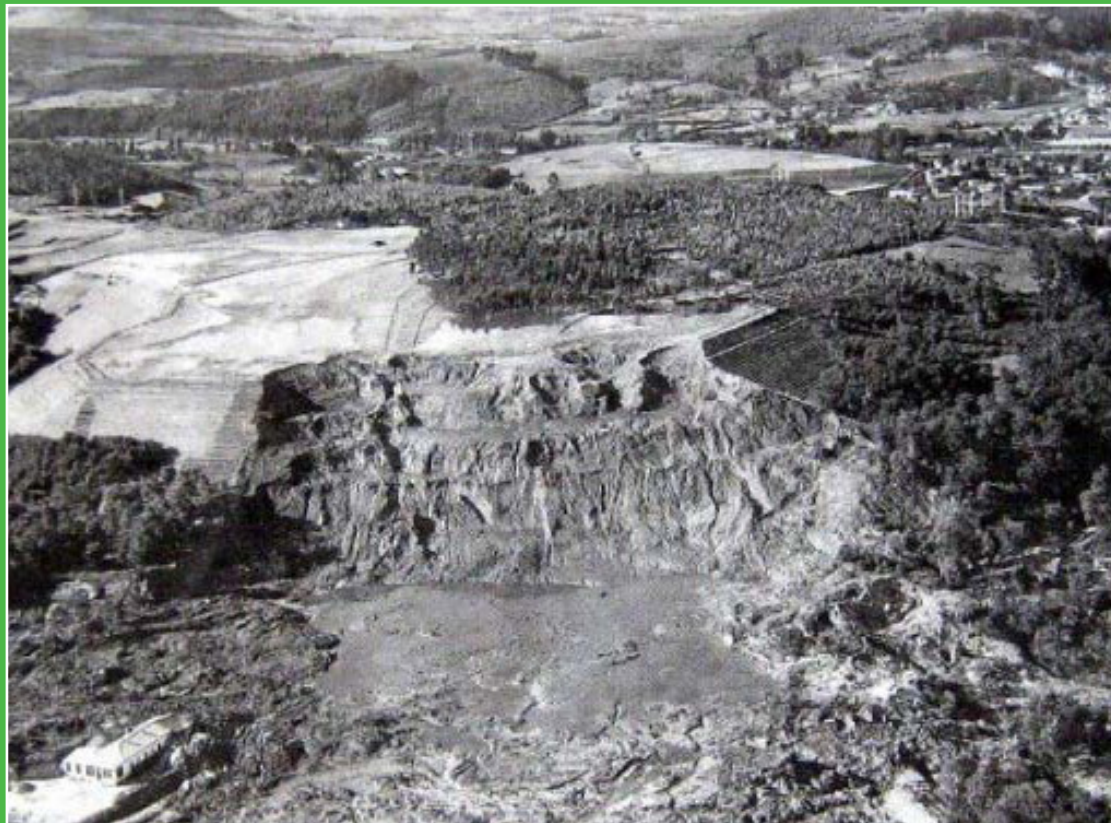


# METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN INVENTARIO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS MINEROS CERRADAS O ABANDONADAS



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España





# METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN INVENTARIO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS MINEROS CERRADAS O ABANDONADAS



Madrid, 2014



Este documento recoge los trabajos realizados mediante el "Acuerdo entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y el Instituto Geológico y Minero de España para la Encomienda de Gestión de trabajos en materia de impacto ambiental y de producción y consumo sostenible" de julio de 2009.

La metodología para la realización de un inventario de instalaciones de residuos mineros cerradas o abandonadas ha sido realizada por el siguiente equipo técnico

**Directores del Proyecto**

Andrés Macho Jiménez. DG de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)

Lucas Vadillo Fernández. Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

**Instituto Geológico y Minero de España (IGME)**

Roberto Rodríguez Pacheco

Francisco Javier Fernández Naranjo

Julio Cesar Arranz González

Esther Alberruche del Campo

Virginia Rodríguez Gómez

Lucas Vadillo Fernández

**Edita:**

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría General Técnica

Centro de Publicaciones

Teléfono: 91 347 55 41 / Fax: 91 347 57 22

**Distribución y venta:**

Paseo de la Infanta Isabel, 1

28014 Madrid

Tienda virtual: [www.magrama.es](http://www.magrama.es)

e-mail: [centropublicaciones@magrama.es](mailto:centropublicaciones@magrama.es)

NIPO: 280-14-196-6 (papel)

NIPO: 280-14-197-1 (línea)

ISBN: 978-84-491-1426-7

Depósito Legal: M-36761-2014

© Instituto Geológico y Minero de España

C/ Ríos Rosas, 23 – 28003 Madrid

Teléfono: 91 349 57 00 / Fax: 91 4426216

Web: <http://www.igme.es>

NIPO: 728-14-029-8 (línea)

ISBN: 978-84-7840-956-3

**Maquetación Impresión y**

**Encuadernación:**

Imprenta Taravilla, S.L.

Catálogo General de publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

**Datos técnicos:** Formato: 17 x 20 cm. Caja de texto: 14,2x19,6 cm. Composición: Una columna.

Tipografía: Times New Roman a cuerpo 11. Encuadernación: Rústica. Papel: Interior en offset estucado mate de 115 gramos. Cubierta en estucado semimate de 280 gramos. Tintas a 4/0.

En esta publicación se ha utilizado papel libre de cloro de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública.

# ÍNDICE

*Págs.*

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>2. YACIMIENTOS MINEROS DE ESPAÑA</b> .....	15
2.1 Principales menas y depósitos de minerales metálicos de España .....	15
2.2 Principales yacimientos de carbón en España .....	19
2.3 Rocas ornamentales .....	20
2.3.1 Yacimientos de Granito .....	20
2.3.2 Yacimientos de mármol y caliza marmórea .....	21
2.3.3 Yacimientos de pizarra .....	21
<b>3. TIPOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE RESIDUOS MINEROS</b> .....	23
3.1 Escombreras .....	23
3.2 Pilas de lixiviación y vertederos de lixiviación (Heap leaching y Dump leaching) .....	25
3.3 Estructuras de relleno hidráulico de lodos .....	27
3.3.1 Presas de lodos .....	29
3.3.1.1 Presas de materiales sueltos .....	30
3.3.1.2 Presas mixtas .....	30
3.3.1.3 Presas con diques de arenas cicladas .....	30
3.3.1.3.1 Clasificación por método de recrecimiento .....	31
3.3.1.3.2 Clasificación por ubicación.....	33
3.3.1.3.3 Clasificación por punto de vertido .....	34
3.3.1.3.4 Clasificación por sistema de drenaje.....	35
<b>4. PROBLEMÁTICA DE LA ESTABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA DE LAS ESTRUCTURAS MINERAS</b> .....	37
4.1 Estabilidad física o geológica .....	37
4.2 Contaminación química de aguas continentales .....	39
4.2.1 Efectos de las aguas ácidas de mina sobre los ecosistemas acuáticos .....	44
4.2.2 Clasificación de las aguas ácidas.....	46
4.3 Sustancias utilizadas en las plantas de concentrado o beneficio de minerales .....	46
<b>5. ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS</b> .....	49
5.1 Cálculo de la peligrosidad .....	55
<b>6. ESTABILIDAD DE PILAS DE LIXIVIADO</b> .....	61
6.1 Estabilidad física o geológica .....	61
6.1.1 Cálculo de la peligrosidad física o geológica.....	63
6.2..Contaminación química .....	66



## ÍNDICE DE FIGURAS

Págs.

Figura 1.	Tipología de escombreras según emplazamiento.....	24
Figura 2.	Tipologías constructivas de escombreras.....	25
Figura 3.	Presa de tierras .....	30
Figura 4.	Presa de lodos aguas arriba (Upstream tailings dam) .....	31
Figura 5.	Presa de lodos aguas abajo (Downstream tailings dam) .....	32
Figura 6.	Presa centrada (Centerline tailings dam).....	33
Figura 7.	Tipología de presas según su ubicación .....	33
Figura 8.	Descarga de lodos espesada .....	34
Figura 9.	Vertido en cola.....	34
Figura 10.	Vertido en dique .....	34
Figura 11.	Sistema de drenaje mediante chimenea.....	35
Figura 12.	Drenaje mediante sifón hidráulico .....	36
Figura 13.	Granulometrías de suelos licuefactables .....	38
Figura 14.	Formación de aguas ácidas de mina.....	39
Figura 15.	Relación entre los potenciales de neutralización y acidez de residuos mineros ....	41
Figura 16.	Clasificación de aguas de mina .....	47
Figura 17.	Simplificación de filtración paralela.....	50
Figura 18.	Tipología de deslizamientos circulares .....	51
Figura 19.	Principales causas de inestabilidad de escombreras.....	53
Figura 20.	Distribución del tamaño de partícula de escombreras de carbón y carbón de coque susceptibles de haber sufrido licuefacción estática.....	54
Figura 21.	Relación entre el grado de saturación y la permeabilidad.....	62
Figura 22.	Curva granulométrica de una pila de lixiviado por cianuro.....	63
Figura 23.	Parámetros de estabilidad del cianuro libre .....	67
Figura 24.	Modelo conceptual de funcionamiento hidráulico de una presa de residuos con las diferentes vías de entrada y salida del agua .....	71
Figura 25.	Número de incidentes versus principales mecanismos de fallos de los diferentes tipos de presas de lodos de flotación de acuerdo al sistema de cierre utilizado en la construcción del dique.....	73
Figura 26.	Inestabilidad del talud de una presa de lodos por aproximación del nivel freático	76
Figura 27.	Curvas granulométricas de varias presas de lodos de flotación de minería de Pb-Zn..	77
Figura 28.	Ensayo de corte directo drenado con aplicación de una deformación de corte cíclica.	78

Figura 29.	Presa de Aznalcóllar, perfil transversal en la sección deslizada a) Sección vertical por la presa y la fundación. Superficie de deslizamiento detectada con sondeos. b) Detalle: etapas de construcción, mecanismo de rotura progresiva y piezometría..	79
Figura 30.	Complejo de Stava. a) Esquema de la reparación realizada para salvar de conducto de decantación obstruido en la presa superior (fuera de escala). b) Detalle .....	82
Figura 31.	Corona de una presa de lodos de arenas ciclonadas.....	89

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

*Págs.*

---

Fotografía 1. Conjunto de escombreras de minería metálica de Cobre .....	24
Fotografía 2. Pila de lixiviación con piscina de recogida del lixiviado (Perú).....	26
Fotografía 3. Instalación de geomembrana en un pila de lixiviados (Heap leaching).....	27
Fotografía 4. Descarga de lodos de flotación en una presa de residuos. Relleno hidráulico de la presa con vertido puntual .....	29
Fotografía 5. Dique construido por el sistema arcaico .....	32
Fotografía 6. Formación de AMD y precipitados de hierro en corta de carbón .....	42
Fotografía 7. Precipitados y coloides de oxihidroxisulfatos de aluminio en una arroyo a pH 4,6 – 5	43
Fotografía 8. Formación de sales evaporíticas en escombreras de finos de lavadero de carbón.	43
Fotografía 9. Autocombustión de una escombrera de carbón .....	44
Fotografía 10. Licuefacción estática en forma de flujo de una pila de lixiviación de oro.....	62
Fotografía 11. Deslizamientos superficiales en talud de presas de lodos .....	75
Fotografía 12. Deslizamiento profundo en dique, posiblemente por tubificación o piping consecuencia del colapso de la chimenea .....	75
Fotografía 13. Tubificación en dique .....	80
Fotografía 14. Formación de cárcavas con erosión remontante .....	81
Fotografía 15. Colapso del vaso de la presa por fallo en la chimenea de la presa.....	83
Fotografía 16. Dique realizado con los lodos de flotación por el sistema de tabla-estacas.....	90
Fotografía 17. Parte superior del dique a la misma altura que los lodos del vaso. Dique de lodos sin ciclonado de arenas.....	90
Fotografía 18. Tubería de drenaje de la presa roto y colmatado de lodos .....	91
Fotografía 19. Galería de drenaje de fondo no funcional con presencia de sales.....	92
Fotografía 20. Dique con drenes californianos no funcionales para drenar el talud .....	93
Fotografía 21. Chimenea en funcionamiento.....	94
Fotografía 22. Salida de una tubería en el pie del talud de una presa en funcionamiento, conectada con la chimenea del vaso.....	94
Fotografía 23. Formación de sales solubles el talud.....	95
Fotografía 24. Formaciones de costras de hidróxidos de hierro en el talud .....	96
Fotografía 25. Colapso de la presa de lodos denominada Luciana (Torrelavega) .....	97
Fotografía 26. Diques de arena típicos de procesos de licuefacción recorriendo la cabecera del deslizamiento .....	98
Fotografía 27. Colapso del vaso de una presa por piping debido a la rotura de la chimenea.....	99
Fotografía 28. Formación de grietas de tracción y diques de arena por colapso del vaso.....	99

Fotografía 29. Hundimiento del vaso de una presa restaurada con geotextil y gramíneas próxima al arroyo de la Campana en La Carolina.....	100
Fotografía 30. La tubería de drenaje del fondo de la presa anterior se encuentra deformada, por lo que el hundimiento puede estar relacionado con el fallo de este sistema de drenaje .....	100
Fotografía 31. Laguna de decantación en presa de aguas ácidas.....	101
Fotografía 32. Rezumes en dique de lodos.....	102
Fotografía 33. Surgencia entre la base de la presa y el cimientado (Areniscas del Buntsandstein)..	102
Fotografía 34. Cárcava producida por la apertura de una zanja para desaguar el agua del vaso de la presa .....	103
Fotografía 35. Toma de una muestra de lodos saturados con barrena de mano a una profundidad aproximada de un metro.....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Págs.

Tabla 1.	Clasificación ácido/base de rocas mediante ensayos estáticos .....	41
Tabla 2.	Secuencia de la evolución de las comunidades biológicas asociadas a cursos fluviales afectados por drenajes de mina (AMD o alcalinos) hasta su recuperación ...	45-46
Tabla 3.	Sustancias utilizadas en las plantas de concentración o beneficio según el tipo de mineral .....	48
Tabla 4.	Cálculo del índice de peligrosidad de escombreras .....	55-59
Tabla 5.	Indicadores de la licuefacción estática en pilas de lixiviados.....	61
Tabla 6.	Cálculo del índice de peligrosidad de pilas de lixiviación.....	63-65
Tabla 7.	Cálculo del índice de peligrosidad de presas de lodos.....	84-88





## INTRODUCCIÓN

Entre los objetivos de la Directiva 2006/21/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE, se encuentra la realización de un inventario de instalaciones de residuos cerradas y abandonadas que tengan un impacto medioambiental grave o que puedan convertirse a medio o corto plazo en una amenaza grave para la salud de las personas o para el medio ambiente. La Directiva define instalación de residuos como “cualquier zona designada para la acumulación o el depósito de residuos de extracción, tanto en estado sólido como líquido o en solución o suspensión...” y define como depósitos de residuos, exclusivamente, las escombreras y las balsas; a su vez, define balsa como “una estructura natural o construida para la eliminación de residuos de grano fino, normalmente residuos de extracción y tratamiento, junto con cantidades diversas de agua libre, resultantes del tratamiento de recursos minerales y del aclarado y reciclado del agua usada para dicho tratamiento”. Es decir, dentro de la definición de balsa comprendería tanto a un depósito de lodos excavado por debajo de la superficie del terreno como a una presa de lodos.

El único inventario a nivel nacional existente es el realizado por el IGME en los años de 1980 y 2000-2002 con una metodología que, dada la época en que se realizó, comprendía la localización, principales parámetros geométricos, volumen, tipología del emplazamiento, tamaño del residuo, etc., de las instalaciones, así como una descripción de los procesos de inestabilidad geotécnica y del impacto ambiental. Estos datos supusieron, en su día, un gran avance, dada la absoluta falta de conocimiento de la situación, volúmenes, tipología minera de los residuos, problemas de inestabilidad, etc., a nivel nacional.

Esta nueva metodología supone un avance en la comprensión de los procesos geotécnicos, principalmente de los residuos de presas y pilas mineras, así como los procesos geoquímicos que se generan en los residuos de las instalaciones mineras. La interpretación en campo con métodos sencillos permite la recogida de una serie de datos que se registran en una ficha diseñada para tal fin.

El producto final consta de una ficha de datos por cada instalación minera y una base de datos en la que se puede introducir la información en campo o en gabinete; base de datos, que permita visualizar una serie de campos que sean de interés para los profesionales y para el público en general.

La caracterización y parámetros del inventario tomados en campo y en laboratorio deberán servir para la posterior evaluación del riesgo para las personas y bienes, para los ecosistemas y para la salud humana. La metodología para la evaluación del riesgo constituye, en sí, otro documento que complementa a éste: **MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INSTALACIONES DE RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS.**

La METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN INVENTARIO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS MINEROS CERRADAS O ABANDONADAS describe sucintamente tipologías de estructuras mineras así como la problemática de estabilidad, no profundizando en estas disciplinas, ya que sobre dichas temáticas existen magníficos manuales que se pueden encontrar en la bibliografía citada, entre ellos cabe citar: Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. Ayala, F.J., Rodríguez, J.M. 1986. Madrid. IGME. En cambio, sí se han ampliado algunas temáticas menos desarrolladas en este tipo de Manuales, como son: la licuefacción estática, la geoquímica de aguas acidas y su afección a los ecosistemas acuáticos, y la problemática ambiental de la lixiviación mediante cianuración.

## 2. YACIMIENTOS MINEROS DE ESPAÑA

La península ibérica es uno de los lugares con mayor número de indicios mineralógicos a escala mundial. Entre esta gran diversidad mineralógica se encuentran dos de los más grandes yacimientos metalogenéticos mundiales: la Faja Pirítica Ibérica y el Distrito Minero de mercurio de Almadén. Así mismo, ha sido el mayor productor de mineral de plomo y mercurio, y uno de los mayores productores de cobre. Estos yacimientos han sido extraídos y beneficiados desde la época de Tartessos, siendo en la época Romana cuando estos yacimientos empezaron a explotarse de una forma intensa, de acuerdo con la tecnología de la época. Tantos años de historia minera han dado lugar a grandes y extensos depósitos de estériles mineros.

### 2.1 PRINCIPALES MENAS Y DEPÓSITOS DE MINERALES METÁLICOS DE ESPAÑA

Mayoritariamente, los residuos mineros que presentan sustancias peligrosas en concentraciones que pueden derivar en ecotoxicidad proceden de la explotación de los minerales metálicos y de su beneficio (concentrado), beneficio que se realiza en plantas mineralúrgicas mediante un tratamiento físico-químico. Estos yacimientos, que vienen siendo explotados desde la época de Tartessos, son, principalmente, los que mayor volumen de residuos han generado: escombreras, pilas de lixiviación, presas de lodos, etc.

En la minería metálica, las menas (mineral que presenta interés económico) se presentan, la mayoría de las veces, como una asociación de minerales (paragénesis). A modo de ejemplo, se citan a continuación los principales yacimientos de España, que a la vez lo son de Europa, y que han dado lugar a grandes escombreras y depósitos de lodos (residuos de industrias extractivas) que contienen los residuos más problemáticos.

#### *La Faja Pirítica Ibérica. Menas de cobre, plomo, cinc, oro, plata*

La denominada Faja Pirítica Ibérica, es una de las provincias metalogenéticas más importantes a escala mundial, y probablemente la de mayor concentración de sulfuros masivos polimetálicos de la corteza terrestre. Se encuentra enclavada en el Macizo Hespérico, Zona Subportuguesa, extendiéndose por las provincias de Huelva y Sevilla (Minas de Riotinto, Cerro del Andévalo, Tharsis, Nerva, Aznalcóllar y otros municipios) y Portugal (Canal-Caveira, Lousal, Neves Corvo, São Domingos, etc.). Los yacimientos, de origen volcano-sedimentario, están formados, principalmente, por mineralizaciones de sulfuros masivos, una agrupación de pirita (sulfuro de hierro), calcopirita (sulfuro de cobre y hierro), galena (sulfuro de plomo), blenda (sulfuro de cinc), esfalerita (sulfuro de hierro y cinc), marcasita (sulfuro de hierro), bornita (sulfuro de cobre y hierro), pirrotina (sulfuro de hierro), arsenopirita (sulfuro de hierro y arsénico) y óxidos y carbonatos, además de oro y plata, estos últimos

concentrados en la parte meteorizada o gossan (andalucismo que utilizaban los mineros de Río Tinto, para referirse a la palabra inglesa gold sand)

Estas mineralizaciones necesitan una separación diferencial para obtener concentrados de cobre, oro y plata (Minas de Río Tinto y otras), cobre, plomo, cinc y plata (Aznalcóllar), etc. La separación del cobre, el plomo y el cinc, en forma de sulfuros, se realizaba en lavaderos mediante flotación; el oro y la plata se sometían a un proceso de lixiviación con cianuro. Los sulfuros residuales de estas escombreras y presas de lodos de esta minería han dado y siguen dando lugar a la formación de aguas acidas de mina (AMD).

