que se establece el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas. **LFFSA**= Ley 8/2003 de la Flora y Fauna Silvestre de Andalucía. **IE**= De Interés Especial. **LR**= Bajo riesgo.

Como se aprecia en dicha tabla, únicamente el almez (*Celtis australis*) se considera como especie de interés especial, no tratándose por tanto de un elemento en peligro de extinción. De hecho este árbol se utiliza con frecuencia en la jardinería de Granada, además de ser una especie que por sí sola coloniza roquedos y taludes de fuerte inclinación próximos a cauces.

Las comunidades vegetales que aparecen en la zona del Tajo de San Pedro que se encuentran protegidas por la Directiva Hábitats (Directiva 92/43/CEE y su aplicación al estado español en el Real Decreto 1997/1995) aparecen recogidas en la Tabla 2. Los hábitats inventariados están agrupados en 5 epígrafes de la Directiva y abarcan un total de 7 comunidades vegetales, de las cuales 6 son de interés general y 1 de interés prioritario. Las filas que aparecen sombreadas en gris corresponden a hábitats catalogados como de "carácter prioritario", etiqueta que se aplica a aquellos hábitats de distribución muy reducida o en claro peligro de extinción.

El componente faunístico de la zona esta muy determinado por la presencia continuada del hombre y por la desaparición de los hábitats que permiten sustentarla, de ahí que la mayor parte de las especies que puedan encontrarse son de carácter antropófilo o bien soportan en cierto grado al hombre.

Del elenco de especies existentes únicamente el murciélago común cuenta con un estatus de protección significativo, encontrándose el resto de especies fuera de peligro. Junto con esta especie existe la posibilidad de que se presente en la zona de estudio la culebra de herradura, que si bien no ha sido detectada en la zona, es posible su existencia si se tiene en cuenta los hábitats que frecuenta (cultivos, matorral, etc.).

Tabla 2. Comunidades que se encuentran protegidas por la Directiva Hábitats (Directiva 92/43/CEE y su aplicación al estado español en el Real Decreto 1997/1995) que aparecen en la zona de estudio.

Hábitat (Directiva 92/43/CEE)	Sintaxonomía
32.22 a 32.26 Todos los tipos. Fruticedas, retamares y matorrales termo-mesomediterráneos	Retamion sphaerocarpae: **Retamo sphaerocarpae-Genistetum speciosae** Stipion tenacissiae: **Thymo gracile-Stipetum tenacissimae**
37.4 Prados mediterráneos de hierbas altas y juncos (Molinion-Holoschoenion)	Molinion-Holoschoenion: **Cirsio monspessulani-Holoschoenetum vulgaris**
54.12 Manantiales petrificantes con formación de tobas (Cratoneurion)	Adantetalia capilli-veneris: **Trachelio caeruleae-Adiantetum capilli-veneris**
62.1 y 62.1 Vegetación casmofítica de pendientes rocosas. Subtipos calcáreos.	Asplenietalia glandulosi: **Antirrhino hispanicae-Putorietum calabricae**
44.17 Bosques galería de Salix albay Populus alba	Populenion albae **Rubio tinctori-Populetum albae** Salicion triandro-neotrichae **Salicetum discoloro-angustifoliae**

En la Tabla 3 se refleja el grado de protección según la legislación vigente.

Tabla 3. Especies de mayor interés del área de estudio (incluidas en listados de protección de fauna, nacionales e internacionales y las no recogidas que se encuentran en categorías de riesgo según publicaciones científicas o de expertos en cada grupo taxonómico).

FAUNA VERTEBRADA DE INTERÉS DEL MUNICIPIO DE DALÍAS					
Nombre científico	Nombre común	Dir. Hab	Dir. Aves	CNEA	UICNand
Reptiles					
Coluber hippocrepis	Culebra de herradura	P. estricta		II	
Mamíferos					
Pipistrellus pipistrellus	Murciélago común	P. estricta		II	

Dir. Hab.= Directiva 92/43 de la UE relativa a la Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestre (P. estricta= de protección estricta según anexo IV). **Dir. Aves**= Directiva 79/409/CE y Directiva 91/294/CE referente a la Conservación de las Aves Silvestres. **CNEA**= Real Decreto 439/90, en el que se establece el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas: II = De Interés Especial. **UICNand**= Categoría UICN para Andalucía.

SOLUCIONES PREVIAS

El peligro que implica el progreso de la cuña de la muralla de La Alhambra ha sido previsto desde hace mucho, y desde 1520, las siguientes soluciones han sido propuestas y en algunos casos ejecutadas:

a) Terraplenes o muros en el pie del Tajo previstos para protegerlos de las crecidas del río.
b) Prohibición de riego del bosque de La Alhambra
c) Desvío del río. Una de las propuestas que consideraba esta posibilidad implicaba la excavación de desmontes muy elevados y largos túneles.
d) Un muro de tierra armada, de 9,2 m de altura, y una malla de triple torsión, en los 30 m superiores, para favorecer el crecimiento de vegetación autóctona: plantas colgantes o trepadoras según la pendiente.
e) Un muro ecológico combinado con drenes californianos, un cosido de la ladera, micropilotes de refuerzo y tratamiento acrílico de la superficie del talud para evitar la erosión.
f) Inyección a través de una serie de tubos de acero sub-paralelos a la superficie del talud, y además regulación del río.

CRÍTICA A LAS SOLUCIONES PREVIAS

La solución adoptada debería tener un impacto ambiental mínimo, lo que implica una intervención y costes mínimos. Se va a ir pasando revista a las soluciones previas utilizando las mismas letras del párrafo anterior.

a) No es necesario ni conveniente construir nuevos terraplenes (además del pedraplén del pie) o muros en el pie porque el problema de las riadas no es importante ahora y en cualquier caso debería ser resuelto mediante la regulación del río Darro aguas arriba.
b) Si el bosque de La Alhambra no se regase su vegetación se marchitaría.
c) El impacto de la desviación del río Darro sería inaceptable ya que es un componente fundamental del paisaje urbano en un punto tan bello como la Carrera del Darro. El mismo argumento puede ser aplicado respecto a las obras faraónicas que acompañan a esta propuesta.
d) y e) La apertura de una malla de triple torsión es demasiado pequeña y el impacto desde las calles vecinas no es desdeñable. El impacto de la tierra armada o de muros ecológicos es también importante ya que cambia drásticamente el escenario actual. Los drenes californianos necesitarían tuberías para recoger las aguas cuyo impacto no sería despreciable. El tratamiento acrílico requeriría la demolición de las porciones sueltas del talud y su aspecto no sería atractivo.
f) La inyección del conglomerado no está garantizado, ya que el coeficiente medio de permeabilidad es $2x10^{-7}$ m/s. Más bien, introduciría presión en planos paralelos a la ladera lo que podría producir las caídas de lajas del talud.