#### *Sierra de Cartagena y La Unión. Menas de plomo, cinc, plata*

Se extiende por los municipios murcianos de Cartagena, la Unión (Portman, Llano del Beal) y Mazarrón, con mineralizaciones, principalmente, de piritita, galena, blenda, plata, magnetita (óxido de hierro), etc. Mineralizaciones que necesitan una separación selectiva o diferencial para obtener concentrados de plomo, cinc y plata. Esta separación diferencial se realizó mediante flotación, utilizando: etil-xantato potásico como colector; Flotol A o aceite de pino como espumante; cianuro sódico como depresor; cal para aumentar el pH; sulfato de cobre como activador de la blenda. Actualmente hay numerosas escombreras y presas de lodos cuyos sulfuros dan lugar a la formación de aguas acidas de mina (AMD).

#### *Distrito minero de Linares y la Carolina. Menas de plomo y plata*

Este distrito fue el principal productor de plomo durante los años de 1880 a 1917, con 1.300 minas y unos 786 km de galerías en filón. Se extiende por Linares y La Carolina, municipios de Jaén, la mineralización esta formada casi exclusivamente por galena (sulfuro de plomo) y sulfuantimoniuros de plata. Los minerales beneficiados eran plomo y plata, apareciendo también asociados calcosina (sulfuro de cobre), bornita (sulfuro de cobre), calcopiritita, hematites (óxido de hierro), cuprita (óxido de cobre), siderita (carbonato de hierro), cerusita (carbonato de plomo), etc. El sistema de concentrado se realizaba mediante flotación.

Otras minas de plomo y plata de menor importancia son la Sierra de Alcudia (Ciudad Real), Gador y Sierra Almagrera (Almería), campos filonianos plumbíferos de Azuaga, Castuera (Extremadura), Área de Peñarroya-Fuenteovejuna (Córdoba). Todas las minas están actualmente cerradas.

#### *Reocín. Menas de plomo y cinc*

Mina recientemente cerrada, situada en Cantabria. El yacimiento se encuentra relacionado con rocas carbonatadas de manera que las mineralizaciones arman en dolomías ankeríti-

cas del Gargasiense. La mineralización está compuesta por blenda, marcasita, galena, pirita, delanterita (sulfato de hierro hidratado), smithsonita (carbonato de cinc), cerusita (carbonato de plomo), goethita (hidróxido de hierro), hemimorfita (hidrosilicato de cinc hidratado), epsonita (sulfato de magnesio hidratado), etc. Los minerales beneficiados, son plomo y cinc. El sistema de beneficio era mediante flotación.

### *Distrito Suroeste (Huelva, Badajoz, Sevilla). Mena de hierro*

Se encuentra enclavada en la Zona Ossa-Morena, Dominio Arroyomolinos, se extiende por las provincias anteriormente citadas, aunque solamente se encuentran yacimientos explotables en las dos primeras. La mineralización principal es de magnetita, hematites, limonita (óxido de hierro hidratado), pirita, pirrotina y calcopirita. La magnetita se separa por concentración magnética y el cobre, como mineral secundario, por flotación. Las principales minas son: Cala (Huelva), Minas de Teuler (Huelva) Minas de San Guillermo-Colmenar-Santa Justa (Badajoz), Minas de la Berrona (Badajoz), Mina Monchi (Badajoz).

Otros yacimientos de hierro muy importantes han sido: la Mina del Marquesado, en Alquife (Granada); Ojos Negros (Teruel-Guadalajara); Coto Wagner y Vivaldi, en León; Ortuella-Somorrostro, Bilbao (Vizcaya).

### *Arco del estaño. Minerales de estaño- wolframio*

Estos minerales, asociados al magmatismo hercínico, se extienden a lo largo del denominado “arco del Estaño” por las provincias de La Coruña, Pontevedra, Orense, Zamora, Salamanca, Cáceres, Badajoz y Jaén; los yacimientos se encuentran muy diseminados. Las menas de estaño y wolframio son la casiterita (óxido de estaño), la scheelita y el wolframio (wolframato de calcio y wolframato de hierro y manganeso, respectivamente), minerales que suelen estar asociadas eir acompañados de sulfuros (pirita, calcopirita, arsenopirita).

### *Menas de oro*

Entre las principales minas de oro, se encuentra el yacimiento de Rodalquilar (Almería) de tipo epitermal, que contiene filones mineralizados de dos tipos: 1. Epitermales de alta sulfurización, de Au-As, consistentes en filones y brechas y 2. Epitermales de baja sulfurización de Pb-Zn-Cu-(Au). La mineralogía primaria de los yacimientos tipo 1 consiste en oro nativo, pirita, enargita (sulfuro de arsénico y cobre), tenantita, tetraedrita (antimoniosulfuro de hierro y cobre), cinabrio (sulfuro de mercurio), bismutina (sulfuro de bismuto), casiterita, galena y esfalerita. Por otra parte, la mineralización del tipo 2 incluye oro nativo, esfalerita, galena y calcopirita. El yacimiento fue explotado en distintas épocas, si bien no es hasta

1930 cuando la extracción del oro comienza a tener éxito, mediante cianuración en tanques agitadores y, posteriormente, mediante cianuración estática en pilas. La mina se cerró definitivamente en 1990.

Otra explotación importante para el beneficio de oro es la Mina del Valle-Boinás, recientemente cerrada y situada en el municipio de Belmonte de Miranda (Asturias). La mineralización principal es de pirita, arsenopirita, calcopirita, calcosina, bornita, electrum (50% de oro y 10% de plata); el mineral beneficiado es oro y cobre, mediante flotación, lixiviación con cianuro en tanques y adsorción con carbón activado.

#### *Aguablanca. Mena de níquel, cobre, oro, PGB (platino, paladio, cobalto)*

Se encuentra enclavada en la Zona Ossa-Morena, Dominio Arroyomolinos, en el municipio de Monesterio (Badajoz), actualmente en explotación, es un yacimiento con mineralizaciones de sulfuros: pentlandita (sulfuros de níquel y hierro), pirrotina (sulfuro de hierro), calcopirita, pirita, covelina (sulfuro de cobre), minerales del platino PGM (platino, cobalto, paladio), oro, etc. Su separación se realiza mediante flotación.

#### *Distrito de Almadén. Mercurio*

Considerado el mayor yacimiento mundial de mercurio, se sitúa en la mitad meridional de la meseta y al norte de Sierra Morena. El yacimiento arma en la llamada “cuarcita del criadero”, la mineralización es de cinabrio, mercurio nativo, junto con pirita y calcopirita de manera esporádica. El método de obtención del mercurio era mediante tostación a 600 °C, temperatura a la cual el mercurio se volatiliza para ser posteriormente condensado recogién-dose en estado líquido.

#### *Menas de Uranio*

Las mineralizaciones de uranio en España son numerosas y se extienden por todo el paleozoico y prepaleozoico de la Meseta. La mayoría de las mineralizaciones son de tipo filoniano encajadas en rocas granitoideas. Las principales minas explotadas han sido: la mina de Saelices el Chico (Ciudad Rodrigo) y los depósitos de Don Benito (Badajoz). En el primer caso la mineralización es de pechblenda (óxido de uranio) y coffinita (silicato hidratado de uranio) como minerales primarios y gummita, autunita, torbernitita, uranotilo alfa, saléeita, kasolita, uranopilita, e iantinita (les de uranio), como secundarios, y pirita, marcasita y siderita como ganga. La mineralización de don Benito es pechblenda, coffinita, basetita, fosfuranilita (todos ellos, mena de uranio) y melnicovita (sulfuro de hierro en forma de gel), calcopirita, calcosina y covelina (sulfuro de cobre). El sistema de concentrado

es mediante lixiviación estática y dinámica con ácido sulfúrico y oxidación del uranio con  $\text{Fe}^{3+}$  en la misma pila de lixiviación,  $\text{Fe}^{3+}$  proviene de los sulfuros de hierro (pirita, pirrotina, marcasita, etc).

## 2.2 PRINCIPALES YACIMIENTOS DE CARBÓN EN ESPAÑA

En la génesis y posterior diagénesis del carbón, en ambiente anaerobio, la materia orgánica se va transformando, aumentando su rango en carbono y disminuyendo su contenido en volátiles, con el consecuente aumento del poder calorífico del carbón. De acuerdo con este rango, de menor a mayor contenido en carbono, los carbones se clasifican, mediante la clasificación ASTM, en lignito (lignito pardo), carbón sub-bituminoso (lignito negro), bituminoso (hulla) y antracita, a su vez cada una de ellas tiene varias subdivisiones. Por ejemplo, el carbón bituminoso bajo en volátiles es el que tiene mayor poder calorífico, casi 9.000 kcalorías/kg. En el otro extremo, el llamado lignito B tiene 3.000 kcalorías/kg. Así mismo, en la diagénesis del carbón puede formarse pirita y marcasita, así como carbonatos. Dependiendo del potencial neto de neutralización se podrán formar o no aguas ácidas, que suelen ser ecotóxicas. Los finos de carbón, que acompañan a muchas escombreras donde se vierten lodos del lavado del carbón, pueden entrar en autocombustión como consecuencia del calor producido por la oxidación del carbono.

Los principales yacimientos carboníferos se encuentran en Asturias, León, Palencia, Teruel (Utrillas, Ariño, Andorra), La Coruña, Lérida, Puertollano (Ciudad Real) y Peñarroya (Córdoba). Los yacimientos de carbón, de acuerdo con las características geológicas, se dividen en cuencas: Asturias (Cuenca central asturiana y Cuenca del Narcea), siendo el carbón explotado principalmente hulla y antracita (carbón bituminoso y antracita); León (cuenca del Bierzo, cuenca de Villablino, cuenca del Norte de León, cuenca de Sabero-Guardo, extendiéndose esta última por Palencia), con carbones del tipo hulla (carbón bituminoso) y antracita; Cuenca del Sur, que se extiende por Puertollano, Córdoba y Sevilla, con carbón es del tipo hulla (carbón bituminoso); Cuenca Pirenaica, que se extiende principalmente por Lérida, siendo carbón del tipo sub-bituminoso (lignito negro); Cuenca Teruel-Mequinzenza, se extiende por Teruel y Zaragoza y el carbón es del tipo sub-bituminoso (lignito negro); Cuenca del Noroeste, que comprende dos depósitos de lignitos pardos (lignito), Lignitos de Meirama y Puentes de García-Rodríguez, ambos yacimientos agotados y en fase de restauración. Las cuencas de León y Asturias son, con mucho, las superficies más grandes ocupadas por escombreras de carbón.

El tratamiento para concentrar el carbón se realiza en lavaderos mediante separación por aceleración diferencial, (separación mediante gravedad en cajas de pulsación hidráulicas y neumáticas), medios densos y flotación, siendo las dos primeras opciones las más utilizadas. La separación por medios densos, consiste en la creación de una pseudosolución densa mediante magnetita, al verter el carbón con el estéril, en la solución de agua con magnetita,



se forman dos fases, una más densa (estéril) que cae al fondo y otra menos densa que flota (carbón con magnetita), la magnetita se recupera mediante separadores magnéticos.

### 2.3 ROCAS ORNAMENTALES

Se denominan rocas ornamentales a una serie de tipos de roca que, al margen de su apariencia estética que las convierte en producto de interés comercial, han de reunir una serie de propiedades relacionadas con su resistencia y durabilidad. Estas propiedades han sido normalizadas, mediante las Normas UNE de ensayo de los materiales (granitos, pizarras, calizas, mármoles, travertinos, etc). Los ensayos a que son sometidos estos materiales son la resistencia a la flexión ( $\text{kg/cm}^2$ ), resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ), módulo elástico ( $\text{kg/cm}^2$ ), resistencia a las heladas (pérdida en peso, en %), resistencia al desgaste (mm), resistencia al choque (cm), porosidad abierta (%), coeficiente de absorción de agua (%), peso específico ( $\text{kg/m}^3$ ), resistencia a la cristalización de sales (pérdida en peso en %). Su uso suele ser para revestimiento exterior o interior, cubiertas de edificios, pavimento exterior e interior, etc. Los estériles, en principio, a falta de pruebas de lixiviación, se pueden asimilar a inertes, al estar constituidos, mayoritariamente, por feldespatos, micas, cuarzo, carbonato cálcico, arcillas, etc.

#### 2.3.1 Yacimientos de Granito

Los principales yacimientos de granito en España se encuentran repartidos por las siguientes zonas:

- Galicia: en Orense se explotan las variedades Gris Morrazo, Grissal, Rosavel; en Pontevedra se explotan las variedades Albero, Mondariz, Gris Perla, Rosa Dante y Rosa Porriño; en Lugo la variedad San Román.
- Madrid: se extraen las variedades Blanco Perla y Blanco Castilla en la Sierra de Guadarrama y Blanco Cristal, Gris Cadalso, Rosa Cadalso, en Cadalso de los Vidrios.
- Extremadura: en Badajoz se extraen las variedades Azul Claro, Dorado Perla, Gris Perla, Gris Quintana, Negro Ocho, Negro Ocho Especial, Rosa Villar, Verde Estrella; en Cáceres las variedades Gran Beige, Gran Gris.
- Castilla y León: en Ávila se extrae la variedad Gris Ávila y en Segovia la variedad Gris Villa.
- Sevilla: se extrae la variedad Tezal.

La extracción de estos materiales se realiza mediante hilo diamantado y lanza térmica así como pequeñas cantidades de explosivo. El estéril producido puede ser superior al 50% del granito extraído de cantera. El aprovechamiento se realiza en plantas de elaboración

denominadas telares que suelen estar separados de la instalación minera. El corte de los telares da lugar a lodos cuyo tamaño suele ser inferior a 100 micras. La granulometría que predomina en las escombreras es de tamaño grande a medio. Últimamente se han instalado plantas de machaqueo con el fin de rentabilizar estos residuos, cuyo fin principal es la venta como árido, así como incorporar el residuo que no tenga salida comercial al hueco para su restauración.

### 2.3.2 Yacimientos de mármol y caliza marmórea

Los afloramientos de este material y sus variedades son muy numerosos, sus yacimientos se extienden por Levante, principalmente en Almería, Alicante y Murcia, y en menor medida por País Vasco, Córdoba, Granada y Badajoz. Las variedades más conocidas son Blanco Macael (Macael, Almería), Crema Marfil (Pinoso, Alicante), Crema Capri (Cabra, Córdoba), Rojo Cehegin (Cehegin, Murcia), Negro Marquina (Marquina, Vizcaya), etc.

La extracción se realiza con hilo diamantado y rozadoras de brazo. El estéril producido puede ser superior al 50% de la roca extraída de cantera. El aprovechamiento se realiza en plantas de elaboración denominadas telares con refrigeración de agua dando lugar a lamas o lodos cuyo tamaño suele ser inferior a 100 micras. La granulometría que predomina en las escombreras oscila entre tamaños decimétricos a metros. Últimamente se han instalado plantas de machaqueo con el fin de rentabilizar estos residuos, cuyo fin principal es la venta como árido, así como incorporar el residuo que no tenga salida comercial al hueco para su restauración.

### 2.3.3 Yacimientos de pizarra

Los principales yacimientos de pizarras de techar se encuentran en el denominado Sinclinal de Truchas (Orense y León), así como en la Sierra del Caurel (Lugo), Ortigueira (A Coruña) y Aliste (Zamora). En Bernardos (Segovia) se explotan unas filitas, principalmente, para ornamentación exterior.

La extracción se realiza mediante voladura, hilo diamantado, rozadoras de brazo y disco diamantado. El principal problema de las rocas ornamentales es el elevado ratio de estéril/mineral que se produce tanto en la extracción como en las plantas de aserrado de los bloques extraídos en la cantera, denominados rachones. El estéril generado puede ser superior al 95 % del todo uno.



### 3. TIPOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE RESIDUOS MINEROS

Los tres tipos de estructuras que se describen se corresponden con las especificadas en la Directiva: escombreras, escombreras del tipo pilas de lixiviación, y presas de depósitos de lodos. Si bien, en la Directiva no se citan expresamente las pilas de lixiviación, debido incuestionablemente a que dichas estructuras no dejan de ser una casuística más dentro de la tipología de escombreras, en este manual han sido separados de las escombreras por sus especiales características granulométricas y contenido en humedad.

#### 3.1 ESCOMBRERAS

De acuerdo con la definición de la Directiva de Gestión de Residuos de Industrias Extractivas, el término escombrera queda redactado como “una estructura construida para el depósito de residuos sólidos en superficie”. Los residuos sólidos o estériles de minería pueden proceder de avances de galerías de minería de interior, del vaciado de una corta troncocónica, del vaciado del hueco inicial de la minería de transferencia, de la fragmentación mecánica de menas para el aprovechamiento de un mineral, etc. A veces, como en el caso de la minería de carbón, se mezclan los sólidos del avance de galerías con el cribado de los lavaderos e incluso con el rechazo de la separación por medios densos o por flotación.

Uno de los principales factores a la hora de valorar el riesgo de una escombrera es su localización topográfica (Figura 1). Por su lugar de emplazamiento las escombreras pueden ser clasificadas en:

- De vaguada. Ocupa una vaguada o valle. Generalmente, éstas deben estar muy bien diseñadas con un núcleo drenante de escollera o una tubería drenante, dimensionados de acuerdo con el caudal de máxima avenida.
- De ladera. Situada en una pendiente.
- De divisoria. Sobre una divisoria de aguas.
- De llanura o exenta.
- De relleno de corta o hueco minero.

Por su tipología constructiva, las escombreras pueden diseñarse de diversas formas (Figura 2). De acuerdo con la forma constructiva la escombrera alcanzará mayor compactación y estabilidad. El grado de estabilidad de las escombreras está íntimamente relacionado con el grado de compactación, presentando mayor estabilidad aquellas compactadas en tongadas sobre las de vertido libre. Estas últimas, especialmente las de vertido libre desde cinta, cable o vagoneta a pie de pozo son, con diferencia, las más inestables debido a la escasa cohesión que alcanzan, como después veremos.

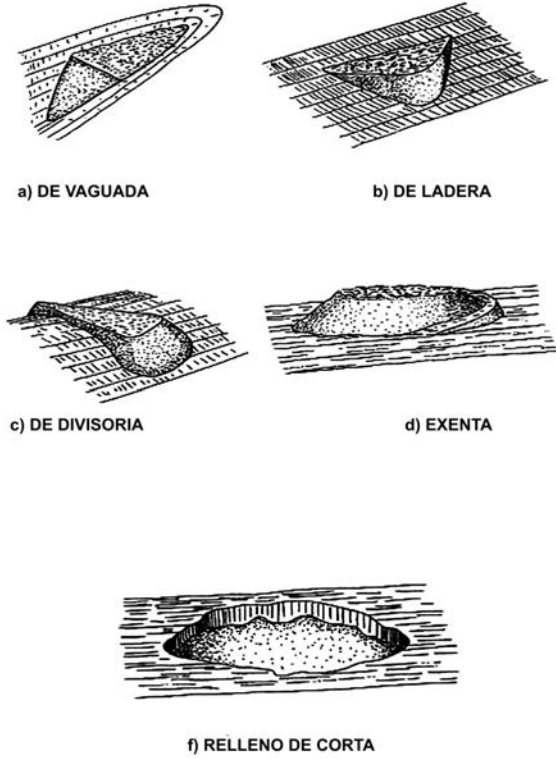


Figura 1. Tipología de escombreras según emplazamiento. (Ayala y Rodríguez, 1986)



Fotografía 1. Conjunto de escombreras de minería metálica de Cobre

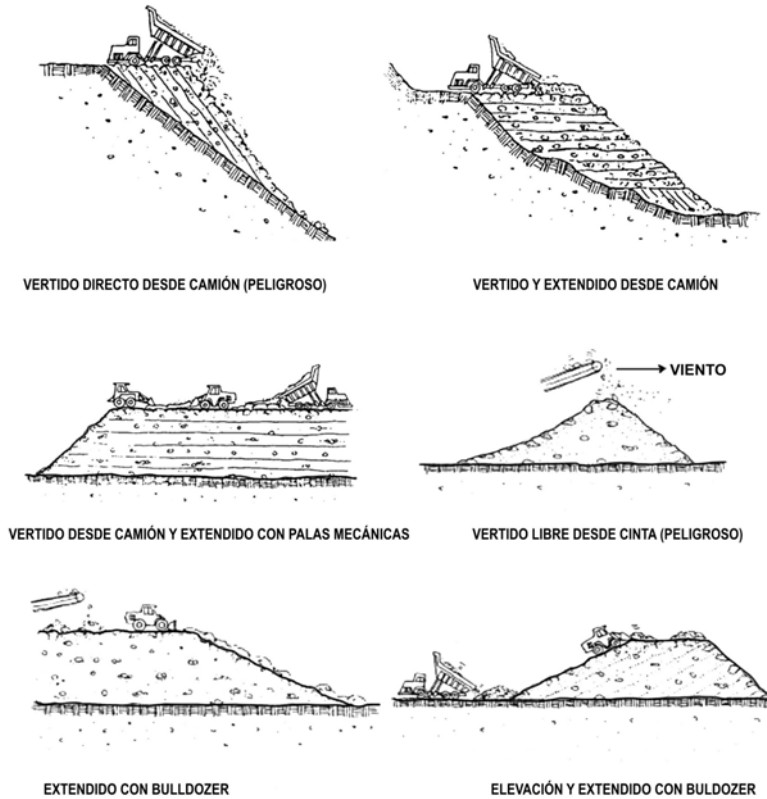


Figura 2. Tipologías constructivas de escombreras. (Ayala y Rodríguez, 1986)

### 3.2 PILAS DE LIXIVIACIÓN Y VERTEDEROS DE LIXIVIACIÓN (HEAP LEACHING Y DUMP LEACHING)

Esta tipología de depósitos de residuos se ha separado de las escombreras por sus especiales características, tanto en lo que refiere a la altura, granulometría y grado de saturación, que pueden alcanzar debido a la irrigación de las capas mediante un lixiviante.