EL USO DE MALLAS DE ALAMBRE EN LA PROTECCIÓN DE LADERAS

Recientemente, mallas de alambre ancladas han sido empleadas para proteger laderas (Geobrug, 1999; Muñoz y Torres Vila, 2000; Torres Vila, 1999 & 2000). Es un método barato y quizás el único posible para taludes altos y empinados. Hay principalmente dos tipos:

1. Redes de cables (Fig. 7).

Tienen los siguientes elementos:

a) Una malla de triple torsión con una abertura de 8x10/15 mm y un alambre de grosor superior a 2 mm. Su misión es cerrar los espacios entre los cables de la red.
b) Una red de cables de acero de alta resistencia (1770 MPa) con aberturas de 150 a 300 mm y espesor 8 mm. Esta red aplica la presión al terreno.
c) Cables de acero de 16 a 24 mm de espesor y de 2 a 4 m de separación, que aplican una presión de 10 a 20 kPa a la red de cables, a través de anclajes postensados en las intersecciones.
d) Anclajes internos y perimetrales postensados entre 100 y 500 kN.

Esta solución sería posible, pero la malla de acero de triple torsión es difícil de integrar con la vegetación del Tajo.

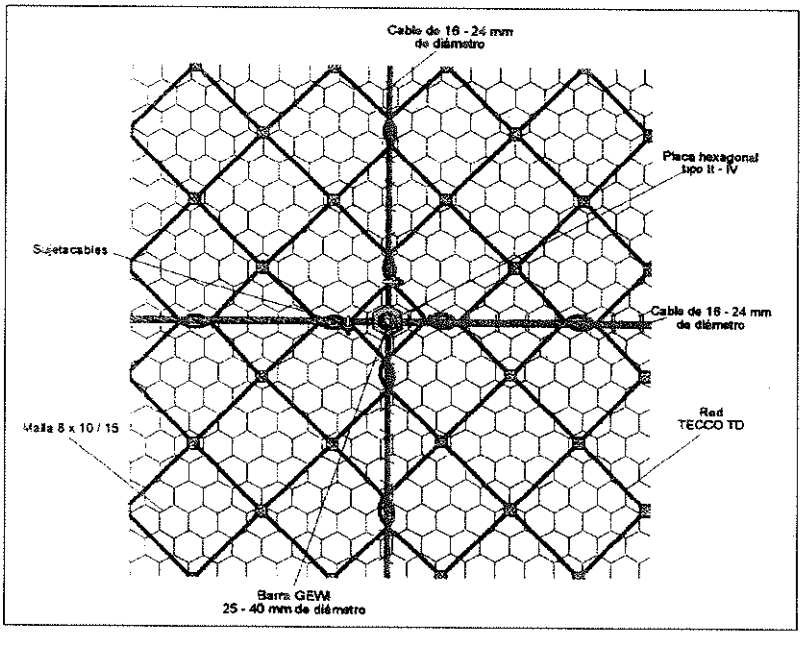


Figura 7. Red de cables.

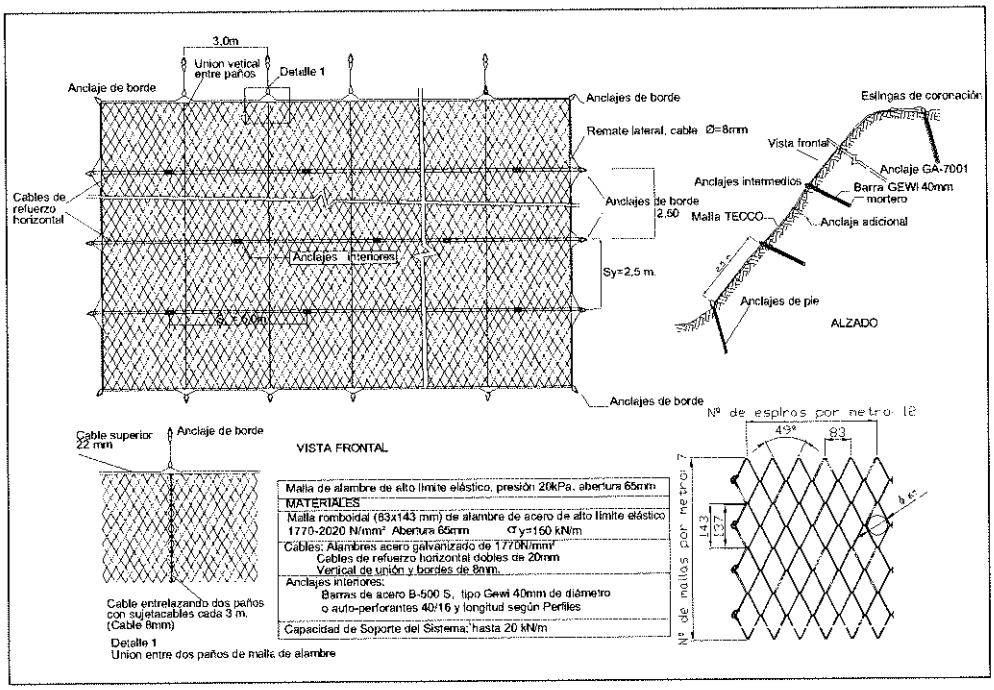


Figura 8. Malla de alambre de alto límite elástico.

2. Mallas de alambre de alto límite elástico (Fig. 8)

Es una malla romboidal, con alto límite elástico entre 1770 y 2020 MPa y un grosor de alambre entre 3 y 4 mm, colocada directamente sobre el talud con una abertura de 65 mm. La presión sobre la superficie del talud (10 a 30 KPa) es aplicada por anclajes postensados aislados o reforzados por cables. Los anclajes pueden ser barras GEWI de espesor entre 25 y 40 mm. En el perímetro de la zona tratada se colocan cables anclados de 20 a 24 mm de espesor.

La abertura de malla, de 65 mm, es suficientemente pequeña para evitar la erosión del conglomerado y para mantener un impacto visual aceptable, especialmente si la vegetación actual se mantiene y se añaden nuevas plantas autóctonas.

Debe tenerse en cuenta que la calle está a 40 m y que la iglesia de San Pedro y San Pablo está en la línea de visión (Fig. 1 y 4). Debido a todo esto, ésta fue la solución adoptada.

ESTABILIDAD DE TALUDES (Fig. 9)

Los parámetros de resistencia adoptados para el conglomerado son:

c = 18-75 kPa ϕ = 45-50°

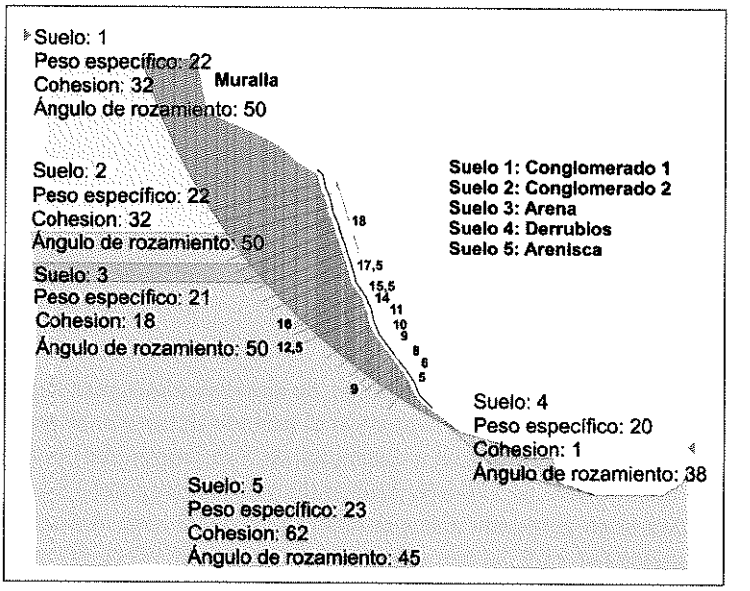


Figura 9. Superficie de deslizamiento crítica bajo condiciones dinámicas. La línea de deslizamiento penetra bajo los muros de La Alhambra.