Existe una gran confusión respecto a la terminología. En general, el termino vertedero o botadero de lixiviación dump leaching se refiere a la lixiviación de minerales sin tratamiento (trituración) transportados desde el mismo frente de explotación de yacimientos marginales (pórfidos cobrizos) o con leyes pobres de minerales de montera (oxidados). Los montones de las menas voladas a una determinada malla se trasportan desde el frente de la corta a los vertederos donde se vierten en capas de 15 a 20 metros de altura, variando el tamaño de grano desde 200 mm a tamaños de gravas y arenas. Generalmente, el mineral marginal se deposita en zonas cerradas y con poca altura, en bancos de 15 a 20 metros de altura, con longitudes de 300-500 metros y anchuras de 30-50 metros. Dentro del proyecto de explotación del mineral, esta operación se diseña para la obtención de un subproducto que mejora la economía de la explotación.

Actualmente, el método más extendido es el de pilas de lixiviación o heap leaching, aplicados a minerales de oro, cobre, níquel o uranio previamente semipreparados. Las pilas que se forman en cortos periodos de tiempo; con alturas de 2 a 15 metros; toneladas que pueden oscilar entre 5.000 a 500.000 toneladas por pila, cuya recuperación es mayor y más rápida que el método de botaderos de lixiviación, siendo ésta la operación principal y constituyendo, por tanto, el beneficio principal del yacimiento, debido a los bajos costes de inversión y operación, rapidez de ejecución del proyecto, simplicidad y flexibilidad de la operación. Es la técnica más extendida en yacimientos de pórfidos cupríferos (sulfuros y óxidos de cobre), depósitos de gran tonelaje y baja ley tipo Cu-Mo, Cu-Au, Cu, Au y Mo, generalmente con contenidos en Cu < 1% y 0,4 a 2 gr/tonelada de oro. Debido a sus bajas leyes la minería de pórfidos no permite un proceso de tratamiento más desarrollado o caro, debe ser de bajo coste, y ello se logra mediante una minería masiva no selectiva.

Las menas acumuladas en pilas se someten a una lixiviación mediante ácido sulfúrico, sulfato férrico, cianuro sódico, etc., según sean óxidos de cobre, sulfuros de cobre, u oro, respectivamente. Para que el lixiviado sea efectivo se necesita que el tamaño de mena sea homogéneo para lo cual, generalmente, el mineral se somete a un proceso de machaqueo y trituración para obtener, a veces, tamaños de grano inferior a  $\frac{3}{4}$  de pulgada o incluso por debajo de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

Este sistema de vertido en pilas necesita una preparación del terreno y de la instalación. Para ello se realiza el movimiento de tierras adecuado para suavizar pendientes (pendientes que pueden ser de un 1% hacia el lado de anchura y de un 4% en la longitud de la pila) y hacer lo más efectiva posible la reactividad del lixivante. La base se compacta con materiales



Fotografía 2. Pila de lixiviación con piscina de recogida del lixivado (Perú)





Fotografía 3. Instalación de geomembrana en un pila de lixiviados (Heap leaching)

de baja permeabilidad de unos 300 mm de espesor sobre la que se extiende una geomembrana impermeable que puede ser de polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), con espesores de entre 0,1 y 1,5 mm. La geomembrana va protegida por una capa de tierra arcillosa y piedras de unos 350 mm de espesor cuyo fin es protegerla de los golpes e impactos del vertido de la primera tongada; sobre esta capa, llamada protective layer (PL), se colocan una serie de tuberías colectoras que recogen el lixiviado y lo conducen a las piscinas. Sobre cada capa, a medida que se va agotando el mineral, se colocan una serie de aspersores que riegan la pila con el lixivante convenido. La geometría que adquiere tiene forma trapezoidal, pudiendo alcanzar grandes superficies y alturas superiores a los 100 metros. Cada capa puede tener, habitualmente, entre 2 y 15 metros y se vierten siguiendo el ángulo de reposo del material. El líquido fértil se recoge en unas piscinas desde donde se bombea a la planta de procesos.

#### 3.3 ESTRUCTURAS DE RELLENO HIDRÁULICO DE LODOS

Los lodos procedentes de la minería pueden provenir de distintas técnicas de aprovechamiento final del producto comercial. Entre los distintos procesos de aprovechamiento tenemos:

Lodos del serrado de rocas ornamentales (granito, mármol) que provienen del corte mediante flejes de acero en plantas de transformación, denominadas telares, donde el bloque de cantera se corta en planchas comerciales. La producción de este tipo de residuos es muy



pequeña en proporción al mineral extraído y, en el caso en que no tuvieran utilización como subproducto, se puede verter y mezclar en las escombreras, dado que se trata de residuos inertes. Últimamente estos lodos se someten a procesos de deshidratación, quedando el residuo en forma de una pasta. En el caso del mármol tiene diversas aplicaciones como subproducto.

Lodos del lavado de grava y arena. Proceden del rechazo del lavado por vía húmeda de la fracción inferior a 0,063 mm de las arenas de los áridos naturales, mediante hidrociclones, norias, tornillos sin fin, etc. Se suelen verter en balsas.

Lodos espesados o en pasta que pueden provenir del serrado de las rocas ornamentales o de lodos de flotación que, después de haber pasado por un proceso de deshidratación (filtros prensa, filtros banda, etc.), presentan un producto final que se puede definir como una pasta: mezcla densa y viscosa de residuos, que no evidencian fenómenos de segregación durante el transporte y recorrido del lodo al ser vertido. En el caso de los lodos de flotación, para tener la consistencia deseada, deben presentar por lo menos un 15% de las partículas con un tamaño inferior a 20 micras y el porcentaje de sólidos debe ser superior al 70%. Cuando se transporta por gravedad o por bombeo, las partículas finas forman un ángulo exterior relativamente bajo. Las partículas gruesas son dirigidas al centro actuando los finos como transportador. Normalmente se adiciona cemento Portland a la pasta conformada con los lodos de flotación para aumentar significativamente su resistencia y durabilidad. No necesitan, por tanto, ningún sistema de almacenaje tipo presa, ni tampoco existen este tipo de estructuras mineras cerradas o abandonadas por lo que no se han considerado en este Manual.

El método denominado Cement backfilling consiste en la deshidratación de los lodos a menos de un 10% de humedad y posterior encapsulamiento, mezclándolos con cemento o cenizas volantes y evitando la entrada de aire y agua. De esta forma se elimina la posibilidad de generación de aguas ácidas. Tiene el problema del ataque ácido a los materiales que constituyen los filtros prensa.

Los lodos de flotación constituyen el rechazo final de una serie previa de procesos mecánicos de separación de partículas de mayor ley o riqueza mineral (concentrado) de los estériles de baja ley (residuos). Estos procesos mecánicos son: machaqueo primario, en machacadoras de mandíbulas o giratorias, que convierten grandes tamaños a tamaños inferiores; machaqueo secundario, en machacadoras de conos y molinos de martillos, que convierten los tamaños anteriores en tamaño arenas; molienda, en que se consigue una última reducción mediante molinos de bolas o de barras, alcanzando tamaños de 1 mm. Posteriormente, este último tamaño es sometido a un proceso de separación por flotación obteniéndose un concentrado y los estériles, estos últimos en forma de lodos o colas. Estos materiales, cuya granulometría es comparable a la de los suelos, son sin embargo muy diferentes ya que, salvo en materiales muy arcillosos, las partículas que forman los estériles muestran angulosidad, lo que influye en las propiedades geotécnicas de los mismos. Los lodos de flotación

proceden, principalmente, de la minería metálica, siendo los más comunes y abundantes de todos los residuos mineros abandonados aquellos que, conteniendo un 30-40 % de sólidos y un 60-70 % de líquido, tienen que ser almacenados en balsas o presas mineras.

### 3.3.1 Presas de lodos

Este tipo de almacenamiento de residuos mineros corresponde, mayoritariamente, a lodos de flotación de minería metálica.

Se denomina presa de lodos a un “depósito elevado por encima del nivel del terreno en el que se realiza el vertido de los lodos o colas en solución acuosa mediante un sistema hidráulico de bombeo o por gravedad desde el lavadero del mineral”. Consta de: un dique o muro exterior que retiene los depósitos de estériles de lavadero y que, excepto en presas de tierras, se va recreciendo a medida que aumenta el nivel de lodos; una playa de arenas de baja pendiente en las proximidades del vertido, vertido que da lugar a una segregación de partículas provocando una clasificación espontánea de los residuos en base a la densidad de éstos, depositándose las fracciones más gruesas cerca del punto de vertido, en tanto que las más finas se transportan a zonas más distantes; y un lago de aguas claras o sobrenadante donde la fracción más fina sedimenta bajo la laguna de decantación.

A veces, aguas abajo de la presa de lodos, se instala una presa o balsa de retención y recuperación del agua drenada que, mediante un sistema de bombeo, retorna el agua al lavadero.

Según la constitución de los materiales del dique se pueden considerar las siguientes tipos de presa de lodos:



Fotografía 4. Descarga de lodos de flotación en una presa de residuos. Relleno hidráulico de la presa con vertido puntual

### 3.3.1.1 Presas de materiales sueltos

Este tipo de presas, denominada presa de tierras (Figura 3), tiene el mismo diseño que las presas de materiales sueltos para regulación de aguas. El dique de esta tipología de presa se construye de una sola vez, soliendo tener un núcleo de materiales impermeables y un drenaje interior para rebajar la presión de poro del núcleo. Este tipo de presa suele ser muy estable, dada la alta resistencia de los materiales utilizados a todo tipo de eventos: tubificación, licuefacción, erosión por sobrepaso, etc.

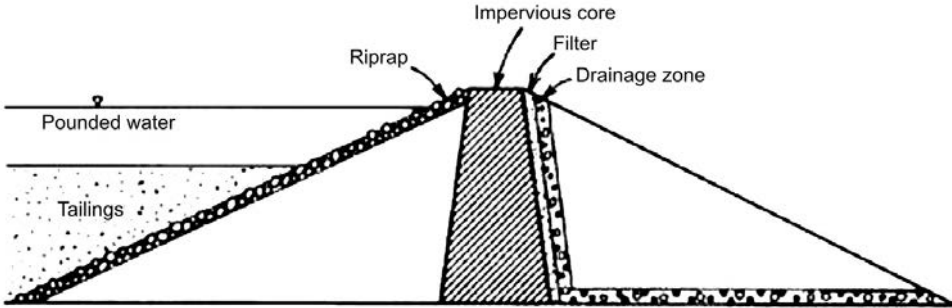


Figura 3. Presa de tierras (USEPA, 1994)

### 3.3.1.2 Presas mixtas

Generalmente la construcción del dique comienza con una presa de materiales sueltos para continuar con lodos ciclonados en las últimas fases de recrecimiento.

### 3.3.1.3 Presas con diques de arenas ciclonadas

El dique está construido con los propios lodos. Mediante separación, generalmente por ciclonado, se obtiene el material arenoso que es utilizado para la construcción del dique, el cual se va recreciendo a medida que aumenta el volumen de lodos y el nivel de estos. Generalmente todos los tipos se inician sobre un dique inicial. El dique inicial suele ser de los tipos siguientes:

- Impermeable: en el caso en que se requiera evitar la generación de efluentes. Debe construirse con materiales finos y resistentes compactados o colocar un espaldón impermeable aguas arriba.
- Permeable: construido con material grueso, generalmente escombros o estériles de machaqueo. Se utiliza este tipo cuando se desea que este dique funcione como dren de pie, situación muy conveniente por lo que respecta a la estabilidad, especialmente en diques construidos aguas arriba.

El dique inicial debe permitir almacenar los lodos producidos hasta que se pueda complementar la primera fase de recrecimiento del dique y continuar posteriormente la explotación sin problemas.

### 3.3.1.3.1 Clasificación por método de recrecimiento

Conforme al método empleado para el recrecimiento del dique, pueden ser de tres tipos: hacia atrás o aguas arriba; hacia delante o aguas abajo y centrada.

#### *Aguas arriba (Upstream tailings dam)*

En el método de aguas arriba (Figura 4), el recrecimiento del dique se realiza levantando diques sucesivos ligeramente retranqueados respecto al anterior, de manera que cada dique descansa sobre los lodos depositados. La construcción del dique se realiza utilizando la fracción más gruesa de los lodos (arenas) mediante su separación hidráulica con ciclones. Es el método más antiguo y más barato de construir; permite diques altos con relativa cantidad de lodos. Los diques de este tipo de presas, al estar depositados sobre lodos poco consolidados, y por tanto poco compactados, presentan una baja resistencia al corte por lo que tienen una limitación en altura por motivos de seguridad.

Son las más propensas a fenómenos de deslizamientos con superficie de rotura por el dique, a la licuefacción, a los fenómenos de piping y a la erosión remontante por sobrepaso. Para la construcción del dique es aconsejable que los lodos contengan como mínimo entre un 40-60% de arena. Debido a la fragilidad de este tipo de construcción, no se recomienda en áreas sísmicas, estando actualmente esta técnica de construcción prohibida en Chile.

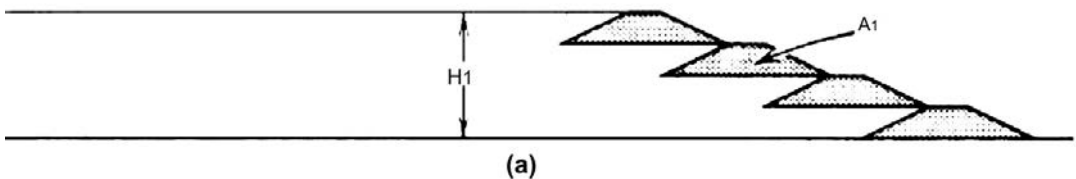


Figura 4. Presa de lodos aguas arriba (Upstream tailings dam) (USEPA, 1994)

Un caso particular del método de aguas arriba, es un método arcaico en el que el dique se construye con los propios lodos, sin necesidad del uso de arenas cicladas. El sistema está constituido por un entramado de palos hincados y tablas que evitan la salida de los lodos. El entramado cumple dos funciones: en primer lugar evitan la salida del material de los lodos y en segundo lugar actúan como soporte de las canaletas o tuberías de vertido de los lodos. Era, sin duda, el método de construcción más rápido y barato. La inmensa mayoría de las



Fotografía 5. Dique construido por el sistema arcaico

presas de lodos de flotación abandonadas existentes en España se han construido con el método arcaico de recrecimiento mediante hincado de palos y tablas.

#### *Aguas abajo (Downstream tailings dam)*

El método de aguas abajo (Figura 5) se llama así porque las fases posteriores de la construcción de diques se apoyan en la parte superior del talud aguas abajo de la sección anterior, cambiando la línea central de la parte superior de la presa aguas abajo de la misma. Suelen ser diques muy estables debido a su gran anchura aunque requiere un gran volumen de materiales de arenas o de préstamo. No suelen ser viables si los lodos tienen menos de 25% de arenas. Debido a su propia construcción, mediante el reperfilado del talud exterior, suelen sufrir una alta compactación, lo que aumenta la seguridad de la presa. Para evitar la licuefacción, la zona de playa inmediata al dique debe ser compactada y/o mantener drenajes que impidan que se

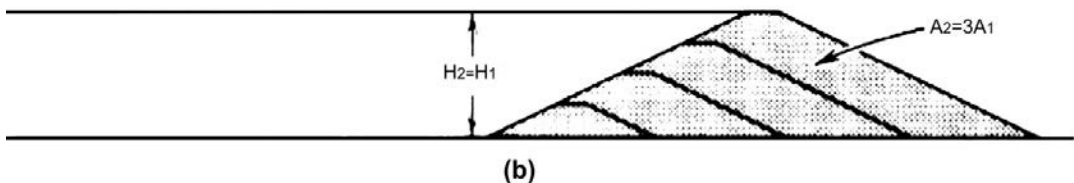


Figura 5. Presa de lodos aguas abajo (Downstream tailings dam) (USEPA, 1994)

produzca dicho proceso. El método de aguas abajo ofrece un grado de estabilidad que no se encuentra en construcción aguas arriba por la capacidad y la facilidad de compactación, la facilidad para incorporar drenajes para bajar el nivel freático y disminuir así la presión de poro.

### *Presa centrada (Centerline tailings dam)*

Los sucesivos mantos del dique construidos con arenas ciclónicas o materiales de préstamo, arrancan del eje del dique, extendiéndose aguas abajo pero manteniéndose en la misma vertical el comienzo del depósito. Por su construcción, permite dejar drenes tipo chimenea en el mismo dique lo que favorece la estabilidad.

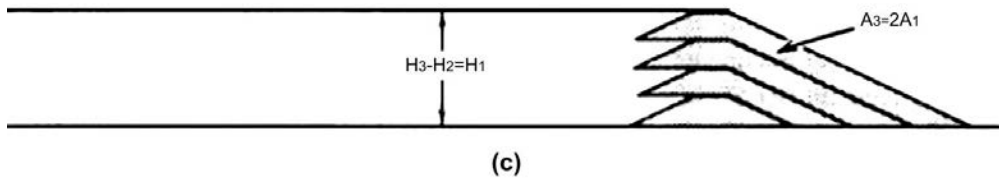


Figura 6. Presa centrada (Centerline tailings dam) (USEPA, 1994)

### 3.3.1.3.2 Clasificación por ubicación

Pueden ser de tres tipos, exentas, en ladera o en valle (Figura 7) y un cuarto caso para lodos espesados o depositados en pasta (Figura 8).

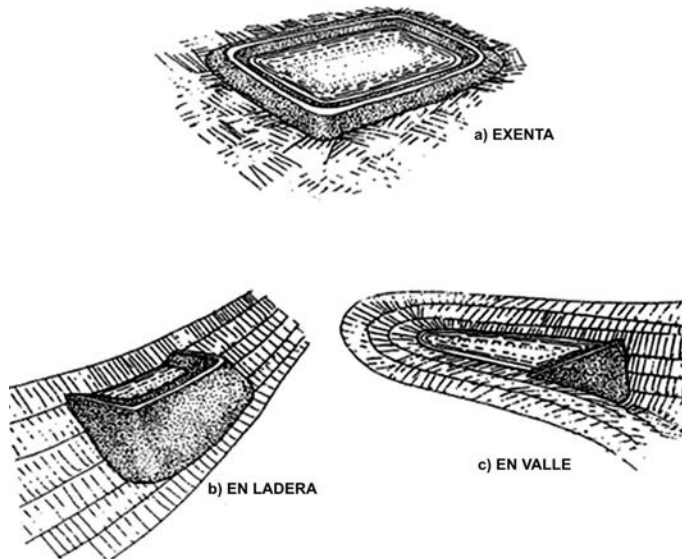


Figura 7. Tipología de presas según su ubicación (Ayala y Rodríguez, 1986)



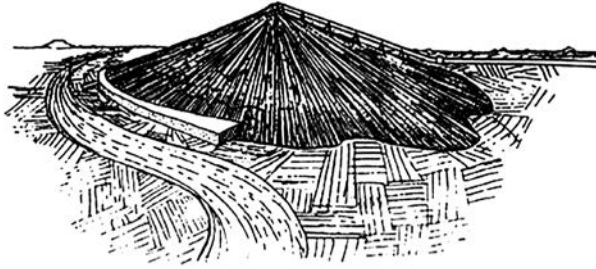


Figura 8. Descarga de lodos espesada (Ayala y Rodríguez, 1986)

### 3.3.1.3.3 Clasificación por punto de vertido

La selección del punto vertido tiene una gran importancia, así, si el vertido se hace en cola (Figura 9), el agua se acumula contra el dique creando flujos de filtración y una cuña de baja resistencia por arrastrar los lodos más finos. Sin embargo, este sistema permite almacenar un mayor volumen si bien requiere un correcto dimensionamiento el dique.

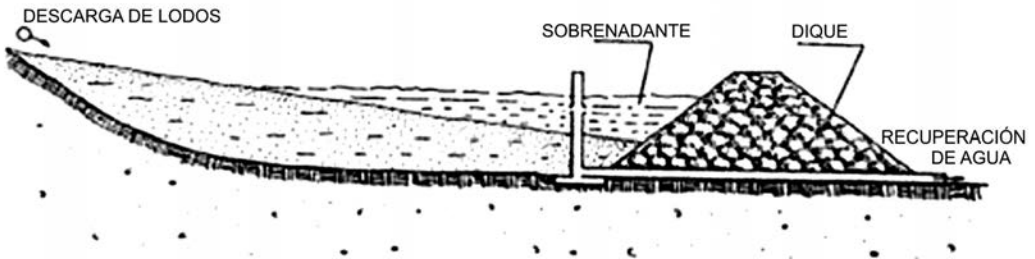


Figura 9. Vertido en cola (Ayala y Rodríguez, 1986)

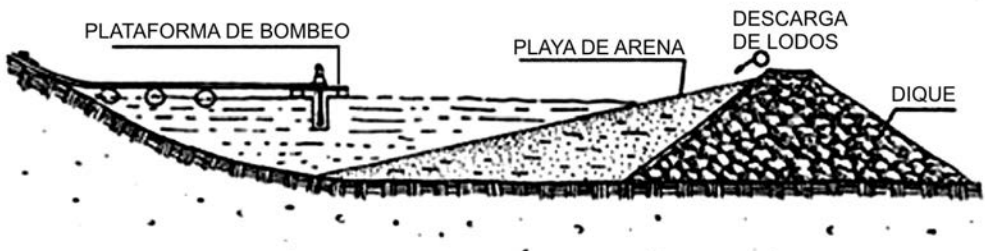


Figura 10. Vertido en dique (Ayala y Rodríguez, 1986)

Si el vertido se hace junto al dique (Figura 10), la estabilidad se ve favorecida, siempre que se cree una playa uniformemente distribuida. Lo mismo puede decirse cuando se efectúa un ciclonado ya que, además de dar más estabilidad al dique, se producen menores filtraciones.