Se utilizó en los cálculos el programa Geo-Slope, y el método de Morgenstein y Price, con diferentes presiones de malla aplicados a la superficie del talud. Los coeficientes de seguridad estáticos y dinámicos calculados están incluidos en la Tabla 4.

Se han considerado tres disposiciones de la malla:

a) Tal y como se indica en la Figura 9.
b) Eliminando la parte inferior de la malla
c) Extendiendo la malla a la parte superior de los derrubios.

Tabla 4. Coeficientes de seguridad estáticos y dinámicos.

Presión sobre el talud (kPa)	F			
	Estático			Dinámico
	a	b	c	
0	1,13			0,73
10	1,31	1,28	1,31	
15	1,37	1,33	1,38	
20	1,43	1,38	1,44	0,93 (1) 1,00 (2)
25	1,48	1,42	1,50	
30	1,53	1,47	1,52	

(1) c = 32 kPa en la capa superior (2) c = 75 kPa en la capa superior

El incremento de los coeficientes de seguridad estáticos para presiones de malla superiores a 20 kPa es pequeño. Las soluciones b y c fueron rechazadas a causa de que la parte inferior del conglomerado necesita protección contra la erosión, pero no el pedraplén. Se utilizó en los cálculos dinámicos una aceleración de 0,28 g, correspondiente a un período de vida de la estructura de 100 años. La Figura 9 muestra la superficie de deslizamiento crítico bajo condiciones dinámicas para una presión de 20 kPa sobre el talud. Puede observarse como esta superficie crítica penetra dentro de la muralla de La Alhambra.

CÁLCULO DE LA MALLA

La malla, de 3 mm de espesor, ha sido calculada para soportar la presión de trabajo de 20 kPa sobre el talud siguiendo el método desarrollado por Torres Vila et al. (2001). Los anclajes se colocarán a distancias de 5 m (horizontal) por 2,5 m (vertical). La carga por anclaje será de 250 kN. Aplicando una precarga del 15% (37,5 kN) el máximo desplazamiento perpendicular a la ladera será de 73 mm. Así que para tener un coeficiente de seguridad 1,67, se han seleccionado barras GEWI de 40 mm para los anclajes. Suponiendo una resistencia por fuste de 1 MPa la longitud del bulbo de anclaje es de 3,1 m. El coeficiente de seguridad real de la malla, anclaje y bulbo de anclaje es de 2,5.

El bulbo de anclaje debería estar situado detrás de la superficie de deslizamiento (Fig. 9). De esta forma, la fila superior de anclajes debería tener 25 m y la octava 19 m. Debido a la dificultad de construir anclajes de estas longitudes, la licitación permite longitudes no superiores a 18 m, aunque las propuestas que ofrezcan longitudes de anclaje mayores serán consideradas positivamente.

CUENCAS VISUALES

El análisis de cuencas visuales de la actuación se ha realizado identificando los puntos desde los que es visible la actuación. La intervención no es visible desde la propia colina de La Alhambra, y sólo se visualiza desde las colinas opuestas del Albaicín y del Sacromonte, ámbitos desde los cuales se ha realizado el estudio.

Se han definido los campos de visibilidad en función de la distancia de un posible observador a la actuación y, a continuación, se han realizado recorridos de campo para verificar dicha visibilidad desde los mismos. Con este método se han definido cuatro radios de visibilidad:

- Inmediata: para observadores situados a un radio inferior a 100m: Carrera del Darro-Paseo de los Tristes (Fig. 10)
- Cercana: para observadores situados a una distancia superior a 100, e inferior a 300 m. Colina del Albaicín, desde el eje de la calle San Juan de los Reyes.
- Lejana: observadores situados a una distancia comprendida entre 300 y 600 m de la actuación: ejes del Aljibe de Trillo y Carril de las Tomasas, y Mirador de San Nicolás (Fig. 11).

Figura 10. El Tajo revegetado, visto desde la Iglesia de San Pedro.

Figura 11. El Tajo revegetado, visto desde el mirador de San Nicolás.

— Remota: observadores situados a una distancia superior a los 600 m: Camino del Sacromonte y parte alta del Albaicín.

DISCUSIÓN

El Tajo de San Pedro es un diedro de 65,5 m de altura, que ha progresado hasta situarse a 23,8 m de la muralla-palacio de La Alhambra que es patrimonio de la Humanidad. Los desprendimientos de tierras y los desplazamientos de algunas fallas normales han destruido ya una parte importante de la valla cristiana, construida en 1526.

Una profunda investigación de la tectónica, y la observación de las medidas topográficas tomadas durante varios años, han demostrado que las fallas activas normales que rodean el Tajo han creado un régimen tectónico de extensión que afloja el terreno y

activa su caída. Una falla principal coincide con una de las caras del diedro. La erosión es también una causa importante del deterioro del Tajo. El coeficiente de seguridad del Tajo sometido a un terremoto para una vida de la estructura de 100 años es 0,73. La solución para la preservación propuesta es una malla de alambre de alto límite elástico, postensada con anclajes, y vegetación autóctona. Con este refuerzo, el coeficiente de seguridad bajo el terremoto de proyecto se eleva a un valor en torno a 1,00.

Desde el punto de vista ecológico, el tajo de San Pedro constituye un área fuertemente intervenida por el hombre desde hace siglos, lo que ha modificado sensiblemente la composición y estructura del ecosistema.

En la actualidad los hábitats que se desarrollan en la zona son un mosaico de formaciones vegetales de origen antrópico junto con vegetación silvestre, si bien esta última está muy modificada y goza de una mínima representación espacial en relación al conjunto.

En relación con la flora protegida, únicamente puede señalarse la presencia del almez (Celtis australis), que es considerada por la legislación andaluza como "especie de interés especial". Su presencia en la zona está bastante extendida, en tanto y en cuanto ha sido un árbol plantado por el hombre como especie de jardinería y para uso de su madera en herramientas, y por el hecho de que es un taxon que se reproduce bien de manera natural y que se adapta perfectamente a taludes y roquedos próximos a cursos de agua.

Fuera de las especies mencionadas con anterioridad, no se han detectado otros táxones que puedan presentar un mínimo de interés para su conservación por tratarse de elementos con una clara amenaza o bien por ser especies de distribución muy rara o de carácter relicto.

En cuanto a la vegetación, debe señalarse que, de las distintas comunidades detectadas en la zona de estudio, sólo 7 presentan interés para su conservación en relación con la Directiva Hábitats, de las cuales 6 son de interés general y 1 de interés prioritario. De estas comunidades el proyecto puede alterar ligeramente a 3 de interés general (saucedas, alamedas y comunidad rupícola) y a la de interés prioritario (comunidad de rezume), debiendo calificarse los impactos como compatibles, ya que no se elimina superficie alguna de terreno y únicamente cabría esperar ligeros daños a algún pie de árbol de pequeño tamaño (si estorba al avance de los trabajos) o si se produce algún golpe al tronco en caso de accidente.

En general, estas alteraciones sobre el medio natural se valoran como compatibles, no existiendo ningún caso de afección moderada o severa. Con todo, y dada la sensibilidad del área por su alta frecuentación turística y por su proximidad al Conjunto Histórico de La Alhambra se han formulado medidas correctoras específicas para evitar al máximo las afecciones a la vegetación y se ha planteado un proyecto de restauración que permita, no sólo eliminar los impactos, sino incrementar el desarrollo vegetal actual utilizando las especies propias del lugar.

En cuanto a la fauna, no existen especies que puedan ser alteradas de manera significativa por el proyecto, a excepción de molestias por el ruido de la maquinaria durante la fase de obras, hecho que por otra parte no supone una afección importante por tratarse de especies antropófilas adaptadas al entorno urbano, incluido el murciélago común, que es la única especie con un mayor grado de protección detectada en la zona.

La presencia de la malla, una vez finalizadas las obras, corrige lógicamente los procesos erosivos que tienen lugar en el talud. La estructura no incide sobre el drenaje natural del escarpe, no genera residuos o sustancias que puedan causar efectos negativos en el medio ambiente y favorece el desarrollo de la vegetación, actuando como soporte de las especies que colonicen de forma espontánea o forzada. Ello redundará de forma positiva en el desarrollo de los biotopos presentes.

La afección más notable al medio ambiente como consecuencia de la instalación de la red viene presidida por la alteración de los valores estético-culturales del entorno. Este efecto es además permanente e irreversible.

En relación a la magnitud del impacto de la actuación, si consideramos como marco general de la actuación el conjunto del paseo de los Tristes – Carrera del Darro, a lo largo del desfiladero del río, la intervención se limita a un pequeño tramo del mismo, sobre una superficie relativamente pequeña, en torno a los 5.400 m². En lo que se refiere a la fragilidad del medio, y sus posibilidades de absorber la actuación, los distintos elementos de la estructura, cuya composición da lugar a la malla observada, permiten un tratamiento cromado adaptado a las tonalidades del tajo, favoreciendo su integración, a diferencia de las mallas convencionales de acero galvanizado, que son claramente apreciables debido a la reflexión de la luz solar sobre el acero. También se trata de elementos de escasa envergadura cuya distinción a distancias medias es casi imposible (el grosor de la malla es de 3 mm). Otra cuestión importante es el hecho de que al tratarse de un material flexible, de alto límite elástico, permite su mayor adhesión al perfil original del terreno, que no se ve, en absoluto, modificado. Ello facilita su enmascaramiento. Por último, la estructura instalada constituye un excelente soporte para facilitar la colonización y desarrollo de la vegetación en el talud, tanto de forma espontánea, como forzada mediante hidrosiembras y plantaciones.

Las imágenes aportadas por la visualización del proyecto revelan que una vez finalizada la obra, la malla es claramente visible desde la iglesia de San Pedro, y en consecuencia desde todo el eje de la Carrera del Darro y el Paseo de los Tristes, si bien es cierto que, del conjunto de elementos que componen la estructura, se distinguen claramente los bulones de anclaje y los cables de unión internos y laterales (de sección 8 mm), siendo casi inapreciable la malla romboidal (sección 3 mm). La apariencia del tajo desde el mirador de San Nicolás permite únicamente distinguir los bulones de anclaje y el cableado lateral de la red.

Una vez restaurada la vegetación, la estructura puede pasar prácticamente desapercibida desde ambas perspectivas, en particular la segunda (Fig. 10 y 11).

En estas circunstancias el impacto del proyecto en relación con los valores estéticos y culturales que encierra el Tajo de San Pedro puede valorarse como moderado, pudiéndose afirmar que es posible la recuperación de las condiciones del medio, ya que al no modificarse la geometría y morfología del escarpe, con el paso del tiempo, la malla puede llegar a pasar inadvertida. Para ello se precisa no obstante, la adecuación de medidas protectoras o correctoras, bien planificadas y correctamente ejecutadas, así como un período de tiempo que, si bien no puede ser precisado con exactitud, es posible que supere los 3 años. Por otra parte, será necesaria una presentación del proyecto en la sociedad granadina, en la que se expongan claramente las razones y necesidad del proyecto, así como del proceso seguido para la selección de la solución adecuada.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias a la ayuda facilitada por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto BIA 2004-01302.

BIBLIOGRAFÍA

De Miguel et al. (1989). Spatial and energy trains of the microearthquakes activity in the Central Betics. *Geodinámica. Acta*, 3: 87-94.

Geobrugg (1999). Sistema Pentifix para la estabilización de taludes y laderas en rocas y suelos. *Jornada Técnica Soluciones Flexibles en el Tratamiento de Taludes, Granada.*

Muñoz, B., y Torres Vila, J.A. (2000). Sistema de soportes flexibles en la estabilización de taludes y control de la erosión. Experiencias de aplicación en Andalucía. *Segundo Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz*: 1349-1362.

Tercedor, M. (1951). La tectónica de la depresión de granadina en relación con su elevada sismicidad. *Estudios Geológicos*, 7: 29-70.

Torres Vila, J.A. (1999). Cálculo y diseño de sostenimientos mediante red de cables anclada. Sistema Pentifix. *Jornada Técnica Soluciones Flexibles en el Tratamiento de Taludes, Granada.*

Torres Vila, J.A. (2000). Control de la erosión y estabilización superficial de taludes. Sistema BBM. *Segundo Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz*, 2: 1363-1370.

Torres Vila, et al. (2001). Validación de los modelos físicos de análisis y diseño para el empleo de membranas flexibles Tecco G-65, como elemento de soporte superficial en la estabilidad de taludes. *IV Simposio Taludes y Laderas Inestables*: 1107-1118.

CAPÍTULO 6

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES Y GEOTÉCNICOS DE LA BALSA DE D. MELENDO EN LEBRIJA. UTILIZACIÓN DE GEOTEXTILES EN GEOTECNIA MEDIOAMBIENTAL

José Luis de Justo Alpañés*
Profesor Emérito, Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias

Juan Saura Martínez*
Director Técnico. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Percy Durand*
Profesor Titular

Manuel Vázquez Boza*
Becario del Plan de Formación de Profesorado

Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla
E.T.S. Arquitectura, Av. Reina Mercedes 2- 41.012 Sevilla. jlj@us.es

Elisa Silva
Profesora, Universidad del Algarve

Juan Carlos de Cea Azañedo
DGOHCA

José Manuel Marcos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Resumen:

El tramo final del Canal de Bajo Guadalquivir incluye una balsa de control de riego, cerrada por cuatro diques homogéneos, tres de los cuales están situados en una zona pantanosa. La Figura 2 muestra el diseño final que incorpora los siguientes elementos: un geotextil con una rigidez de 8.333 kPa en la base, drenes de banda y un manto de arena sobre ellos, un dren-chimenea y amplias bermas. Durante 2.500 días se han tomado medidas mediante hitos topográficos, placas de asiento, piezómetros e inclinómetros colocados en los terraplenes y en el terreno de cimentación. Varios modelos de materiales (ecuaciones constitutivas) se han utilizado para interpretar los desplazamientos medidos y las presiones intersticiales. Se han tomado medidas medioambientales para convertir la balsa en una zona húmeda con amplia biodiversidad y estabilidad ecológica.