#### 3.3.1.3.4 Clasificación por sistema de drenaje

##### *Drenaje mediante aliviadero*

Suelen ser vertederos de superficie fuera del dique, en terreno firme, que permiten evacuar el agua de lluvia, escorrentía o de los propios lodos. Tiene el inconveniente de que es necesario ir recreciendo la estructura a medida que se recrece el dique. Este sistema es muy poco frecuente. A veces, este sistema se suple por el vertido a una vaguada o cauce lateral, siempre que no haya problemas para la estabilidad de la presa.

##### *Drenaje mediante chimenea*

El sistema de drenaje mediante chimenea es el sistema más tradicional en las presas antiguas. El tipo más generalizado es el de un drenaje exento vertical ubicado en la zona en que se espera que haya agua decantada, comunicado en su base con una galería horizontal que atraviesa la base del dique (Figura 11). La boca de la chimenea se va recreciendo a medida que aumenta la altura de los lodos. Este sistema puede seguir evacuando el agua una vez abandonada la presa pero, una vez que falla, es casi imposible de reparar. Además tiene graves inconvenientes: puede colapsar bajo la presión de los lodos, suele fallar por la unión

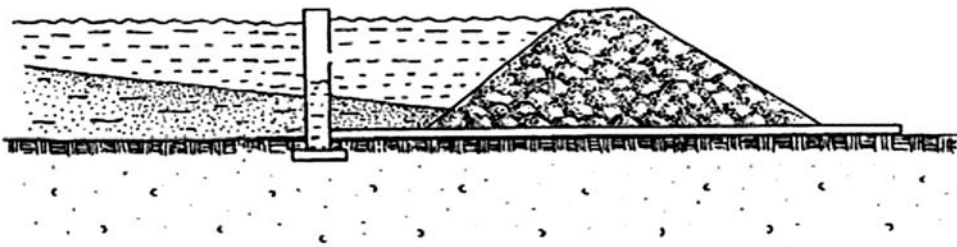


Figura 11. Sistema de drenaje mediante chimenea (Ayala y Rodríguez, 1986)

entre la chimenea y la galería por asentamientos diferenciales, rotura o agrietamiento de la chimenea por empujes descompensados de los lodos o por efectos sísmicos. Estos tres fallos son los más habituales encontrados en presas abandonadas. Existen distintas variantes de este



sistema con chimeneas inclinadas con aberturas, situadas en laderas, que hay que ir cerrando a medida que aumenta el nivel de lodos.

### *Mediante bombeo*

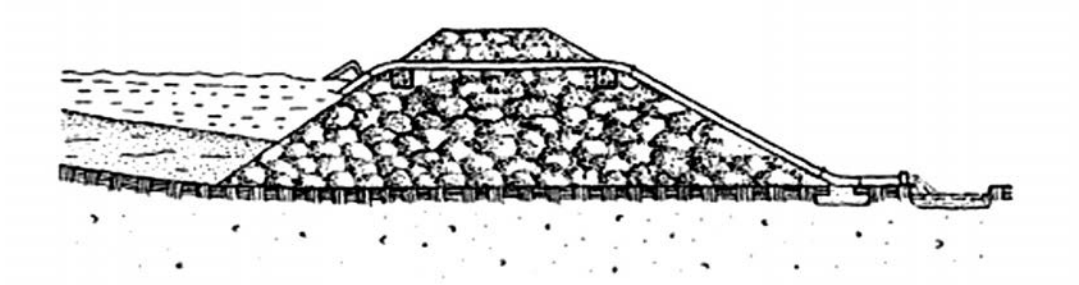


Figura 12. Drenaje mediante sifón hidráulico (Ayala y Rodríguez, 1986)

Puede realizarse mediante plataformas flotantes que ascienden con el nivel de agua o mediante estaciones fijas. Casi siempre debe existir un aliviadero.

### *Mediante sifón*

Se basa en el sistema de sifón hidráulico (Figura 12). Este sistema es muy poco habitual y poco seguro, ya que debe llevar una ventosa en su punto más alto para purgar el aire.

## 4. PROBLEMÁTICA DE LA ESTABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA DE LAS ESTRUCTURAS MINERAS

### 4.1 ESTABILIDAD FÍSICA O GEOLÓGICA

La rotura de una estructura minera (escombreras, pilas de lixiviado y presas) se produce por la pérdida de resistencia al corte de los materiales de la superficie de rotura teórica, de acuerdo con la fórmula:

$$\tau = c + [(\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi]$$

Siendo,  $\tau$  la resistencia al corte;  $c$  la cohesión;  $\sigma'$  la tensión normal efectiva;  $\sigma$  esfuerzo normal total;  $u$ , presión de poro o presión intersticial.

Los mecanismos de rotura más habituales son:

- **Deslizamiento.** Es un movimiento en masa sobre una o varias superficies de rotura al superarse la resistencia al corte en las mismas. El movimiento puede ser progresivo produciéndose generalmente una rotura local (que puede no coincidir con la rotura general). Por lo general, estos deslizamientos son mayoritariamente rotacionales, alrededor de un eje dispuesto paralelamente al talud, a lo largo de una superficie interna de forma circular y cóncava. La masa desplazada puede deslizarse a una distancia variable de la superficie original de rotura pero solapándose con el terreno natural, por lo que su recorrido suele ser escaso (Hunter and Fell, 2003). Este tipo de deslizamientos presenta generalmente una serie de indicios previos a la rotura, como pueden ser abombamientos del talud por acumulación de agua, grietas de tracción en cabecera, etc.

- **Licuefacción.** Por licuefacción se entiende el paso de un estado sólido a líquido como consecuencia de la pérdida de resistencia al corte de los materiales debido al aumento de la presión de poro. La masa se comporta como un líquido pesado con una gran carga sólida que puede desplazarse a altas velocidades, pudiendo recorrer varios kilómetros.

La licuefacción se produce en aquellos suelos sin cohesión o poco cohesivos, con un contenido predominante areno-limoso, aunque también se puede dar en gravas arenosas o arenas con grava, en estado saturado, no drenado, y escasamente compactadas (valores de  $N$  inferiores a 20 golpes en los ensayos SPT). Estos suelos sometidos a esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, o a una sobrecarga que provoque la reducción de los espacios intersticiales por compactación, dan lugar a un aumento de la presión de poro (en situaciones no drenantes) hasta igualar la presión total existente. En este caso la presión efectiva se anula, los granos dejan de estar en contacto, la resistencia al corte desaparece y el material pasa a comportarse como un líquido.

Cuando los esfuerzos cortantes están relacionados con solicitaciones dinámicas producidas por terremotos, voladuras, etc., la licuefacción recibe el nombre de licuefacción dinámica. La licuefacción dinámica en suelos se suele producir con terremotos de magnitud igual o superior a 5,5 y aceleraciones iguales o superiores a 0,2 g y en materiales con las siguientes características: grado de saturación del material del 100%; diámetro medio  $D_{50}$  entre 0,05 y 1 mm (Figura 13); coeficiente de uniformidad  $C_u = D_{60}/D_{10} < 15$ ; contenido en finos inferior al 10%; bajo grado de compactación:  $N < 10$  para profundidades inferior a 10 m y  $N < 20$  para profundidades mayor de 10 m (González de Vallejo et al., 2010). Cuando los suelos se encuentran en una ladera la licuefacción dinámica puede dar lugar a movimientos gravitacionales en forma de flujo (Flow slide).

Hay otro tipo de licuefacción en que las solicitaciones no son de tipo dinámico y que recibe el nombre de licuefacción estática. Al igual que la licuefacción dinámica la licuefacción estática se produce en materiales de las mismas características (poco cohesivos, tamaño arenas y limos, etc). El desencadenante, en lugar de cargas dinámicas, suele ser una sobrecarga debido a acumulación de agua de lluvia, nieve o incluso irrigación, dando lugar a un aumento de la presión de poro que al igualarse a la presión total anula la resistencia al corte del material, siendo nuevamente el resultado una la rotura en forma de flujo.

Las características de los suelos licuefactables se asemejan a las que adquieren determinados residuos mineros en sus estructuras de almacenamiento, especialmente los ripios de lixiviación y los lodos: materiales sin cohesión, escasamente compactados, con granulometría en el rango de tamaños de grano areno-limoso, etc. Esto hace que los residuos mineros respondan de forma similar a los suelos ante solicitaciones dinámicas y estáticas.

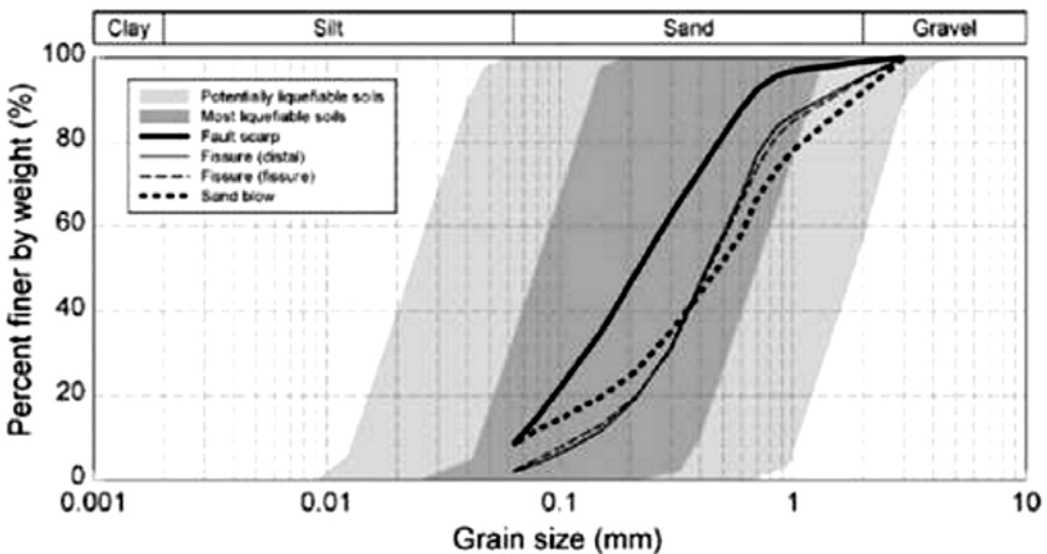


Figura 13. Granulometrías de suelos licuefactables (Xenaqui & Athanasopoulos, 2003)

## 4.2 CONTAMINACIÓN QUÍMICA DE AGUAS CONTINENTALES

Los principales procesos de contaminación química en estériles de minería están relacionados con la presencia de sulfuros metálicos, especialmente de pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Los sulfuros metálicos forman parte de la paragénesis de la mayor parte de los yacimientos metálicos, así como del carbón debido a la propia génesis de éste en condiciones anaerobias. La presencia de pirita en este tipo de yacimientos puede dar lugar a la formación de aguas ácidas de mina (AMD).

*Formación de aguas ácidas de mina (AMD)*

Las aguas ácidas tienen lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y las bacterias como elemento catalizador. La velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno. Aunque la velocidad de reacción depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias, ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras: por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente aguas ácidas.

Los sulfuros de otros metales (plomo, cinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro. En parte, debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y también porque forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación.

Por otra parte, para que se produzcan AMD es necesario que el medio natural no tenga la suficiente alcalinidad para neutralizar la generación de acidez de los estériles de mina. Es

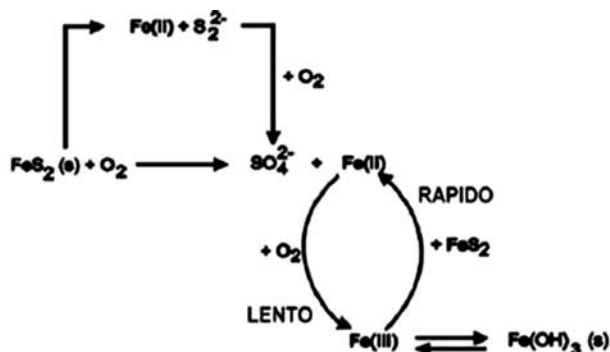
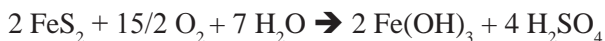


Figura 14. Formación de aguas ácidas de mina

decir, la formación de AMD depende del balance ácido/base. La valoración de la relación ácido/base es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la potencial generación de acidez en rocas y materiales de minas y escombreras, sin embargo, para lograr una mayor exactitud en la evaluación esta información debe correlacionarse con otras variables como: mineralogía, pH y otros.

Por lo general, la producción ácida de un material se mide en función a la presencia de azufre en el mineral o muestra, que en el caso de la piritita tiene la siguiente reacción:



En la reacción anterior se asume la equivalencia de que se producen 2 moles de ácido ( $2\text{H}^+$ ) por cada mol de azufre (S), y estos  $2\text{H}^+$  pueden ser neutralizadas por compuestos básicos según la siguiente reacción:



Por lo tanto, un mol de azufre puede ser neutralizado por un mol de  $\text{CaCO}_3$ . Como los valores de la producción ácida potencial (AP) de la muestra tradicionalmente se expresan en kg de  $\text{CaCO}_3$  por tonelada de material (t), se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{AP} = (\text{X}/100) \cdot 1000 \text{ kg} \times [\text{Peso molecular } \text{CaCO}_3 / \text{Peso atómico S}]$$

La acidez o potencial de acidez (AP) se puede determinar mediante la multiplicación del contenido de azufre total (en porcentaje) o azufre en el sulfuro (dependiendo del ensayo y asumiendo una oxidación completa del azufre) de la muestra por un factor de conversión. Este factor se obtiene al considerar que  $\text{X}/100$  es el porcentaje de azufre (peso molecular del  $\text{CaCO}_3$  es 100 y el peso atómico del azufre es 32), reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$\text{AP} = \text{S}\% \times 31,25 \text{ kg } \text{CaCO}_3 / \text{t}$$

La neutralización potencial (NP) es una medida de la capacidad de neutralización de la acidez que ofrecen los carbonatos primarios, los silicatos minerales y en, menor grado, algunos cationes intercambiables, expresada en términos de kilogramos de  $\text{CaCO}_3$  equivalente por cada tonelada de material que se está evaluando. Las bases neutralizantes se determinan mediante tratamiento con un exceso conocido de ácido clorhídrico. La muestra y el ácido son calentados para asegurar que se completa la reacción entre ácido y sustancias neutralizantes. Al final se obtiene el equivalente en carbonato cálcico de la muestra por determinación de la cantidad de ácido consumido, valorando con disolución estandarizada de hidróxido sódico el exceso de ácido.

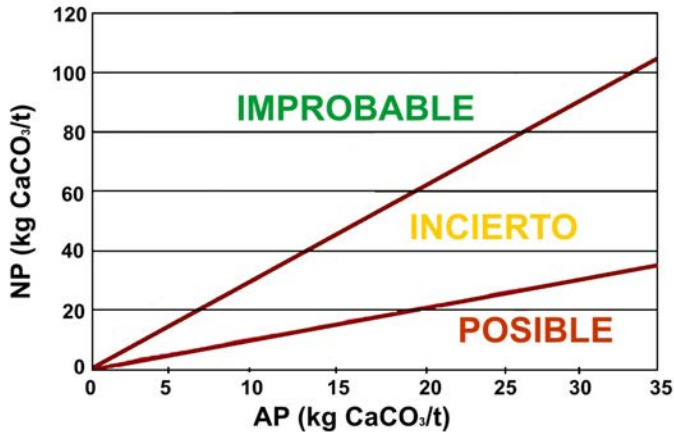


Figura 15. Relación entre los potenciales de neutralización y acidez de residuos mineros

TIPO DE ROCA	CLASIFICACIÓN	CONTENIDO TOTAL DE AZUFRE (% S)	RATIO ÁCIDO/ BASE (MPA/ANC)
I	Potencial formador de acidez (posible)	> 0,25 %	1:1 ó menos
II	Indeterminado (Incierto)	> 0,25 %	1:1 a 1:3
III	No forma acidez (Improbable)	< 0,25 %	1:3 ó más

Tabla 1. Clasificación ácido/base de rocas mediante ensayos estáticos (Environment Australia, 1997)

La probabilidad de la formación de AMD se calcula en función de la relación ácido/base y/o contenido de azufre (Figura 15 y Tabla 1). Una vez que el medio natural no tiene suficiente capacidad de atenuación, la consecuencia del AMD es la formación de precipitados metálicos, principalmente de óxidos de hierro y oxihidroxisulfatos de hierro (Fotografía 6) y aluminio (Fotografía 7) en función del pH, Eh, contenido en hierro, aluminio y sulfatos y la ratio  $\text{Fe}:\text{SO}_4^{-2}$ , entre otros.

Aunque la identificación de especies minerales en AMD es algo dificultosa, debido a que la mayoría de los precipitados son de baja cristalinidad, la coloración es indicativa de los que pueden estar presentes y que se diferencian en tres grupos (Kim et al., 2003; Murad et al., 2003):

#### Formación de precipitados

- Precipitados de color rojo-marrón: principalmente corresponden a ferrihidrita y pequeñas cantidades de goetita, el rango de pH en el que se forman va desde 4 a 5,5 y en algunos casos





Fotografía 6. Formación de AMD y precipitados de hierro en corta de carbón

cercanos a pH neutro, su contenido mayoritariamente es de 75 a 81% de Fe y de 16 a 20% de  $H_2O$ . La ferrihidrita se forma por oxidación rápida e hidrólisis de  $Fe^{2+}$  y, debido a que es poco estable, se transforma espontáneamente a goetita que es más estable en condiciones aerobias.

- Precipitados de color naranja-amarillo: la especie mineralógica dominante es la schwertmannita, su rango de pH esta entre 2,8 y 4,5 y en su composición se encuentra un 50 a 60% de Fe, de 11 a 15% de  $SO_3$ , de 18 a 25% de  $H_2O$  y otros.

- Precipitados de color blanco: por lo general corresponde a oxihidroxisulfatos de Al pobremente cristalizados (siendo el más común la hidrobasaluminita), con un rango de pH próximo a 5 y un contenido mayoritario compuesto de 41 a 45% de  $Al_2O_3$ , de 16 a 18%  $SO_3$  y de 18 a 25% de  $H_2O$ .

### *Formación de eflorescencias de sulfatos minerales*

Otras fases minerales que se forman, como consecuencia de la evaporación parcial de soluciones ácidas concentradas, producto de la oxidación de la pirita y de la alteración de silicatos, son los sulfatos minerales concentrados. Son de aspecto y colores variados (blanco, amarillo, verde, marrón), muy solubles, se encuentran en los bordes de los cauces, cubriendo superficies de escombreras, presas, pilas, etc.

Entre la gran variedad de sulfatos minerales hidratados principalmente se encuentran: la coquimbita ( $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ ), melanterita ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), copiapita ( $Fe^{2+}(Fe^{3+})_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot$



Fotografía 7. Precipitados y coloides de oxihidroxisulfatos de aluminio en una arroyo a pH 4,6 – 5

$20\text{H}_2\text{O}$ ), rozenita ( $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), halotriquita ( $\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y otras. Son altamente solubles y obedecen a un ciclo de lluvias y tiempo seco, en épocas de lluvia se redisuelven cargando los ríos y arroyos de sulfatos y metales, y, en el caso de las sales de hierro y aluminio vuelven a producir acidez.



Fotografía 8. Formación de sales evaporíticas en escombreras de finos de lavadero de carbón





Fotografía 9. Autocombustión de una escombrera de carbón

### *Fenómenos de autocombustión*

Otro de los procesos, exclusivo de escombreras de carbón es el de la autocombustión. La autocombustión o ignición espontánea se produce como consecuencia de la presencia de restos de carbón en las escombreras de estériles de este mineral, debido a un proceso de auto-calentamiento como consecuencia de oxidación exotérmica lenta de materiales carbonosos. Generalmente, la ignición espontánea del carbón suele estar retroalimentada por la oxidación de la pirita que acompaña a los estériles y al propio carbón. La oxidación de la pirita es también una reacción fuertemente exotérmica lo que incrementa el riesgo de la combustión espontánea del carbón.

#### 4.2.1 EFECTOS DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA SOBRE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

La acidificación de las aguas y la formación y decantación de las fases minerales anteriormente citadas en forma de precipitados y geles en el fondo de ríos y arroyos, afecta gravemente a la fauna macrobiótica del río y a su cadena trófica (algas del perifiton, macroinvertebrados, peces, etc.) pudiendo llegar a su desaparición, bien por destrucción de su hábitat o por su ecotoxicidad.