Abstract:

The final stretch of the Low Guadalquivir Canal includes an irrigation control pond, closed by four homogeneous embankments, three of which are placed on marshland. Figure 2 shows the final design that incorporates the following elements: a geotextile with a stiffness of 8333 kPa at the base, band shaped drains and upper sand blankets, a chimney drain and widened berms. During 2500 days measurements have been taken at topographical stakes, settlement plates, piezometers and inclinometers placed within and below the embankments. Several material models have been employed to interpret the measured displacements and pore pressures. Environmental measures have been taken to transform the pond in a wet area with high biodiversity and ecological stability.

INTRODUCCIÓN

El proyecto del tramo final del Canal del bajo Guadalquivir incluye una balsa de regulación de regadío con una capacidad de 7,91 Hm3, cerrada por cuatro diques con una altura inicial sobre cimientos de 11,2, 6,2, 9,0 y 5,0 m. respectivamente. El objetivo es asegurar el riego de 14.600 Ha, proporcionando flexibilidad frente a la demanda, 148 km después de su toma en la Presa de Peñaflor, y permitiendo garantizar cultivos modernos con cultivos adaptados a la demanda. La obra se ha integrado en el medio ambiente, convirtiéndose en un rico humedal que proporciona biodiversidad y estabilidad ecológica al entorno, donde se desarrollan especies autóctonas (fig. 1), permitiendo la anidación e hibernación de aves. Para colaborar en este objetivo se plantarán especies autóctonas en las márgenes y se instalarán islas flotantes para las cigüeñas. La balsa se localiza al sur de la provincia de Sevilla, cerca de otros humedales como el Parque de Doñana.

ANTECEDENTES

A finales de los años ochenta a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir se le plantean dos grandes retos en la gestión de la demanda de riegos. El primero de ellos

Figura 1. Vista de la balsa mostrando flamencos y otras especies de aves.

es el ahorro de agua, de gran importancia en una cuenca deficitaria, y el segundo dotar a los agricultores de los elementos necesarios para desarrollar un regadío moderno y competitivo. A ambos responde la Balsa de D. Melendo en Lebrija.

En lo referente al primer objetivo, la Balsa es un elemento muy importante de un plan mucho más ambicioso que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha elaborado para los riegos que se alimentan del Canal del Bajo Guadalquivir (100.000 Ha). Hasta la fecha, el Canal, con una longitud de 148 km, es como un río paralelo al Guadalquivir con mayor cota, derivándose el agua en la presa de Peñaflor y con desagües para reintegrar al río los caudales sobrantes. El sistema adolece de una gran rigidez, no permitiendo al explotador satisfacer las demandas puntuales de los agricultores, principalmente, por dos razones. La primera, por la gran distancia que existe entre los recursos y la demanda, sin regulaciones intermedias, y la segunda por el diseño de la infraestructura, concebida para transportar grandes caudales. Las obras previstas que, sin duda, supondrán un importante ahorro de agua son básicamente: tableado del canal, balsas de regulación y control automático del mismo. La balsa de Lebrija como punto final del canal, además de la regulación que aporta a la cuenca durante la campaña de riego, permitirá recoger y almacenar los sobrantes del mismo, ajustando la dotación de parcelas a las necesidades reales a los agricultores.

Fijándonos en el segundo objetivo, la agricultura de zonas regables, como el B-XII, han sufrido, en los últimos años, una importante transformación. El regante no se limita, como hace años a las campañas de riego, el agricultor busca adaptarse al mercado tanto en el producto como en el tiempo, creando incluso, como es el caso de Lebrija, sus

propias industrias de transformación. Esta visión moderna de la agricultura exige poder generar productos de gran calidad y con enorme garantía en la producción. Es decir, debe dedicarse el agua en la cantidad y en el momento en que el producto lo exige, no admitiendo el mercado situaciones desabastecimiento. Con la construcción de esta Balsa, la Confederación facilita a la Comunidad de Regantes del B-XII poder competir con otras zonas, al asegurar una dotación mínima y regular los recursos para su correcta aplicación.

DISEÑO DE LOS DIQUES

Para la construcción de la balsa se ha aprovechado una depresión natural de escasa altura y gran superficie, que permite almacenar casi 8 Hm^3 de agua mediante el cierre en cuatro puntos con diques de materiales sueltos de planta recta.

Los Diques nº 1, 2 y 3 están situados en terreno de marisma. El encauzamiento de un arroyo de 2.727 m proporcionó una parte de los materiales para la construcción del terraplén. La figura 2 muestra el proyecto final del dique nº 1.

Los cuatro diques son homogéneos y fueron inicial-mente diseñados con un dren horizontal aguas abajo y con los taludes indicados en la Figura 2, pero con bermas de 2,5 m de anchura. Los diques fueron cimentados a una profundidad de 1 m, y en la zona del dentellón a 3m (2,5 m en el dique nº 4). Los cálculos preliminares de estabilidad fueron realizados basándose en la resistencia a compresión simple (v. ecuación 4) y suponiendo que los diques podrían agrietarse debido a las diferencias de rigideces entre el terraplén compactado y el suelo de marisma de la cimentación (v. Nakase, 1970). Los resultados (Justo et al, 2000) indicaron que los coeficientes de seguridad obtenidos eran inadmisibles en la parte central del dique nº 1 (F=0,29). Los cálculos de estabilidad se repitieron utilizando como parámetro la resistencia al esfuerzo cortante obtenida de ensayos de corte consolidados-sin drenaje bajo la presión normal efectiva del terreno. En ese caso se obtuvo un coeficiente de seguridad de 1,55. Dado que los parámetros obtenidos de este ensayo dejan del lado de la inseguridad debido a la pérdida de humedad del suelo durante la recompresión a la que se ve sometido en la fase de consolidación, el factor de seguridad obtenido no se consideró suficiente. Por ello se decidió realizar una nueva campaña de ensayos en el terreno.

NUEVO ESTUDIO DEL TERRENO

En la nueva campaña se realizaron ensayos con piezoconos, sonda de molinete y dilatómetro de Marchetti., y se extrajeron excelentes muestras inalteradas del terreno mediante tomamuestras de pistón, que entre otras cosas proporcionaron la resistencia a esfuerzo cortante sin drenaje, el coeficiente de consolidación para flujo horizontal y los parámetros efectivos. La figura 2 muestra la ubicación de los ensayos in situ correspondientes a la sección transversal central del dique nº 1 y la resistencia al corte sin drenaje obtenida.

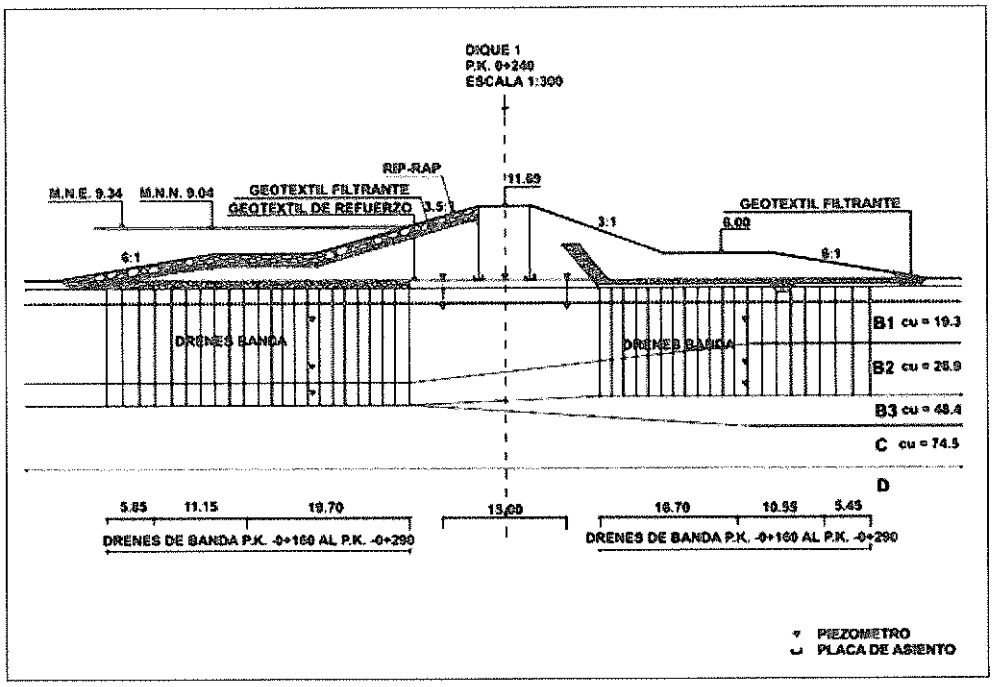


Figura 2. Sección transversal final del dique nº 1.

PERFIL DEL TERRENO

De arriba a abajo aparecen los siguientes tipos de suelo:

A: Tierra vegetal

B': Arcillas y limos con materia orgánica, de alto límite líquido, ligeramente sobreconsolidados.

B: Arcillas y limos con materia orgánica, de alto límite líquido, verde-azulados, de consistencia muy blanda a media. Dentro de la capa B se distinguen en la Figura 2 tres capas B1, B2 y B3, de resistencias crecientes.

C: Arcilla de alto límite liquido, amarillenta, de consistencia media a muy firme.

D: Arcilla margosa verdosa, de consistencia muy firme a dura.

La figura 3 muestra un perfil geotécnico longitudinal del dique nº 1. Los valores medios de los parámetros se recogen en la Tabla 1.

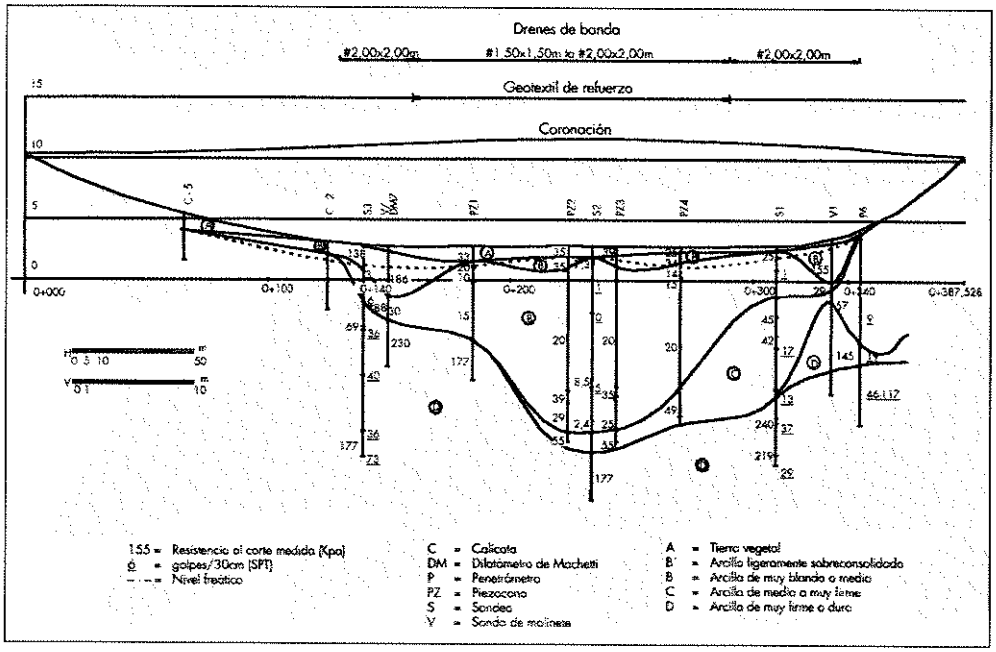


Figura 3. Perfil geotécnico longitudinal del dique nº 1.

Tabla 1. Parámetros de cálculo en los diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Corte directo				Triaxial		q_u kPa	T 80 µ %	w_L	I_P	I_L	N	N_B	ρ_d kg/m³	γ kN/m³	USCS
	c' kPa	ϕ'	c_{cu} kPa	ϕ_{cu}	c' kPa	ϕ'										
B'							196	86,0	75,3	40,7	0,04	9		1290	17,4	CH MH OH
B	12	16,1°	13	15,4°	5.4	23,8°	41	96,1	71,1	38,6	0,61	4	4	1100	16,6	CH MH
C			8,8	26,7°			84	90,5	66,2	45,5	0,47	15	12	1180	16,5	CH
D	41	18,1°	102	17,9°			21	91,9	65,2	27,7	-0,19	40	>38	1420	18,3	MH
D Encauza-miento del arroyo	23	14,7°	8,8	9,4°			10.2	97,7	60,3	29,7	-0,00			1440	18,3	CH

CÁLCULOS Y MODELOS DE MATERIALES

Para los cálculos se han utilizado el programa de elementos finitos Plaxis y el método de las superficies de deslizamiento. En el Plaxis se han utilizado los siguientes modelos de materiales:

1. Mohr-Coulomb: modelo elasto-plástico de plasticidad perfecta no asociada para tener en cuenta el fenómeno de la dilatancia. Se han utilizado tres variedades de este modelo para el análisis sin drenaje, dependiendo del uso de presiones efectivas o totales, y de parámetros con o sin drenaje:
   a) Presiones efectivas y parámetros con drenaje. El material se simula sin drenaje.
   b) Presiones efectivas y parámetros sin drenaje. El material se simula sin drenaje.
   c) Presiones totales y parámetros sin drenaje. El material se simula con drenaje.
2. Mohr-Coulomb: modelo elasto-plástico de plasticidad perfecta no asociada para tener en cuenta el fenómeno de la dilatancia. Se han utilizado tres variedades de este modelo para el análisis sin drenaje, dependiendo del uso de presiones efectivas o totales, y de parámetros con o sin drenaje:
   a) Presiones efectivas y parámetros con drenaje. El material se simula sin drenaje.
   b) Presiones efectivas y parámetros sin drenaje. El material se simula sin drenaje.
   c) Presiones totales y parámetros sin drenaje. El material se simula con drenaje.
3. Soft Soil: similar al modelo cam-clay, utilizando presiones efectivas y parámetros con drenaje.
4. Soft Soil Creep: similar al Soft Soil pero teniendo en cuenta la influencia del tiempo.

En los modelos la, 2 y 3, los cálculos se han realizado con parámetros con drenaje y con las propiedades de los materiales sin drenaje. Las presiones intersticiales en exceso se obtienen suponiendo un coeficiente de Poisson sin drenaje de 0,495 en suelos saturados para evitar errores de tipo numérico en el programa de cálculo. La siguiente ecuación relaciona el módulo volumétrico del agua K_w, con la porosidad del suelo, n, y el módulo de rigidez del suelo K.