La acidificación de las aguas conlleva una reducción del pH. La mayoría de los organismos tienen definido un rango de tolerancia de pH, por debajo del cual se produce la muerte debido a un fallo respiratorio u osmoregulador (Kimmel, 1983), como consecuencia de la alteración del balance de los iones de sodio y cloro en la sangre de los organismos acuáticos. Los iones de

hidrógeno penetran en el interior de las células expulsando los iones sodio (Morris et al., 1989). Este efecto directo de una disminución del pH tiene un mayor impacto sobre los invertebrados acuáticos que el efecto indirecto sobre las fuentes de alimentación (Rosemond et al., 1992); se ha comprobado que a bajo pH se produce una ralentización de la actividad microbiana (Hall et al. 1980) y, por ello, una disminución de las ratios de descomposición de la materia orgánica en aguas acidificadas (Townsend et al. 1983), que se traduce en una menor disponibilidad de nutrientes y una reducción del flujo de energía en la cadena trófica.

La ecotoxicidad de los metales disueltos en el agua tiende a ser mayor y más severa con valores de pH bajos que en condiciones circumneutrales (Cravotta, 2009). La acidificación de las aguas a  $\text{pH} < 5.4$ , y las elevadas concentraciones de metales disueltos en la columna de agua y en el agua intersticial de los sedimentos resultan ser muy tóxicos para peces e invertebrados acuáticos, a lo que hay que añadir el efecto negativo de los precipitados de oxihidróxidos y oxihidroxisulfatos metálicos, especialmente los de tamaño coloidal, sobre la calidad del sustrato y sobre las funciones vitales de los organismos acuáticos (asfixia por obstrucción y abrasión de branquias, etc.).

ARROYOS NO IMPACTADOS POR AMD AGUAS ARRIBA DE LA DESCARGA DE UN AMD	Diversidad de órdenes de insectos Abundancia de taxones EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera). Variedad de especies de peces.
DESCARGA DE UN DRENAJE ÁCIDO DE MINA (AMD.) $\text{pH} < 3,5$ . Alta concentración de Fe disuelto	
ARROYO CON $\text{pH} 3.5 - 4.5$ PRECIPITADOS DE Fe	Eliminación de la mayoría de los taxones EPT Dominancia de dípteros (familia Chironomidae) Se encuentran Megalópteros: Familia Sialidae ( <i>Sialis</i> ) y Corydalidae ( <i>Nigronia</i> ). Coleópteros: Familia Dysticidae. Hemípteros: Familia Corixidae. Algas: <i>Euglena</i> , <i>Ulothrix</i> , <i>Pinularia</i> , <i>Eunotia</i> . Ausencia de peces:
RECUPERACIÓN LIMITADA DEL ARROYO Ph $4.5 - 5.5$	Están representados más órdenes de insectos. Plecópteros: Familia Leuctridae ( <i>Leuctra</i> ), Familia Nemouridae ( <i>Amphinemura</i> ). Tricópteros: Familia Hydropsychidae ( <i>Diplectrona</i> ), Familia Lepidostomatidae ( <i>Lepidostomis</i> ), Familia Polycentropodidae ( <i>Polycentropus</i> ). Dípteros. Familias Simuliidae y Tipulidae. En el rango de pH más alto: Efemerópteros: Familia Siphonuridae ( <i>Ameletus</i> ). Presencia de peces: <i>Salvelinus fontinalis</i> , <i>Rhinichthys atratulus</i> , <i>Catostomus commersonii</i> , <i>Semotilus atromaculatus</i> .

<p>ZONA DE RECUPERACIÓN DEL ARROYO pH 5.7 – 6</p>	<p>Incremento de taxones EPT: Plecópteros: Familia Perlidae (<i>Acroneuria</i>). Efemerópteros: Familia Heptageniidae (<i>Stenonema</i>); Familia Ephemerellidae (<i>Ephemerella funeralis</i>). Algas: Diatomeas, algas flageladas, algas verdes, cianobacterias (género <i>Oscillatoria</i>)</p>
<p>ARROYO CON UNA RECUPERACIÓN AVANZADA pH &gt; 6</p>	<p>Aumento de la variedad de taxones EPT: Efemerópteros: Familias Ephemerellidae (<i>Ephemerella</i>, <i>Attenella</i>), Baetidae (<i>Baetis</i>, <i>Acentrella</i>), Isonychiidae (<i>Isonychia</i>). Tricópteros: Familia Hydropsychidae (<i>Hydropsyche</i>). Variedad de especies de peces.</p>
<p>ARROYOS AFECTADOS POR DRENAJES DE MINA ALCALINOS. pH &gt; 6 PRECIPITADOS DE Fe</p>	<p>Variedad de taxones EPT, pero con baja abundancia. Efemerópteros: Familia Ephemerellidae (<i>Ephemerella</i>), Baetidae (<i>Baetis</i>, <i>Acentrella</i>). Plecópteros: Familia Perlidae (<i>Acroneuria</i>, <i>Paragnetina</i>), Leuctridae (<i>Leuctra</i>), Tricópteros: Familia Hydropsychidae (<i>Cheumatopsyche</i>, <i>Hydropsyche</i>). Otros órdenes: Coleópteros Familia Elmidae; Megalópteros: Familia Corydalidae (<i>Corydalus</i>). Variedad de especies de peces. Baja abundancia.</p>

Tabla 2. Secuencia de la evolución de las comunidades biológicas asociadas a cursos fluviales afectados por drenajes de mina (AMD o alcalinos) hasta su recuperación (modificado de Roback and Richardson, 1969; Parsons, 1968; Warner, 1971; Kimmel, 1983; Earle and Callaghan, 1998)

#### 4.2.1 Clasificación de las aguas ácidas

Para describir las aguas ácidas de mina se ha seguido el diagrama establecido por Ficklin y Plumlee (Ficklin et al., 1992) que clasifica las aguas en función del pH y la suma de las concentración de los metales (Zn + Cu + Cd + Pb + Co + Ni) expresados en µg/L (Figura 16).

#### 4.3 SUSTANCIAS UTILIZADAS EN LAS PLANTAS DE CONCENTRADO O BENEFICIO DE MINERALES

El tratamiento más generalizado en minería metálica, es la separación por flotación. Para entender y poder identificar las características de los reactivos utilizados en flotación, hay que hacer una clasificación de éstos. Los reactivos utilizados en la flotación se clasifican, según sus funciones, en surfactantes (colectores y espumantes) y modificadores (Tabla 3).

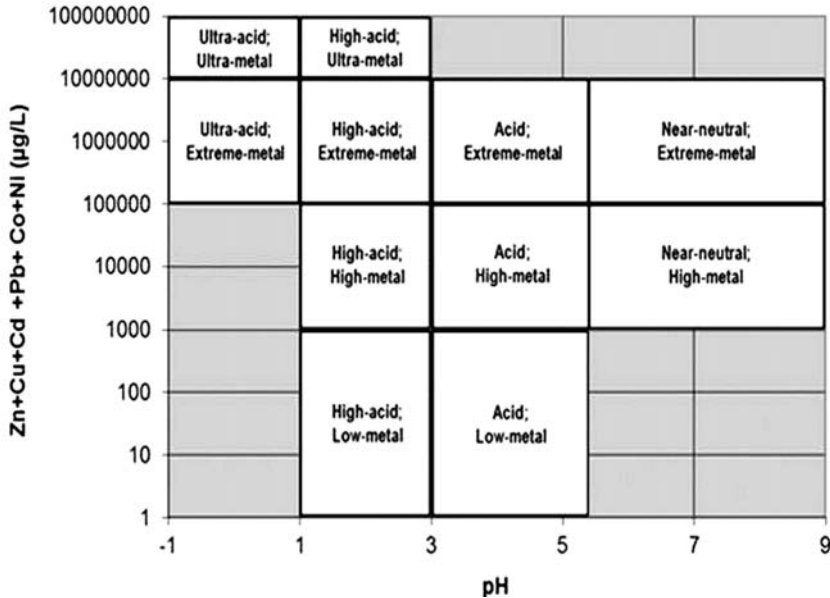


Figura 16. Clasificación de aguas de mina

La función de los surfactantes es doble. Primero, se adsorben en la interfase sólido-líquido volviendo hidrofóbica la superficie de los minerales. Segundo, influyen en la cinética de la adhesión burbuja-mineral actuando como espumantes. Los modificadores, tales como activadores, depresores o modificadores de pH, se usan para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre la superficie del material.

#### *Surfactantes: colectores y espumantes*

Todos ellos son compuestos orgánicos: tio-compuestos, compuestos ionizables no-tio y compuestos no-iónicos.

- Tio-compuestos: Xantatos (etil xantato de sodio, butil xantato de sodio, amil xantato de sodio, etc); ditiolfosfatos, ditiocarbamatos, mercaptanos, mercaptobenzotiazol.

- Compuestos ionizables no-tio: Carboxilatos, sulfatos de alquil, sulfonato de alquil, fosfatos de alquil y aminas. Los primeros son ácidos (R-COOH), tipo ácido oleico; los segundos son del tipo R-SO<sup>3</sup>M<sup>+</sup>; los terceros R-SO<sup>3</sup>M<sup>+</sup>; los cuartos (mono alquil y dialquil); las aminas R-NH<sub>2</sub>, donde R son cadenas de hidrocarburos.

- Compuestos no-iónicos: alcoholes (R-OH), éteres (R-O-R'), derivados polioxietilénicos de alcoholes y grupos surfactantes, derivados polioxipropilénicos de alcoholes y grupos surfactantes. Entre los más utilizados se encuentran: aceite de pino, ácido cresílico, alcoholes (metil, isobutil, carbonilo, 2 etil, hexanol, etc.).

*Modificadores: activadores y depresores*

Son generalmente compuestos inorgánicos:

- **Activadores:** sulfato de cobre, que se utiliza en la flotación de la esfalerita; nitrato o acetato de plomo, para la estibinita, silicatos y carbonatos; sulfuro de sodio, para minerales oxidados; sulfuro de hidrogeno, para precipitar cobre en solución.
- **Depresores:** cianuro de sodio, para pirita, pirrotina, marcasita y arsenopirita, en general para todos los sulfuros, con la posible excepción de la galena; cal, para la pirita y otros sulfuros de hierro, galena y cobre; sulfato de cinc, que se usa junto con el cianuro o solo para deprimir esfalerita, mientras flota el plomo y minerales de cobre; permanganatos, para la depresión selectiva de pirrotina y arsenopirita en presencia de pirita; ferrocianuro, para la depresión de sulfuros de cobre en la separación cobre/molibdeno.
- **Reguladores del pH:** especialmente los sulfuros presentan un pH determinado para la flotación y, para modificarlo, se utiliza cal, carbonato de sodio, etc.

Mineral	Reactivos		
	Espumantes	Colectores	Modificadores
Sulfuro de cobre: calcosina, calcopirita, covelina, etc.	Aceite de pino	Xantato de etilo o aerofloat (Ditiofosfato Dii-sopropílico de sodio)	Cal, cianuro cuando hay mucha pirita
Sulfuros de cobre, plomo, cinc	DF-250 (propileno glicol)	Xantato	Cianuro, bicromato de sodio
Sulfuro de plomo: galena o galena con blenda	Ácido cresílico o aceite de pino y creosota	Xantato o aerofloat	Cianuro de sodio con o sin sulfato de cinc
Sulfuro de cinc: blenda	Aceite de pino o Ácido cresílico	Xantato o aerofloat	Sulfato de cobre y cal cuando hay pirita
Baritina y fluorita	Ácido oleico y linoleico	ácido tánico o tanino de quebracho	Carbonato de sodio
Carbón	Metil isobutil carbinol (MIBC)	Aceites minerales (diésel, mezcla de hidrocarburos: queroseno y gasóleo)	

Tabla 3. Sustancias utilizadas en las plantas de concentración o beneficio según el tipo de mineral

*Toxicidad de los productos de la flotación:*

- **Muy tóxicos:** colectores tiólicos, sulfonatos, aminas, cianuros, aceites minerales.
- **Moderadamente tóxicos:** espumantes alcohólicos.

## 5. ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS

Como norma general, la determinación del coeficiente de seguridad implica el uso de los métodos habituales de mecánica de suelos, teniendo en cuenta las eventuales redes de filtración. Debe advertirse que el cálculo riguroso exigiría tener en consideración la anisotropía de los escombros, las variaciones de resistencia con los niveles de tensiones en cada punto de la eventual superficie de deslizamiento, los efectos de forma, etc. Sin embargo, no está justificado tal refinamiento dado el tipo de estructura y la gran incertidumbre respecto a la naturaleza de los escombros y sus variaciones a lo largo de la vida de la estructura.

En el análisis y diseño de las escombreras, se suele determinar la resistencia al corte de los materiales de éstas suponiendo el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb, sin cohesión y con un ángulo de rozamiento igual al ángulo de reposo natural de los materiales de la escombrera. Esta teoría relativamente simple para la evaluación de la resistencia al corte se puede considerar válida para escombreras de pequeño a medio tamaño, donde las tensiones internas son bajas en comparación con la resistencia de la roca intacta. Además, se ajusta a los materiales de escombrera que contienen una cantidad limitada de finos (menor del 10 %) y que no estén sometidos a degradación.

Este tipo de caso permite un tratamiento directo y específico para calcular el coeficiente de seguridad en materiales sin cohesión o poco cohesivos, este viene dado por:

$$F = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta}$$

Siendo  $\Phi'$  el ángulo de rozamiento interno efectivo y  $\beta$  el ángulo de talud. Para establecer este criterio debe garantizarse que la red de filtración no incide sobre el talud o que la altura saturada no excede del 40 % de la altura máxima.

Si se establecen filtraciones, deben estimarse las posibles líneas de corriente. Simplificando el problema para el caso de filtraciones paralelas (Figura 17), el factor de seguridad se puede expresar como:

$$F = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta} \cdot \left( 1 - \left( \frac{z_w}{h} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \right)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico de los escombros,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $h$  la altura del manto de escombros y  $z_w$  la altura vertical del nivel de un punto de la línea de corriente.

Los fenómenos de inestabilidad en escombreras pueden ser de varios tipos:

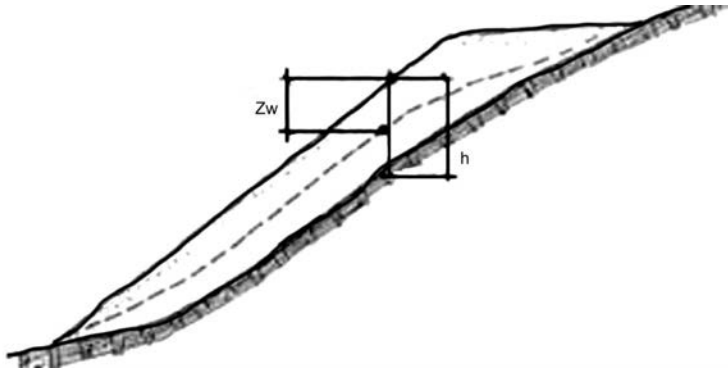


Figura 17. Simplificación de filtración paralela

- Deslizamientos superficiales. Son típicos de materiales sin cohesión. Normalmente no suelen afectar a grandes volúmenes, salvo que se produzca una alteración superficial de su geometría, por ejemplo por socavación de su pie.

- Deslizamiento por el cimient. En muchos casos la estabilidad de la escombrera viene condicionada por la resistencia al corte del contacto con el terreno natural. La situación es especialmente crítica cuando dicho contacto está inclinado (escombreras de ladera) y el terreno es de tipo arcilloso o margoso saturado, con ángulos de rozamiento efectivo inferiores a  $20^\circ$ .

- Deslizamientos profundos con roturas circulares o mixtas, con tramos paralelos a un contorno de base (Figura 18). Suelen tener una evolución en el tiempo y están condicionados por fenómenos de fluencia, rotura progresiva, etc. Afectan a volúmenes importantes de estériles y predomina en materiales con cohesión. Se pueden dar dentro de la misma masa de la escombrera e incluir parte del subsuelo o cimient sobre el que se apoya.

Estos fenómenos de inestabilidad pueden ser debidos a sobrecarga en la cresta de la escombrera, excavación hidráulica o mecánica del pie de los materiales de vertido, ciclos de congelación y descongelación, etc. (Figura 19). En cualquier caso, el principal desencadenante de la inestabilidad de una escombrera es el agua, pues su aparición produce un aumento de la presión de poro y con ello disminuye la resistencia al corte de los materiales. La presencia de agua en el interior de una escombrera puede deberse a agua acumulada debido a acuíferos colgados, surgencias, agua de lluvia, aumento del nivel freático por capilaridad de un acuífero superficial, etc.

La presencia de agua en los materiales de una escombrera da lugar a efectos negativos en la estabilidad de los mismos por las siguientes razones (Ayala et al., 2006):

- La presión del agua reduce la estabilidad del talud, disminuyendo la resistencia a la rotura de determinadas superficies; la presión del agua en las grietas de tracción reduce la estabilidad, incrementando las fuerzas que tienden al deslizamiento.

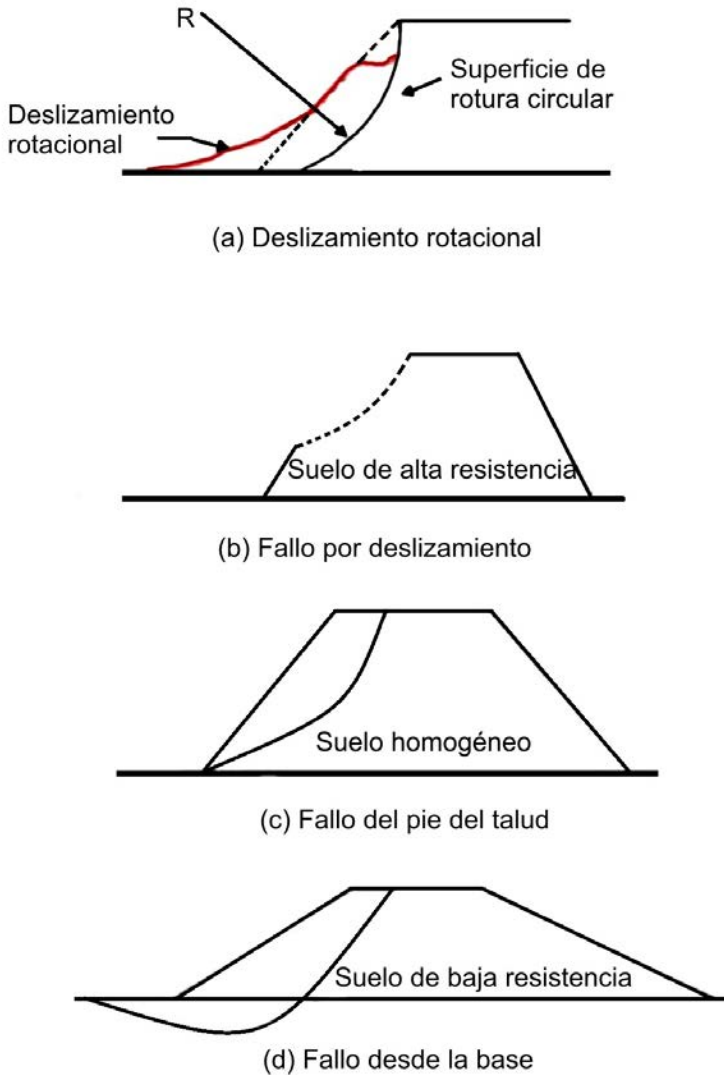


Figura 18. Tipología de deslizamientos circulares (Charanpreet, 2009)

- Los contenidos altos de humedad dan lugar a un incremento en el peso del terreno; los cambios del contenido de humedad de algunos materiales pueden dar lugar a procesos rápidos de meteorización, con el consiguiente efecto en la estabilidad del talud.
- El agua congelada durante el invierno puede dar lugar a aperturas de discontinuidades, como consecuencia de los cambios de volumen que experimenta y a bloquear los canales o conductos de drenaje incrementando, con todo ello, la inestabilidad.



- La escorrentía superficial y la lluvia producen erosión externa de los materiales, sobre todo de los blandos, mientras que el flujo de agua bajo la superficie del talud puede ocasionar la erosión del terreno y del relleno de fisuras y grietas, afectando también a las condiciones de estabilidad.

- En el caso de que las presiones intersticiales del agua presentes en los materiales alcancen el valor de las presiones totales, puede tener lugar una licuefacción en materiales cohesivos, al anularse las presiones efectivas. Esto se produce bajo determinadas circunstancias con solicitaciones dinámicas (terremotos y voladuras) y estáticas (sobrecarga).

- La presencia de agua en los materiales que forman los taludes puede inducir cambios en la composición mineralógica de los mismos.

En campo, los principales indicios de inestabilidad de una escombrera están relacionados con: sobrecarga anormal en el borde o cresta de la escombrera; grietas de tracción y/o asentamientos en la parte superior de la escombrera; deslizamientos superficiales en el talud de la escombrera debido, principalmente, a materiales acumulados sin cohesión; abombamientos en la parte baja de la escombrera, debido a un nivel freático alto, surgencias, agua de lluvia acumulada, etc.

Un caso muy especial, por sus efectos catastróficos, es el que puede darse en determinadas escombreras, especialmente en carbón, los denominados Flujos de escombros (Flow slide).