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3\,(\nu_u - \nu)}{(1-2\nu_u)\,(1+\nu)} K = 300 \frac{0{,}495-\nu}{1+\nu} K > 30\,K \qquad (1)$$

Para obtener con el programa Plaxis resultados más acordes con los medidos, Kw debe tener un valor elevado en comparación con K. Si $\nu < 0{,}35$, entonces $K_w/n > 30$.

El incremento de la presión intersticial en exceso, Δu_e, se determina a partir del incremento de deformación volumétrica, $\Delta\varepsilon_v$, de acuerdo con:

$$\Delta u_e = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \tag{2}$$

En el modelo 1c se utilizan presiones totales y parámetros sin drenaje para los cálculos. La generación de presiones intersticiales hidrostática y en exceso se impide anulando el peso específico del agua y estableciendo que el comportamiento del material sea con drenaje.

PARÁMETROS PARA LOS CÁLCULOS SIN DRENAJE

La resistencia por punta del piezocono fue corregida de acuerdo con Baligh et al. (1981) y Campanella et al. (1982). La resistencia al corte sin drenaje fue calculada de acuerdo con la ecuación:

$$c_u=(q_c-\sigma_v)/16 \tag{3}$$

donde q_c es la resistencia por punta del piezocono y σ_u la presión vertical total en el nivel de la punta.

Las Figuras 2 y 3 muestran los valores medios de la resistencia al corte sin drenaje obtenidos mediante diferentes procedimientos bajo el eje del dique nº 1.

Muchos autores indican que el coeficiente de seguridad en deslizamientos a corto plazo cuando la resistencia sin drenaje se obtiene a partir de ensayos con la sonda de molinete puede estar por encima de 1, y que el coeficiente de seguridad calculado aumenta con el índice de plasticidad (Jiménez Salas et al, 1981; Lade, 2001). Así que la resistencia obtenida en el ensayo del molinete se dividió por un coeficiente mayor que uno, que aumenta con el índice de plasticidad.

Los valores de la resistencia al corte sin drenaje obtenidos con los piezoconos (PZ), sondas de molinete (V & SI) y dilatómetro de Marchetti son bastante similares y mayores que los obtenidos a partir del ensayo de compresión simple, en sondeos (S), utilizando la conocida ecuación:

$$c_u=q_u/2 \tag{4}$$

El valor medio del coeficiente de consolidación para flujo horizontal ($1{,}1\times10^{-7}$ m2/s) obtenido con los piezoconos es solamente 3,7 veces mayor que el correspondiente valor para flujo vertical obtenido en los ensayos edométricos.

Los valores de la relación c_u/σ'_0 obtenidos con los piezoconos se han comparado con los valores sugeridos por Hansbo (1957):

$$c_u/\sigma'_0=0{,}45\times w_L/100 \tag{5}$$

La razón de sobreconsolidación (*OCR*) ha sido obtenida de la siguiente relación:

$$OCR = \frac{c_u/\sigma'_0 \ (piezocomo)}{c_u/\sigma'_0 \ (Hansbo)}$$

De este modo se determinó que el suelo tipo B tiene un *OCR* = 1,2 por encima de 5,25 m. de profundidad y por debajo es normalmente consolidado. El suelo tipo C tiene una razón de sobreconsolidación de 1,3.

Recientemente se ha introducido en los cálculos el modelo Soft-Soil-Creep, pero todavía no se han alcanzado con resultados finales. Para el resto de modelos utilizados, se considera que el modelo Soft Soil es el más indicado para el cálculo de asientos. En el modelo Mohr-Coulomb, el módulo de elasticidad se ha obtenido de la conocida relación $E=\alpha c_u$. Con el fin de obtener asientos sin drenaje similares, se asignaron los siguientes valores al coeficiente α:

α =75 para el modelo la
α =170 para el modelo Ib
α =135 para el modelo lc

Por otra parte, las presiones intersticiales obtenidas con los modelos Mohr-Coulomb la y 1b y las obtenidas en el modelo Soft- Soil son similares.

Los cálculos se han realizado en presiones totales, introduciendo el coeficiente de Poisson sin drenaje ν_u y el módulo de elasticidad sin drenaje $E_u = E\,(1+\nu_u)/(1+\nu)$, en todos los modelos excepto en el lc. Para ν=0,35, E_u= 1,107E.

Se han utilizado los siguientes módulos en los cálculos:

E_u= 80 c_u para el modelo la
E_u= 190 c_u para el modelo 1b
E_u= 145 c_u para el modelo lc

COEFICIENTES DE SEGURIDAD Y MODIFICACIONES EN LOS DIQUES

El coeficiente de seguridad (*F*) en los cálculos por elementos finitos se obtiene reduciendo los parámetros de resistencia mediante un coeficiente hasta el momento en el que este valor alcanza un máximo que no puede sobrepasar. Por otra parte, el método de la superficie de deslizamiento da un límite superior para el *F* (v. Jiménez Salas et al., 1981). En este caso el coeficiente de seguridad a corto plazo obtenido utilizando el modelo la es algo inferior que utilizando el método de Bishop modificado.

El coeficiente de seguridad a largo plazo calculado fue 2,03, pero para alcanzar un valor del coeficiente de seguridad a corto plazo adecuado se introdujeron las siguientes modificaciones en los diques (v. Fig. 2 y 3):

— En la base del terraplén del dique n°l se colocó un geotextil con una rigidez de 8.333kN/m y una resistencia a tracción de 1.000 kN/m.

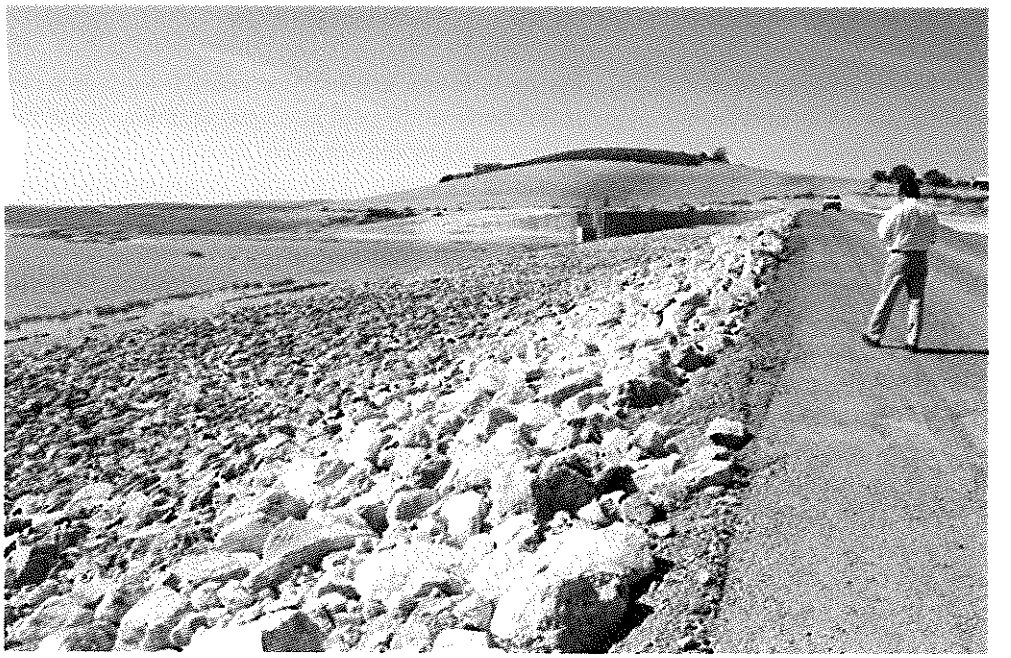


Figura 4. Dique nº 1 casi terminado.