Las escombreras con mayor susceptibilidad a este fenómeno vienen constituidas por gravas arenosas y arenas con las siguientes características:

- Grava con una distribución de tamaño de grano  $D_{50}$  (1-10 mm)
- Materiales saturados poco consolidados
- Materiales con índice de poro  $> 0,3$
- Pendiente del cimientado superior a  $15^\circ$
- Sobrecarga (grandes alturas)

No obstante, de acuerdo con Dawson y Eckerseley, este tipo de movimientos gravitacionales en forma de flujo se pueden dar en arenas limosas con pendientes superiores a  $30-34^\circ$ , y en gravas arenosas en escombreras de carbón y escombreras de carbón de coque con trazas de limos finos (menos de 5-10% de partículas de tamaño inferior a  $75 \mu\text{m}$ ) e índice de poro mayor de 0,3 (Dawson 1994; Eckerseley 1986).

Este tipo de flujo gravitacional está estrechamente relacionado con fenómenos de licuefacción estática. El material del flujo viene constituido por fragmentos rocosos: cantos y

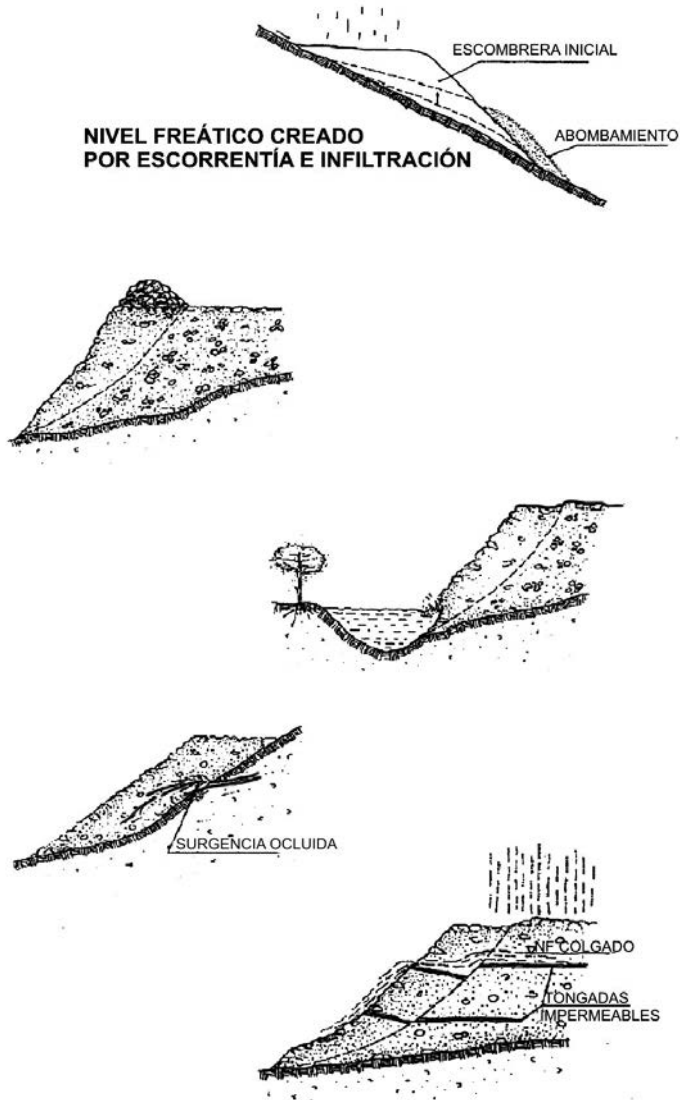


Figura 19. Principales causas de inestabilidad de escombreras (Ayala y Rodríguez, 1986)

gravas englobados en una matriz de arenas y limos (debris flow). Es un movimiento rápido de una masa saturada o casi saturada ( $S > 80\%$ ) que desliza ladera abajo pudiendo alcanzar varios kilómetros de distancia. El caso más conocido de licuefacción estática se produjo en Aberfan (Gales), en 1967, produciendo la muerte de 144 personas.

La pendiente del cimienta tiene una alta importancia en el caso de la licuefacción de las escombreras de carbón; en el caso de las escombreras de carbón de Columbia Británica, la

pendiente del cimientto era de 25° y de 17° en las de Sur de Gales. Todos los casos conocidos de licuefacción se han producido durante o después de intensas lluvias, nieve, etc., en materiales poco consolidados mediante vertido desde cable o vagoneta a pie de mina. En estos casos, las situaciones de saturación o cercanas a la saturación son un requisito para la licuefacción estática. En el sur de Gales el 55% de las escombreras tenían el pie en un manantial o en un arroyo. Es posible que la lluvia o la nieve, en el caso de Columbia Británica, fuera suficiente para saturar la fracción más fina de arena y grava en la cual la licuefacción puede ocurrir. En el sur de Gales la saturación de esta fracción fue, probablemente, consecuencia de lluvias intensas y a la baja permeabilidad del cimientto. En Aberfan, los piezómetros colocados cerca de la base de la escombrera registraron excesos de presión de poro por encima de los tres metros tras un evento de lluvias intensas, manteniendo este nivel durante uno o dos días (Bishop et al 1969).

El fenómeno está, por tanto, condicionado por la altura de la escombrera, una elevada pendiente del cimientto (>15°), alta proporción de fracción de arenas y gravas (0,1-10 mm), escasa proporción de materiales cohesivos, alto grado de saturación (S>80) y materiales poco consolidados (generalmente, por vertido desde poca altura); otro factor que puede tener gran importancia es la existencia de cimienttos con alta presión de poro o con presencia de manantiales y arroyos, etc.

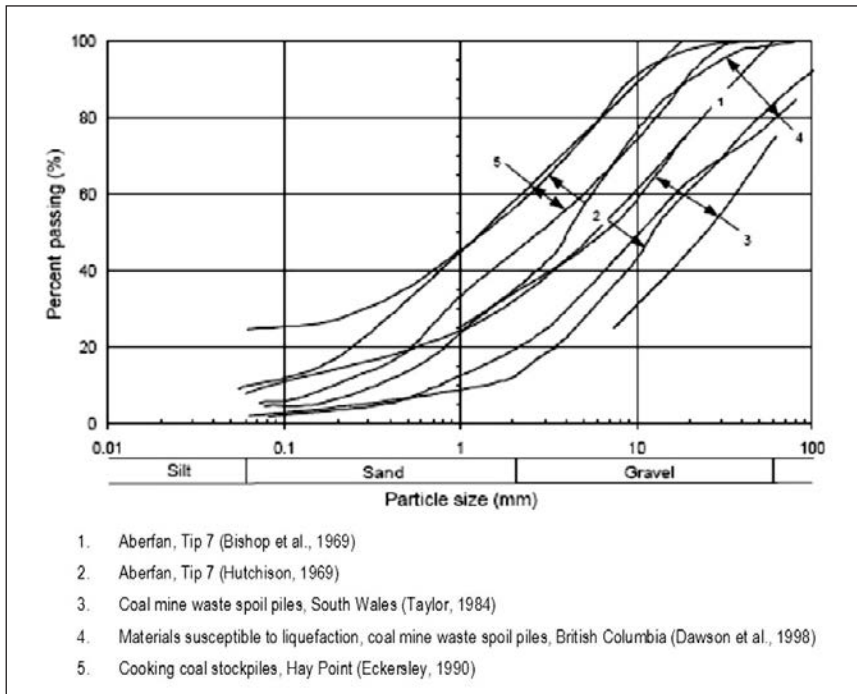


Figura 20. Distribución del tamaño de partícula de escombreras de carbón y carbón de coque susceptibles de haber sufrido licuefacción estática (Hunter et al., 2001)

## 5.1 CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD

Como ya hemos comentado anteriormente, el cálculo de estabilidad en escombreras conlleva una alta complejidad y falta de representatividad. Por otra parte, debido a cuestiones de tipo económico y logístico, no se ha considerado justificado incluir en el inventario el cálculo de estabilidad.

En su defecto, se opta por la realización de cálculos cualitativos mediante criterios y observacionales de estabilidad. En nuestro caso, se ha optado por elaborar un índice de peligrosidad con distintos pesos en función de aquellos parámetros que tienen mayor influencia en la estabilidad de la escombrera (tabla 4). Como puede observarse se ha prescindido de valorar la susceptibilidad a la licuefacción dado que para que se produzca este fenómeno en escombreras se necesita que el material esté escasamente consolidado, típico de vertidos desde vagoneta, cable, cinta, etc., siendo este tipo de vertido escasamente o nada representativo en las escombreras inventariadas.

## 1. Características intrínsecas y constructivas de la escombrera

1.1	Inclinación (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Talud general escombrera	$\geq 37$	6	
	36-33	3	
	$< 33$	0	

1.2	Altura (m)	Puntuación Parcial	Puntuación
Altura máxima escombrera	$\geq 100$	6	
	99-50	3	
	49-25	1,75	
	$< 25$	0	

1.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Sistema de vertido	Vertido libre desde vagoneta, cinta, cable, etc	3	
	Vertido libre desde camión	1,5	
	Vertido en tongadas	0	

1.4		Puntuación Parcial	Puntuación
Durabilidad del material vertido	Material de baja durabilidad. Más de un 25 % de finos	4	
	Material de durabilidad variable. Entre un 10 y un 20% de finos	2	
	Rocas de alta durabilidad o poco meteorizables. Menos de un 10 % de finos. Rocas que han sufrido autocombustión	0	

1.5		Puntuación Parcial	Puntuación
Sistemas de drenaje (drenes de núcleo central, de fondo, etc) dimensionados y en funcionamiento	No	3	
	Si	0	

## 2. Sustrato o cimentación

2.1	Inclinación (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Pendiente sustrato	≥ 25	6	
	24-20	3	
	19-15	1,5	
	<15	0	

2.2		Puntuación parcial	Puntuación
Material del sustrato	Suelo poco consolidado.	4	
	Suelo rígido o roca blanda.	2	
	Roca sana.	0	

## 3. Comportamiento geotécnico de la escombrera

3.1		Puntuación Parcial	Puntuación
Grietas	Grietas de tracción profundas, asentamientos, socavación pie.	4	
	Alguna evidencia (grietas poco profundas, deslizamientos locales, etc.)	2	
	No hay	0	

## 4. Entrada y evidencia de agua en la escombrera

4.1	Precipitación (mm/año)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación media anual (mm/año)	>800	4	
	800-500	2	
	<500	0	

4.2	Precipitación (mm/día)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación máxima en 24 horas (mm/día) para un periodo de retorno de 100 años	$\geq 125$	4	
	124-100	2	
	99-50	1	
	<50	0	

Fuente: Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Ministerio de Fomento

4.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Sistema de desvío perimetral de aguas de lluvia	No hay	3	
	Parcial e insuficiente	1,5	
	Adecuado y en buen estado	0	

4.4		Puntuación parcial	Puntuación
Evidencia de agua dentro de la estructura	Indicios de depósito saturado. Presencia de agua en el talud. Presencia de agua no ocasional en la plataforma de la escombrera. Pie de escombrera dentro del agua de arroyos o ríos. Presencia de vegetación hidrófila (juncos, eneas, phragmites)	6	
	Pie de escombrera en zona de inundación con exclusión casos anteriores	3	
	Depósito seco o casi seco	0	

4.5		Puntuación Parcial	Puntuación
Cárcavas de erosión	Profundas.	3	
	Alguna evidencia	1,5	
	No hay	0	

## 5. Riesgo sísmico

5		Puntuación Parcial	Puntuación
Aceleración sísmica básica	> 0,16	3	
	0,16-0,12	1,5	
	0,12-0,08	0,75	
	< 0,08	0	

Mapa de peligrosidad sísmica. Norma sismorresistente



## 6. Índice de peligrosidad (Peligrosidad)

Suma de las puntuaciones	>40	Muy Alta
	40-35	Alta
	35-25	Media
	<25	Baja

Tabla 4. Cálculo del índice de peligrosidad de escombreras



## 6. ESTABILIDAD DE PILAS DE LIXIVIADO

### 6.1 ESTABILIDAD FÍSICA O GEOLÓGICA

Este tipo de estructuras tiene escasa representación en España. Las dos pilas de lixiviación inventariadas: Tharsis (Huelva), Rodalquilar (Almería) (Llorente, 1991) son pilas de lixiviación de oro mediante cianuración de escasa altura en comparación con las de Chile o Perú, donde pueden alcanzar alturas superiores a 100 m. El tamaño de grano, generalmente inferior a 3/4 de pulgada, la altura, el alto grado de saturación debido a la irrigación del material y su depósito sobre una capa aislante de poliuretano les hace estructuras susceptibles a la licuefacción.

La inestabilidad en este tipo de estructuras puede ser desencadenada por seísmos o sobrecarga, generándose fenómenos de licuefacción dinámica y estática, respectivamente.

La susceptibilidad a inestabilidades en forma de flujo por licuefacción estática sigue las pautas anteriormente comentadas para el caso de las escombreras (grado de saturación, materiales poco consolidados, pendiente de la pila de lixiviado, pendiente del cimiento, altura, sobrecarga, etc). En el caso específico de las pilas de lixiviado, la altura suele ser superior a los 100 m; están saturadas debido al propio proceso de lixiviación por irrigación; la granulometría suele ser inferior a las 1/2 de pulgada; la base esta impermeabilizada mediante láminas de poliuretano que actúa como superficie de despegue, bien con la parte infrayacente (generalmente arcillas impermeables), bien con la parte superior a la lamina de geotextil (arcillas y gravas) (Tabla 4). En estas condiciones, cualquier sobrepeso por aumento de la altura, lluvias o nieves continuadas o acumuladas en escaso periodo de tiempo, puede desencadenar un fenómeno de licuefacción y la inestabilidad de la pila en forma de flujo (Fotografía 10).

Altura total	$\geq 100$ m
Pendiente sustrato (cimentación)	$\geq 15^\circ$
Pendiente de bancos intermedios	Ángulo de reposo o próximo
Contenido de humedad de la mena amontonada	$\geq 5\%$
Permeabilidad de la mena amontonada	$\leq 1 \times 10^{-2}$ cm/seg
Grado de saturación en cualquier punto de la pila	$\geq 85\%$
Otros factores	No haber apoyo en la base. Existencia de membranas de geotextil en la base

Tabla 5. Indicadores de la licuefacción estática en pilas de lixiviados (Smith, 2002)

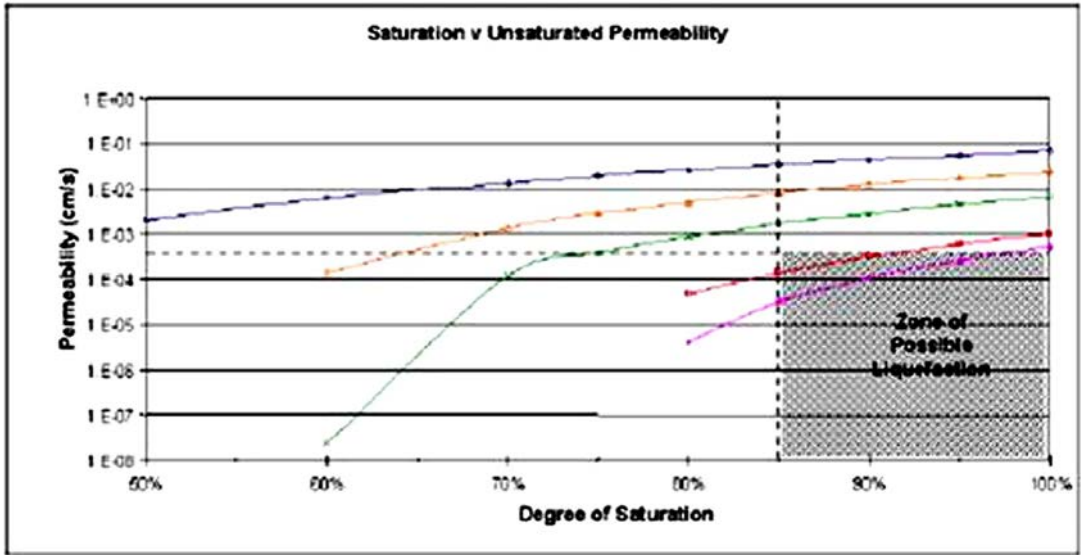


Figura 21. Relación entre el grado de saturación y la permeabilidad (Smith, 2002)



Fotografía 10. Licuefacción estática en forma de flujo de una pila de lixiviación de oro.

Si bien la pendiente del sustrato puede ser un factor potenciador de la inestabilidad, no es un condicionante en sí mismo, dado que el proceso se puede dar en pendientes de cimiento inferiores a los 5° y altura total de las pilas inferior a 20 metros. Tal es el caso conocido de la pila de lixiviación de oro de Tharsis, en materiales arenosos y totalmente saturados,

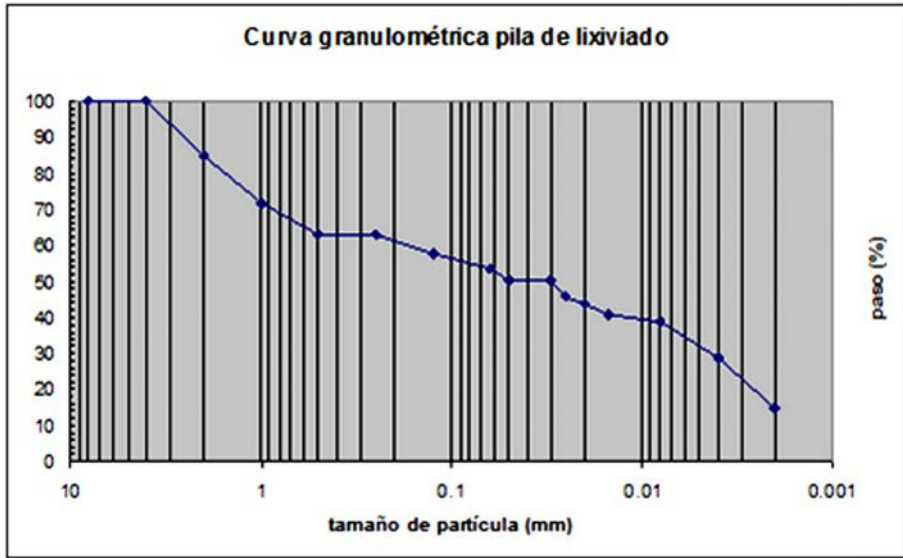


Figura 22. Curva granulométrica de una pila de lixiviado por cianuro

en que la licuefacción superó el canal perimetral y sobrepasó el arroyo de la Tiesa, afortunadamente sin efectos catastróficos dada la escasa pendiente del cimiento y la altura de la pila.

### 6.1.1 Cálculo de la peligrosidad física o geológica

El cálculo de la peligrosidad física o geológica, al igual que en el caso de las escombreras, se ha realizado mediante criterios observacionales de estabilidad. En nuestro caso, se ha optado por elaborar un índice de peligrosidad con distintos pesos en función de aquellos parámetros que tienen mayor influencia de la estabilidad de la pila (tabla 5).

#### 1. Características intrínsecas y constructivas de la pila

1.1	Inclinación (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Talud general	$\geq 30$	6	
	29-25	3	
	$\leq 24$	0	
1.2	Altura (m)	Puntuación Parcial	Puntuación
Altura máxima	$\geq 100$	6	
	99-50	3	
	49-25	1,75	
	$< 25$	0	

1.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Tamaño de grano	Pilas de lixiviación (< 60 mm)	6	
	Botadero de lixiviación (< 200 mm)	3	

## 2. Sustrato o cimentación

2.1	Inclinación (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Pendiente sustrato	$\geq 10$	4	
	9-5	2	
	$\leq 4$	0	

2.2		Puntuación parcial	Puntuación
Estado de la geomembrana	Desgarrado	3	
	Óptimo	0	

## 3. Comportamiento geotécnico de la pila

3.1		Puntuación Parcial	Puntuación
Grietas	Grietas de tracción profundas, asentamientos, flujos	4	
	Alguna evidencia (grietas poco profundas, deslizamientos locales, etc)	2	
	No hay	0	

## 4. Entrada y evidencia de agua en la pila

4.1	Precipitación (mm/año)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación media anual (mm/año)	>800	4	
	800-500	2	
	<500	0	

4.2	Precipitación (mm/día)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación máxima en 24 horas (mm/día) para un periodo de retorno de 100 años	$\geq 150$	4	
	149-100	2	
	99-50	1	
	<50	0	

Fuente: Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Ministerio de Fomento

4.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Sistema de desvío perimetral de aguas de lluvia	No hay	3	
	Parcial e insuficiente	1,5	
	Adecuado y en buen estado	0	

4.4		Puntuación parcial	Puntuación
Grado de saturación o evidencia de agua dentro de la estructura	Depósito saturado o presencia de agua en vaso o talud	6	
	Depósito no saturado	0	

4.5		Puntuación Parcial	Puntuación
Cárcavas de erosión	Profundas.	2	
	Alguna evidencia	1	
	No hay	0	

## 5. Riesgo sísmico

5		Puntuación Parcial	Puntuación
Aceleración sísmica básica	> 0,16	3	
	0,16-0,12	1,5	
	0,12-0,08	0,75	
	< 0,08	0	

Mapa de peligrosidad sísmica. Norma sismorresistente

## 6. Índice de peligrosidad (Peligrosidad)

Puntuación	>40	Muy Alta
	40-35	Alta
	35-25	Media
	<25	Baja

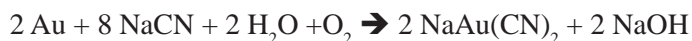
Tabla 6. Cálculo del índice de peligrosidad de pilas de lixiviación



## 6.2 CONTAMINACIÓN QUÍMICA

Un caso muy especial de contaminación química, con posibles efectos sobre la salud humana y el medio ambiente, es el que se puede producir como consecuencia de la lixiviación de menas de oro mediante cianuros y el escape de la solución cianurada.

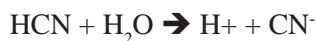
El proceso más extendido para la obtención de oro es el ataque de las menas de oro depositadas en pilas con una disolución cianurada de sodio o potasio, según la siguiente reacción:



El mineral que se vierte en las pilas de lixiviación está constituido por óxidos, sílice y sulfuros primarios, con un pH natural inferior a 4,5, condiciones en las que el cianuro se hidroliza según la siguiente reacción:



Produciendo ácido cianhídrico (HCN) en estado líquido o gaseoso, que a su vez es muy soluble en agua según la reacción:



Para evitar la presencia de ácido cianhídrico, altamente tóxico, las pilas previamente se alcalinizan con cal de tal forma que el pH de dicha solución esté en un rango entre 10 y 11 (Logsdon et al., 1999) para evitar la formación de ácido cianhídrico y donde la cianuración de menas de oro es factible (Figura 23). Además, las piscinas donde se deposita la solución cianurada son constantemente regadas con cal líquida con el propósito de mantener el pH siempre por encima de 10.

La solución cianurada se dirige a las piscinas de licor fértil desde donde pasan a la planta de procesos obteniéndose el oro mediante el método de adsorción por carbón activado o por el proceso Merrill-Crowe (separación del oro por precipitación añadiendo a la solución cianurada zinc en polvo que se combina con el cianuro).

Las formas de cianuro que se pueden formar en pilas y lagunas de decantación del licor fértil son:

- Cianuros complejos (CN<sup>-</sup>). Además de la solución cianurada de oro, y dado que el mineral aurífero casi siempre contiene otros metales, entre ellos hierro, cobre, zinc, níquel y plata, así como otros elementos, como el arsénico, se da la existencia de otras soluciones metálicas. Los análisis químicos de las soluciones utilizadas en los procesos y de los efluentes residuales derivados del procesamiento, indican que la mayor parte del cianuro en solución está químicamente ligado a metales distintos de las pequeñas cantidades de oro o plata. Convencionalmente, en la química del cianuro se distinguen entre los complejos “débiles” y “fuertes” de cianuro (Logsdon et al., 1999). Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros “disociables en ácidos débiles” o cianuros WAD, pueden

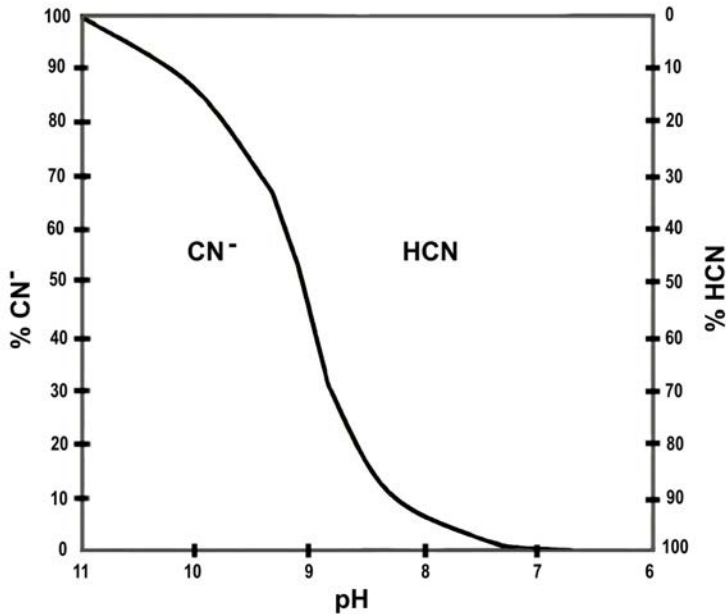


Figura 23. Parámetros de estabilidad del cianuro libre (Scott and Ingles, 1981)

disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre (HCN y  $\text{CN}^-$ ). Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado de disociación de estos complejos depende en gran medida del pH de la solución. Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro WAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor clave en el uso del cianuro para la extracción del oro del mineral. En la mayoría de las situaciones mineras, los complejos fuertes de cianuro son predominantemente cianuros de hierro. La velocidad a la cual los complejos se disocian y liberan cianuro libre en la solución depende de varios factores, entre ellos, la concentración inicial del complejo de cianuro, la temperatura, el pH de la solución y la intensidad de la luz, especialmente de la radiación ultravioleta. Pruebas realizadas en áreas poco ventiladas y en presencia de luz solar han demostrado que concentraciones tan bajas como 1 mg/l de cianuro de hierro son letales a las pocas horas. No obstante, estos experimentos no reflejan condiciones naturales realistas y no consideran la atenuación por hidrólisis, oxidación, adsorción y volatilización. De aquí que la toxicidad de los cianuros de hierro esté relacionada con su potencial para descomponerse y liberar cianuro libre, no al compuesto en sí.

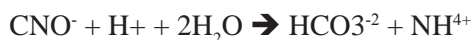
- Formas insolubles. Otro proceso que se puede dar es la formación de precipitados insolubles de cuproferrocianuro. En comparación con los complejos de cianuro de hierro, los complejos de cianuro de cobre muestran una menor tendencia a precipitar en presencia de

caciones como el hierro, el cobre o zinc pero son estables en presencia de otros metales, por lo que se encuentra con frecuencia en las pilas de relaves y las aguas subterráneas.

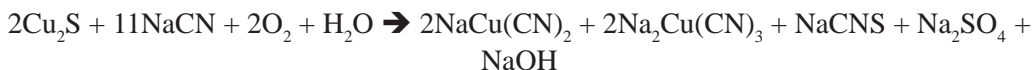
- **Cianatos (CNO<sup>-</sup>).** Los cianuros libres y simples pueden convertirse en cianatos (compuestos que contienen el grupo CNO<sup>-</sup>) cuando se les somete a procesos de oxidación, como ocurre con el tratamiento de efluentes. Además pueden formar tiocianato por efecto de la reacción entre compuestos reducidos de azufre y cianuro. A continuación, se explica la química de estos dos productos de descomposición. El cianato (CNO<sup>-</sup>) es un producto generado durante el procesamiento de minerales, debido a la reacción entre el ión cianuro libre y el ión cúprico, o durante el tratamiento de efluentes que contienen cianuro por medio de un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno o el ión hipoclorito. La formación del cianato, a partir de un mineral que contiene carbonato cúprico, puede ser descrita por medio de la siguiente reacción:



El cianato puede hidrolizarse para producir ión amonio:



- **Tiocianatos.** El tiocianato se forma por la reacción del cianuro, del oxígeno y de sustancias que contienen azufre. Las especies que contienen azufre pueden hallarse en forma de minerales o polisulfuros. La formación del tiocianato durante la cianuración de los minerales que contienen calcosita (Cu<sub>2</sub>S) puede describirse por la siguiente reacción:



Los tiocianatos son más estables que los cianatos en solución acuosa. El tiocianato puede degradarse lentamente debido a la acción de diversos organismos, como el *Thiobacillus thiocyanoxidans*, el cual lo oxida formando amoníaco y sulfato. Ciertos organismos tienen la capacidad de utilizar el tiocianato como una fuente de nitrógeno, lo cual ocurre sólo después de agotarse todo el amoníaco disponible. Los mecanismos de descomposición química son lentos y el tiocianato es resistente a la fotodescomposición.

El manejo del cianuro en las plantas de lixiviación es de una alta complejidad debido a su toxicidad, principalmente, en forma de ácido e ión cianuro (CN<sup>-</sup>). De aquí que la valoración del cianuro se dirija a evaluar el cianuro libre (CN<sup>-</sup> y HCN), los cianuros disociables en ácido débil (WAD), y el cianuro total (medida de concentración de cianuro que incluye todo el cianuro libre, todos los complejos de cianuro WAD y todos los cianuros metálicos fuertes, como el ferrocianuro Fe(CN)<sub>6</sub><sup>-4</sup>, el ferricianuro Fe(CN)<sub>6</sub><sup>-3</sup>, y segmentos de hexaciano-cobaltato Co(CN)<sub>6</sub><sup>-3</sup> y los del oro y platino. Sólo los compuestos relacionados o derivados cianato (CNO<sup>-</sup>) y tiocianato (SCN<sup>-</sup>) se excluyen de la definición de cianuro total. La Directiva 2006/21/CE, de Gestión de Residuos de Industrias Extractivas, ha determinado que en las instalaciones que hayan obtenido un permiso con anterioridad o ya estuvieran en

funcionamiento el 1 de mayo de 2008, la concentración de cianuro disociable en ácido débil en el punto de vertido de los residuos de extracción y tratamiento de la instalación de tratamiento en la presa no supere 50 ppm a partir del 1 de mayo de 2008, 25 ppm a partir del 1 de mayo de 2013, 10 ppm a partir del 1 de mayo de 2018, y 10 ppm en las instalaciones que obtuvieran su permiso después del 1 de mayo de 2008.



## 7. ESTABILIDAD DE PRESAS DE LODOS

Las acumulaciones de residuos mineros en presas de lodos de flotación son estructuras geotécnicas complejas y cuya estabilidad física está condicionada por factores naturales y antropogénicos:

- Factores naturales. Dentro de éstos se encuentran: los materiales de la fundación (tipo de material, suelos consolidados, suelos no consolidados, roca sana, roca alterada, etc.), pendiente del sustrato de la base, profundidad del nivel freático en la fundación, sismicidad de la zona, condiciones climáticas.

- Factores antropogénicos. En el caso de los factores antropogénicos podemos señalar mayoritariamente, los problemas relacionados con su funcionamiento hidráulico, debido a un mal manejo del agua en su interior.

### 7.1 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA PRESA DE RESIDUOS

Para entender su comportamiento es necesario conocer cómo funcionan hidráulicamente. El cálculo es característico y diferente para cada presa. En la Figura 24 se muestra un modelo conceptual de funcionamiento hidráulico de una de estas estructuras.

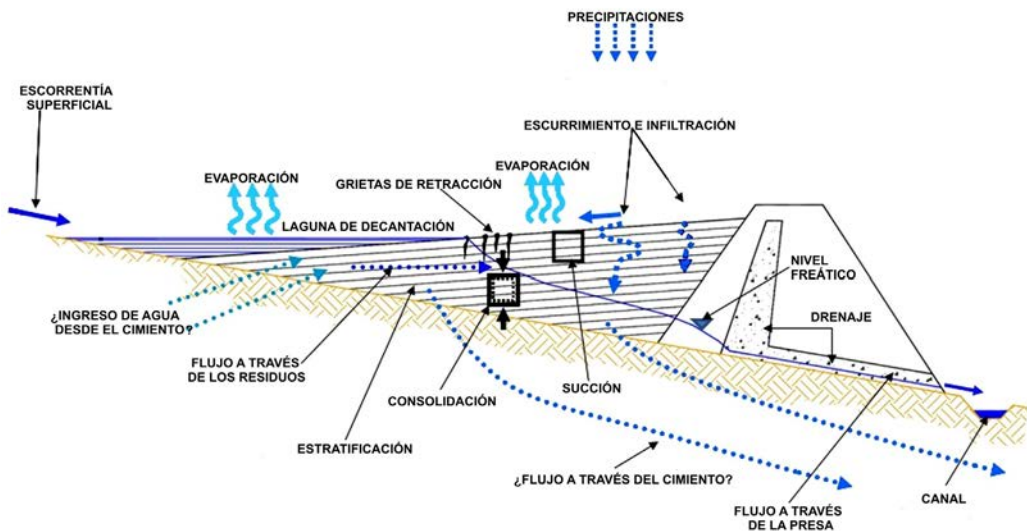


Figura 24. Modelo conceptual de funcionamiento hidráulico de una presa de residuos con las diferentes vías de entrada y salida del agua (Zandarin et al., 2009)

En la estabilidad de las presas de residuos hay varios aspectos clave y comunes para todas las presas que se tienen que tener en cuenta a la hora de realizar la ficha de cartografía e inventario y que relacionamos a continuación:

- El tipo de presa: aguas arriba, aguas abajo, línea central u otro tipo.
- Pendiente del talud.
- El material de la fundación y la posición del nivel freático en éste.
- Posición del nivel freático. Este parámetro depende de la granulometría que a su vez está condicionada por el proceso mineralúrgico.
- La posición de la laguna de decantación.
- El sistema de drenaje, tuberías, aliviadero y su posición.
- El tipo de material que conforma el dique de la presa, si es de lodos, tierra, roca, cemento o es mixta, pues su composición condiciona las propiedades geotécnicas e hidrogeológicas de éste y por consiguiente su estabilidad física.

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la composición granulométrica, mineralógica y química del residuo, del tipo de proceso mineralúrgico que lo originó y de la forma de vertido (en un punto o varios) así como de la composición de la pulpa.

## 7.2 FALLO DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

El tipo de presa determina el riesgo de estabilidad. En la Figura 25 se pueden apreciar los tipos de cierre de presas que más se utilizan a nivel mundial. De acuerdo con la literatura consultada respecto a los casos de rotura de presa registrados, las presas aguas arriba son las más propensas a licuefactar.

En la misma Figura se muestran las principales causas de fallo de las presas de residuos mineros, el número de incidentes y la operatividad o no de la presa. El estudio de casos históricos permite identificar cuáles son los posibles mecanismos de fallo que pueden afectar a una presa de residuos mineros. De acuerdo al análisis de la información disponible, se deduce que los principales mecanismos que causan las roturas de las presas de residuos mineros son ocho: 1) deslizamiento del talud, 2) terremoto, 3) sobrepaso, 4) problemas de fundación, 5) tubificación, 6) fallo por problemas en las estructuras auxiliares, 7) erosión del dique, 8) subsidencias o colapso del terreno. Se han enumerado en orden decreciente del número de casos de presas que han fallado por los mencionados mecanismos de rotura y de las que se tiene conocimiento en la literatura científica a nivel mundial.

Estos mecanismos de fallo no son los únicos pudiendo existir otros no considerados, sin embargo, de acuerdo a la información analizada, son los mecanismos más comunes.



Normalmente se suelen presentar combinaciones de estos mecanismos como origen de los incidentes, aunque también pueden ocurrir de modo aislado.

En la mayoría de los casos existe una propiedad de los materiales que es común para todos, la existencia de un grado de saturación elevado de los materiales, la existencia de un nivel freático elevado en el interior de la presa y, en muchos casos, la existencia de abundante agua debido a precipitaciones o deshielo. La presencia de abundante agua favorece el desarrollo de las causas de fallo.

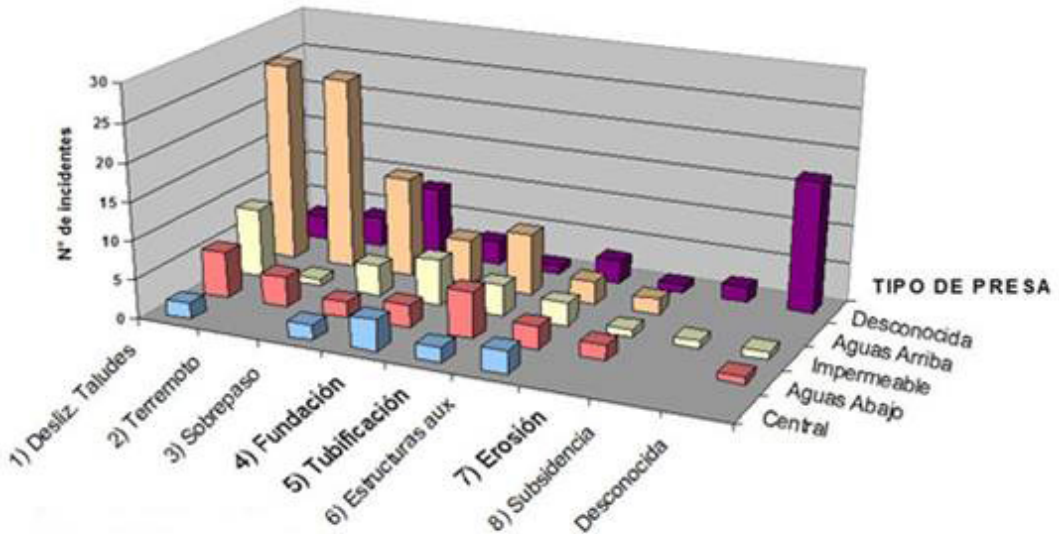


Figura 25. Número de incidentes versus principales mecanismos de fallos de los diferentes tipos de presas de lodos de flotación de acuerdo al sistema de cierre utilizado en la construcción del dique (Oldecop y Rodríguez, 2007)

- El material de la fundación es un parámetro muy importante pues, según el tipo de material, puede fallar con mayor o menor facilidad. El material de la fundación condiciona el comportamiento mecánico (parámetros de resistencia del material). En la Figura 25 se puede apreciar que es la cuarta causa de fallo de las presas de residuos.

- La posición del nivel freático: En este caso hay que tener en cuenta que en el caso de las acumulaciones de residuos existen tres posibilidades:

- o El material de la presa está saturado y el nivel freático de la fundación es profundo

- o El material de la presa está saturado y esta hidráulicamente conectado con el material de la fundación. Es típico de acumulaciones de residuos sobre materiales aluviales o pantanos, o en laderas con flujo superficial.

- o El material de la fundación no está saturado y los residuos del depósito tampoco.

Como se puede apreciar en la Figura 25, la licuefacción originada por un terremoto es la segunda causa de fallo de estas estructuras, según un análisis de diferentes casos históricos. La existencia de un presa de lodos saturada incrementa el riesgo por licuefacción pues, como es conocido, estos son materiales granulares de estructura típica abierta, que licuefactan ante la ocurrencia de un terremoto de cierta intensidad.

- La posición del sistema de drenaje es clave. La existencia de un sistema de drenaje por debajo del dique de la presa o escombrera es un punto de debilidad a tener en cuenta al hacer el cálculo de la estabilidad y debe quedar recogido en la ficha en el esquema de la presa. La ausencia de un sistema de aliviadero constituye una de las causas más comunes de fallo de la presa por sobrepaso, concretamente es la tercera de las causas de fallo (Figura 25). La existencia de estructuras auxiliares para drenar o evacuar el agua también constituye una zona de debilidad y es la sexta causa de fallo (Figura 25).

- La posición de la laguna de decantación de los finos es muy importante esté o no abandonada la presa. La laguna de decantación normalmente constituye una cuenca endorreica donde se produce la acumulación del agua y la decantación de los finos durante el proceso de explotación de la mina. Luego de abandonada la presa, en ella se produce la acumulación de la escorrentía superficial y la correspondiente acumulación del agua y su distribución a través de las capas de estratificación y de las grietas de desecación hacia la profundidad y periferia de los residuos. La existencia y disposición de la zona de vertido, la de transición y la de la laguna de decantación condicionan el comportamiento mecánico e hidrogeológico de los materiales dentro de la presa de residuos.

- El tipo de material que conforma el dique o cierre de la presa de residuos es de gran importancia porque determina las características físicas, mecánicas e hidrogeológicas. En este caso sería interesante destacar el tipo de material y su origen, a ser posible.

## 7.2.1 Mecanismos de fallo de las presas de lodos de flotación

### 7.2.1.1 Deslizamiento

Puede haber dos tipos de deslizamiento: superficial y profundos en el dique.

El deslizamiento superficial afecta a pequeños volúmenes y superficies en el dique. Se produce en materiales poco cohesivos, especialmente en diques arenosos, de forma semejante al que se puede dar en una escombrera.

El deslizamiento profundo puede ser debido a varias causas: sifonamiento o tubificación, por sobrepaso, o por erosión remontante del caso anterior. Así mismo la posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes (Figura 26). En un número importante de accidentes con colapso de la presa se sabe que éste estuvo precedido por un periodo de lluvias intensas. Debido a la



Fotografía 11. Deslizamientos superficiales en talud de presas de lodos



Fotografía 12. Deslizamiento profundo en dique, posiblemente por tubificación o piping consecuencia del colapso de la chimenea

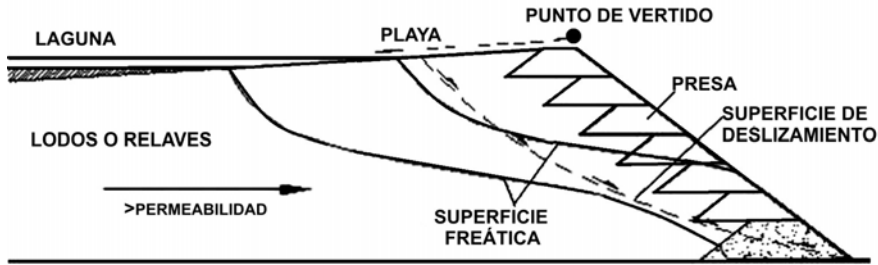


Figura 26. Inestabilidad del talud de una presa de lodos por aproximación del nivel freático

granulometría muy fina de los residuos mineros, el volumen de agua almacenado de forma capilar (a presión menor que la atmosférica) puede ser muy importante. Este volumen reduce considerablemente la capacidad de almacenamiento de agua en los poros del material del dique. La infiltración de cantidades relativamente pequeñas de agua de lluvia puede provocar una rápida elevación del nivel freático y la saturación de los residuos con el correspondiente descenso de la estabilidad del talud.