- En los diques n°l y nº 3 se introdujeron drenes debanda espaciados de 1,5 a 2 m, y una capa de arena en la parte superior.
- El dren horizontal aguas abajo fue transformado en un dren chimenea.
- La anchura de las bermas se amplió hasta 12,50 m.
- En los cuatro diques se colocaron hitos topográficos, placas de asiento, piezómetros e inclinómetros.
- Debido a los grandes asientos previstos, la máxima altura sobre cimentación fue aumentada, hasta 11,9, 7,2 y 9,2 m. para los diques nº 1, 2 y 3 respectivamente.

Las presiones obtenidas en el geotextil con los modelos Mohr-Coulomb y Soft- Soil no fueron muy distintas. El coeficiente de seguridad obtenido en los modelos Ib y lc es similar.

La construcción se ha llevado a cabo durante un periodo de un año (Fig. 4). Al final de la misma, las medidas de presión intersticial indicaron una valor medio del grado de consolidación de 63% en la zona de los drenes de banda, y de 30% en la zona central del dique sin drenes de banda. Actualmente, el agua ha alcanzado un nivel de 8m.

INTEGRACIÓN MEDIOAMBIENTAL

Desde el inicio de la construcción de la Balsa, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir vio en ella un gran potencial medioambiental, tanto por su ubicación como por su tipología. La posibilidad de integrar en el medio ambiente la obra, construyendo un rico humedal (Fig. 1), fue desde el primer momento un fin casi tan importante como el enorme beneficio que reporta. Con estas miras está actualmente desarrollando un conjunto de actuaciones encaminadas a conseguir los siguientes objetivos:

1. Generación de un espacio naturalizado que proporcione biodiversidad y estabilidad ecológica en el entorno de la Balsa y constituido por especies autóctonas a su área.
2. Convertir a la Balsa en la referencia natural de su entorno inmediato.
3. Creación de un hábitat de área húmeda que complemente a los importantes humedales limítrofes: Parque nacional de Doñana y los complejos endorreicos de Lebrija-Las Cabezas y Espera.
4. Permitir la nidificación e invernada de las aves, así como refugio y lugares de campeo para los mamíferos.
5. Establecer un tapiz vegetal que requiera un bajo nivel de intervención humana para su mantenimiento y persistencia.
6. Cumplimiento de los condicionantes ambientales de la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto de construcción de la Balsa (B.O.E. nº 255 de 20 de septiembre de 1995).

Para la consecución de estos objetivos ya están en fase muy adelantada las siguientes actuaciones:

1. Revegetación del margen de la Balsa para la regeneración de un ambiente hidrófilo que permita el refugio y nidificación de avifauna ligada al medio acuático.
2. Plantación de especies arbóreas autóctonas y diversificación con boquetes de especies arbustivas.
3. Control de la erosión en los taludes de arroyos y caminos.
4. Aporte de tierra vegetal seleccionada, hidrosiembras y protección de suelos con manta orgánica semimallada.
5. Instalación de islas flotantes y nidos de cigüeñas blanca para la mejora de los hábitats de la avifauna (Fig. 5)
6. Instalación de observatorios de aves.
7. Integración paisajística del área de recepción y control.

CONCLUSIONES

Utilizando el método de elementos finitos con el modelo *soft soil* se obtienen valores similares de la resistencia al corte sin drenaje a la conseguida mediante ensayos

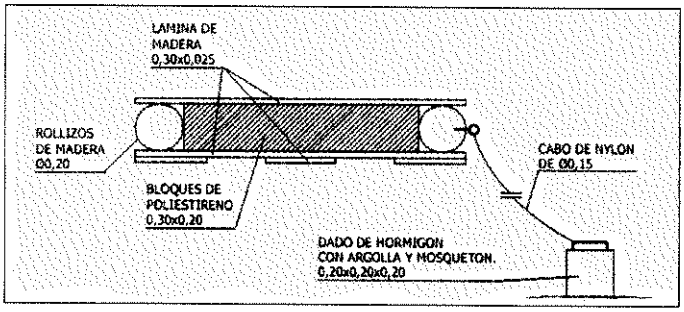


Figura 5. Isla flotante.

de sonda de molinete (corregidos a partir del índice de plasticidad), piezoconos (ecuación 3) o dilatómetro de Marchetti.

El uso de la resistencia a compresión simple y de la ecuación 4 en los cálculos puede llevar a valores muy bajos de la resistencia al corte. Debido a ello, este método no es recomendable.

Si se utilizan los parámetros del ensayo de corte consolidado-sin drenaje para corregir la resistencia al corte, esta resistencia se sobreestima por un factor de 1,6.

El modelo reológico con el que se obtienen resultados más ajustados a los asientos medidos es el *soft soil* (similar al *cam-clay*). Los tres modelos Mohr-Coulomb indicados en el apartado 4 también se pueden utilizar para alcanzar valores aceptables de asiento, como se indica en el apartado 5.

Todos los modelos utilizados predicen bien las presiones intersticiales.

Los coeficientes de seguridad obtenidos con el método de elementos finitos son similares a los obtenidos con el método de la superficie de deslizamiento, pero en las secciones en las que se incluyó el geotextil de refuerzo solamente es adecuado emplear el MEF.

Solo un modelo Soft-Soil-Creep ha podido reproducir en los cálculos los grandes desplazamientos horizontales medidos por los inclinómetros. Este modelo será tratado en un futuro artículo.

REFERENCIAS

Baligh, M.M., Azzous, A.S., Wissa, A.Z., Martin, R.T., Morris on, M.J. (1981). "The piezocone penetrometer".Symp. on CPT and Exper., ASCE.

Campanella, G., Gillespie, D., Robertson, P.K. (1982). "Pore pressure during cone penetration testing". Proc. ESOPTII, Amsterdam.

Hansbo, S. (1957). "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test". Swedish Geotech. Inst. Proc. 14.

Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L., Serrano, A. (1981). Geotecnia y Cimientos II, Rueda, Madrid.

Justo, J.L. (2000). Dictamen sobre la estabilidad del dique de Lebrija. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Informe no publicado.

Lade, P.V. (2001). Engineering properties of soils and typical correlations. Capítulo 3, Geotechnical and Environmental Engineering Handbook, Kluwer, 43-62.

Nakase, A. (1970). Stability of low embankment on cohesive soil stratum. *Soils and Foundations* 10(4): 39-64.

Sennesset, K, Janbu, N., Svan, G., (1982). Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proc. ESOPT II. Amsterdam.

SE TERMINARON DE IMPRIMIR ESTAS
"MONOGRAFÍAS DE LA REAL ACADEMIA
SEVILLANA DE CIENCIAS, VOLUMEN 3",
EL 24 DE AGOSTO DE 2012,
FESTIVIDAD DE SAN BARTOLMÉ,
EN LOS TALLERES DE UTRERANA DE EDICIONES, S.L.,
UTRERA (SEVILLA)