También se puede dar cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo exceden la resistencia al corte del material. En la mayoría de los casos se produce como consecuencia del aumento de las presiones intersticiales. Esta condición se da cuando el nivel freático se encuentra por encima de la base drenante del dique inicial. Aunque esta casuística suele conllevar la desestabilización de una parte del cuerpo de presa.

### 7.2.1.2 Licuefacción estática

Conlleva el colapso del cuerpo de presa consecuencia del aumento de la presión de poros o presión intersticial y pérdida de resistencia al corte de los materiales debido a sollicitaciones estáticas durante trabajos de recrecimiento (ritmo de recrecimiento excesivo que no permite la disipación de presiones de poro), sobrecargas, etc. En suma, se produce una licuefacción estática que produce el colapso del cuerpo de presa.

La posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes. La aproximación de la superficie freática al talud puede ocurrir por:

- 1) Elevación del nivel de agua en la laguna de decantación debido a aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de tuberías de evacuación.
- 2) Infiltración de agua de lluvia.
- 3) Operación inadecuada de la presa (mal manejo del vertido), provocando que la laguna de decantación se aproxime al dique de la presa.

4) Presencia de mantos de material fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados debido a la estratificación de estos materiales dentro de la presa.

En casos extremos el nivel freático puede aflorar por la superficie del talud, aspecto que normalmente disminuye considerablemente la estabilidad de la presa.

### 7.2.1.3 Licuefacción de las zonas saturadas del depósito debido a solicitaciones dinámicas

Al igual que en el caso anterior, la licuefacción se produce en materiales saturados al aumentar la presión de poro que produce una pérdida de resistencia al corte de los lodos como consecuencia de solicitaciones dinámicas, principalmente por terremotos, de magnitud igual o superior a 5,5 y aceleraciones iguales o superiores a 0,2 g y un grado de saturación del 100%.

La granulometría de lodos de flotación se encuentran dentro del rango de distribución de los suelos potencialmente licuefactables (Figura 27), con  $D_{50}$  (0,05-1 mm) y  $C_u = D_{60}/D_{10} < 14$  (González de Vallejo et al, 2010 y Xenaki V.C. and Athanopoulos, 2003)

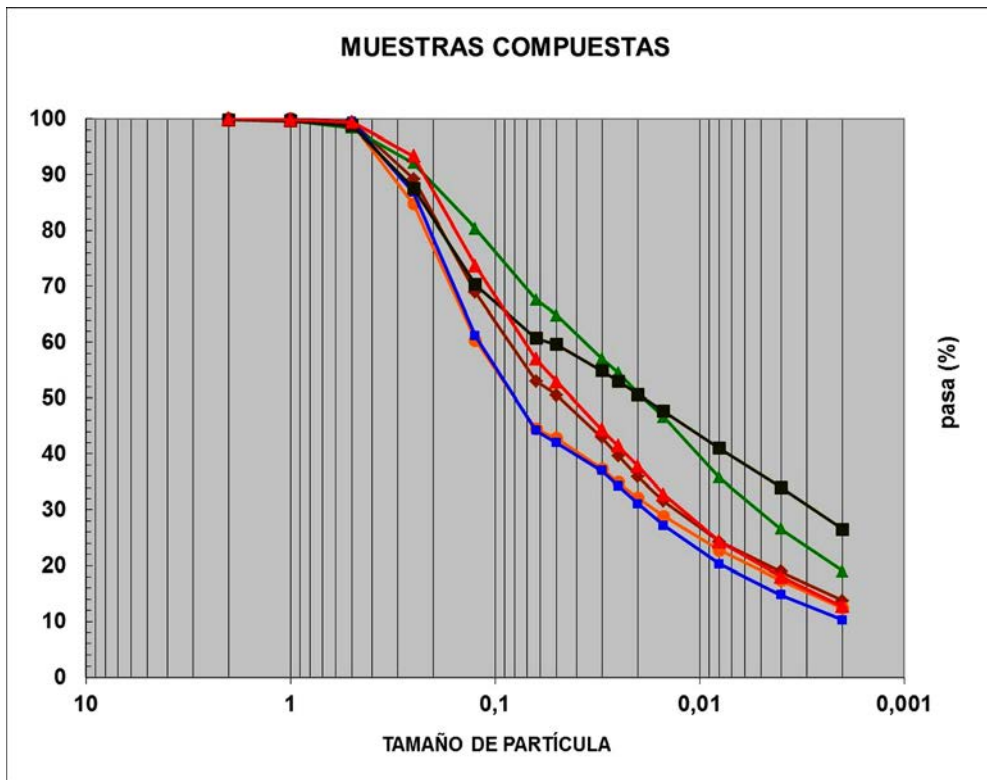


Figura 27. Curvas granulométricas de varias presas de lodos de flotación de minería de Pb-Zn



El fenómeno de licuefacción de materiales granulares (no plásticos) se puede entender fácilmente si se comprende primero la tendencia de estos materiales a reducir su volumen de poros cuando se los somete a deformaciones de corte cíclicas. Esta tendencia se ilustra en la Figura 38. Cuando un material granular tiene sus poros llenos de agua (condición saturada), estos cambios de volumen deben ocurrir a expensas de expulsar agua de los poros. Esta transferencia de agua puede llevar más o menos tiempo dependiendo de la permeabilidad del material. Si la permeabilidad es baja, la distancia a las fronteras drenantes es grande o las acciones (cargas o deformaciones) ocurren rápidamente, ocurrirá un incremento de la presión del agua. Este aumento de la presión del agua intersticial tiene el efecto de disminuir la resistencia al deslizamiento entre partículas, hasta el punto de hacer que el material fluya como un líquido viscoso, de alta densidad.

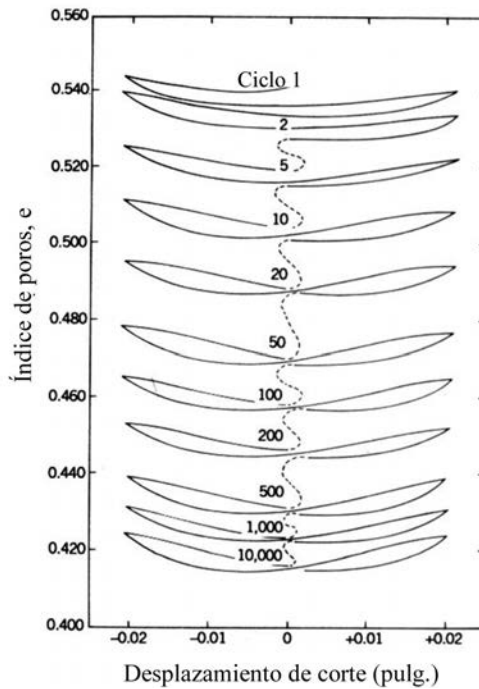


Figura 28. Ensayo de corte directo drenado con aplicación de una deformación de corte cíclica (Youd, 1972)

#### 7.2.1.4 Deslizamiento sobre la fundación

El deslizamiento de la presa de Aznalcóllar (España, 1998) fue provocado por un cúmulo de problemas en la fundación de la presa. La presa es de tipo anular, con recrecimiento hacia aguas abajo y una pantalla impermeable de arcilla en su cara de aguas arriba (Figura 29a). Todo el depósito estaba apoyado sobre una delgada capa aluvial (de aproximadamente 4 metros de espesor) y ésta sobre un depósito de arcillas marinas carbonatadas del terciario,

con un espesor mayor a 60 metros. Las propiedades mecánicas de estas arcillas son muy particulares. Ensayadas al corte directo, presentan un comportamiento extremadamente frágil, con una rigidez inicial elevada y un pico de resistencia muy agudo y una caída de resistencia abrupta. Por otra parte, la permeabilidad de la arcilla es extremadamente baja, entre  $2$  y  $7 \times 10^{-9}$  cm/s (Alonso y Gens, 2006).

Una sección de 600 metros de longitud del costado SE deslizó una distancia de 60 metros en dirección al cauce del río Agrio, sin que se detectaran señales que permitieran prever el accidente. Por la brecha producida se escaparon 7 millones de metros cúbicos de residuos mineros fuertemente ácidos que contaminaron los valles de los ríos Agrio y Guadiamar. El deslizamiento fue eminentemente de traslación, en el que la presa se movió prácticamente como bloque rígido. La superficie de deslizamiento, plana con una ligera inclinación ( $2^\circ$ ) en la dirección del movimiento, se desarrolló en las arcillas frágiles de la fundación, a 10 metros por debajo de la superficie natural del terreno (Figura 29). Aguas abajo se desarrolló una importante cuña de empuje pasivo que llegó a invadir el cauce del río Agrio.

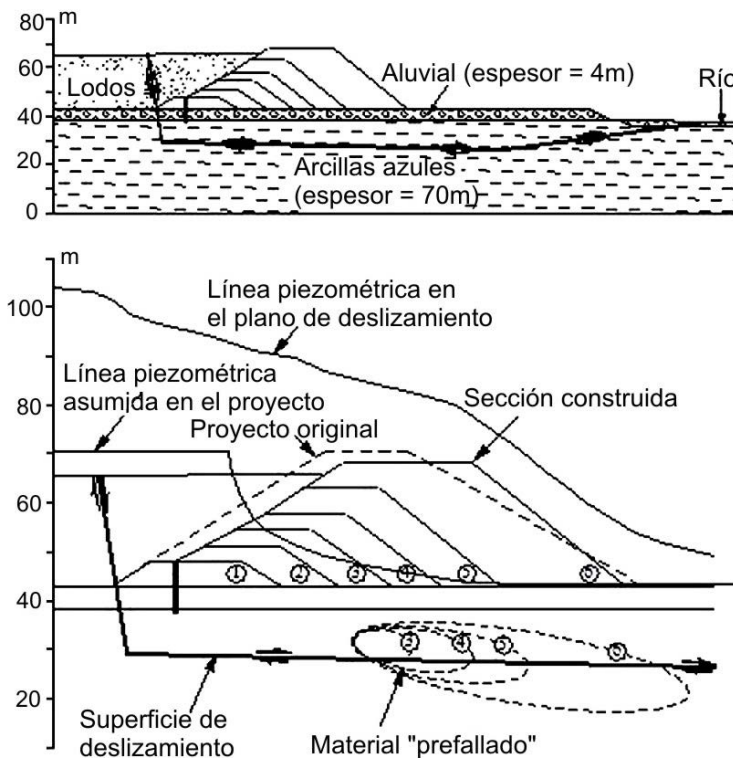


Figura 29. Presa de Aznalcóllar, perfil transversal en la sección deslizada (Moya, 2001; Alonso y Gens, 2006). a) Sección vertical por la presa y la fundación. Superficie de deslizamiento detectada con sondeos. b) Detalle: etapas de construcción, mecanismo de rotura progresiva y piezometría



### 7.2.1.5 Sobrepaso, tubificación y erosión

A lo largo del proceso de construcción y llenado, la morfología y estructura de un depósito de residuos mineros cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de sobrepaso, tubificación o erosión.

Una operación inadecuada en el vertido de los residuos puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro pro-



Fotografía 13. Tubificación en dique



Fotografía 14. Formación de cárcavas con erosión remontante

blema que puede llevar al sobrepaso. El hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y también la que ingresa accidentalmente en la presa no se puedan verter al medio, condiciona fuertemente el diseño y la operación. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o nívicas, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, por el contrario, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, entonces las previsiones hidrológicas deberán tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito.

Los procesos de tubificación provocan mecanismos de rotura similares al descrito en el párrafo anterior. Se inician por afloramiento de agua freática en un talud o por lavado de partículas hacia el exterior o hacia otros materiales más gruesos. La pérdida de material genera un proceso de erosión remontante, que va ampliando la vía de agua y por lo tanto el caudal y la capacidad de provocar más erosión. El proceso acaba por desestabilizar el talud de la presa, provocando la aparición de chimeneas o deslizamientos y en definitiva la aparición de una brecha. El aumento de las tensiones de corte sobre los residuos mineros provoca su licuefacción estática y el flujo a través de la brecha. Un proceso similar se produce en el caso de rotura por erosión. La crecida de un curso de agua vecino, el agua descargada por el vertedero, un canal que corre paralelo al pie del talud o el almacenamiento de agua contra el pie del talud, pueden producir su erosión hasta que se elimina el material de la presa, provocando la rotura, la licuefacción de los residuos mineros y su vertido.

7.2.1.6 Fallo de estructuras auxiliares

De acuerdo a la colección de casos históricos recogida en el Boletín 121 del ICOLD (2001), la mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallos en los sistemas de decantación del agua sobrenadante del depósito. Es común que estos sistemas estén formados por una o más chimeneas o torres de decantación en las que el nivel de rebalse se va elevando gradualmente a medida que el depósito crece en altura. Una tubería que corre por el fondo del depósito lleva el agua desde la base de la chimenea hacia el exterior. Es bastante frecuente la rotura de estos conductos, lo que deriva en filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático; o bien la creación de una vía de escape para los residuos mineros de poca consistencia. Otros incidentes dentro de esta categoría se deben a rotura de tuberías de descarga de residuos mineros hacia el depósito, con el consiguiente vertido y peligro de erosión de la presa o a la rotura de vertederos o de sistemas de by-pass para crecidas por haber sido diseñados con una capacidad inadecuada y problemas con tuberías de drenaje.

Como ejemplo interesante de rotura iniciada por un problema en una tubería de decantación, se puede citar el del complejo de dos presas de residuos mineros de Stava (Italia), cuyo colapso ocurrió en 1985. Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la rotura la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. En un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass (Figura 30). Esto se hizo mediante un tubo de

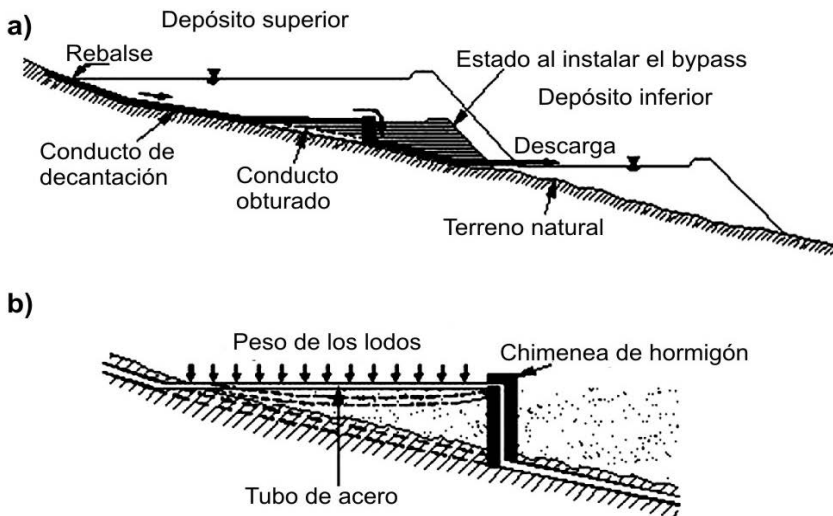


Figura 30. Complejo de Stava. a) Esquema de la reparación realizada para salvar un tramo de conducto de decantación obstruido en la presa superior (fuera de escala). b) Detalle (Chandler y Tosatti, 1995)13. Tubificación en dique



acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando los residuos mineros hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación. El tubo de acero estaba directamente apoyado sobre la superficie de los residuos mineros recientemente vertidas. Luego, cuando el depósito continuó creciendo, el tubo quedó inmerso en la masa de residuos mineros, que son bastante compresibles. Bajo el peso de las nuevas capas, el tubo pudo haber sido arrastrado hacia abajo y en un cierto momento su extremo arrancado de la chimenea. Esto permitió que el agua transportada por el tubo escapara directamente a los residuos mineros haciendo que la superficie freática en ese sitio se elevara.

Otro caso de fallo de la chimenea, bien en las juntas o en su unión con la tubería de fondo, da lugar a un proceso de piping que empieza en el entorno de la misma chimenea. En este caso se produce el colapso del cuerpo de la presa dando lugar a grietas de tracción concéntricas con la aparición de diques de arena.



Fotografía 15. Colapso del vaso de la presa por fallo en la chimenea de la presa

#### 7.2.1.7 Subsistencia

Los casos de rotura de presas de lodos por subsistencia no son frecuentes. En la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) sólo se registran tres casos de un total de 221. Todos ellos están asociados a la actividad minera subterránea que, por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), la rotura

consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se estaban realizando actividades de extracción.

### 7.2.2 Cálculo de la peligrosidad física o geológica

El cálculo de la peligrosidad física o geológica, al igual que en el caso de las escombreras y pilas, se ha realizado mediante criterios observacionales de estabilidad. En nuestro caso, se ha optado por elaborar un índice de peligrosidad con distintos pesos en función de aquellos parámetros que tienen mayor influencia de la estabilidad de la presa (tabla 7).

#### 1. Características intrínsecas y constructivas de la presa

1.1		Puntuación Parcial	Puntuación
Método de recrecimiento	Aguas arriba y arcaico	30	
	Aguas arriba	20	
	Línea central	10	
	Aguas abajo	5	
	Convencionales	1	

1.2		Puntuación Parcial	Puntuación
Material de construcción del dique	Lodos de flotación	20	
	Arenas cicladas	10	
	Material de préstamo	5	
	Hormigón	1	

1.3	inclinación del dique (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Talud del dique	> 40	10	
	35-40	8	
	30-35	4	
	25-30	2	
	< 25	1	

1.4	Longitud (m)		Puntuación
Coronación del dique	> 500	30	
	300-500	20	
	100-300	10	
	50- 100	5	
	< 50	1	

1. 5	Volumen en Mm <sup>3</sup>	Puntuación Parcial	Puntuación
Volumen de residuos	> 2	10	
	1-2	8	
	0,5-1	4	
	0,25- 0,5	2	
	< 0,25	1	

1. 6	Altura (m)	Puntuación Parcial	Puntuación
Altura máxima del dique	> 75	50	
	50-75	40	
	35-50	30	
	25-35	20	
	15-25	10	
	< 15	5	

## 2. Sustrato o cimentación y posición

2.1	Inclinación (°)	Puntuación Parcial	Puntuación
Pendiente del sustrato	> 30	30	
	20-30	20	
	15-20	10	
	10-15	5	
	< 10	1	

2.2		Puntuación parcial	Puntuación
Material del sustrato	Suelo poco consolidado.	20	
	Suelo rígido o roca blanda.	10	
	Roca alterada y fracturada	5	
	Roca sana	1	

2.3		Puntuación parcial	Puntuación
Lugar de emplazamiento	Valle	20	
	Lateral de valle	10	
	Ladera	5	
	Exenta	1	

### 3. Rasgos de inestabilidad y estado de conservación

3.1		Puntuación Parcial	Puntuación
Presencia de grietas	Generalizadas en dique	20	
	En estribos	10	
	En vaso	5	
	No hay	1	

3.2		Puntuación Parcial	Puntuación
Inestabilidades	Hundimiento del vaso,	30	
	Asentamiento del dique o tubificaciones en dique.	20	
	Colapso en el vaso o tubificaciones en vaso		
	Deslizamientos en dique	10	
	Rotura generalizada o Colapso del cuerpo de la presa y dique (*)	5	
	No hay	1	

(\*) Nota: desde el punto de vista de la seguridad una rotura del cuerpo de presa actúa como drenaje de la presa

3.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Cárcavas	Cárcavas profundas y generalizadas en el dique	30	
	Cárcavas profundas en estribos	20	
	Cárcavas menores generalizadas en dique	10	
	Cárcavas menores no generalizadas en dique	5	
	No hay	1	

Nota: no considerar las cárcavas existentes en pistas o canales artificiales de drenaje

## 4. Entrada y evidencia de agua en la escombrera

4.1		Puntuación Parcial	Puntuación
Presencia de agua en la laguna de decantación	Permanente	30	
	No permanente	20	
	No hay evidencia	5	
	Laguna drenada (*)	0	

(\*) Nota: En el caso de laguna drenada no se valora el apartado 4.2

4.2	Distancia (m)	Puntuación Parcial	Puntuación
Distancia de la laguna con agua al dique	< 10 m	30	
	10-20	20	
	20-30	10	
	30-40	5	
	> 40	1	

4.3		Puntuación Parcial	Puntuación
Drenajes	Drenajes no operativos o ausencia	20	
	Drenajes operativos dañados	10	
	Drenajes operativos	5	

4.4		Puntuación Parcial	Puntuación
Canales de desvío de agua	Canales perimetrales no funcionales o ausencia	20	
	Canales perimetrales en funcionamiento parcial	10	
	Canales perimetrales en funcionamiento	5	

4.5	Precipitación (mm/año)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación media anual (mm/año)	>800	20	
	800-500	10	
	< 500	5	

4.6	Precipitación (mm/día)	Puntuación Parcial	Puntuación
Precipitación máxima en 24 horas (mm/día) para un periodo de retorno de 100 años	≥125 mm.	20	
	124-100 mm	10	
	99-50 mm	5	
	<50 mm	1	

Fuente: Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Ministerio de Fomento



5. Riesgo sísmico

5		Puntuación Parcial	Puntuación
Aceleración sísmica básica	> 0,16	3	
	0,16-0,12	1,5	
	0,12-0,08	0,75	
	< 0,08	0	

Mapa de peligrosidad sísmica. Norma sismorresistente

6. Índice de peligrosidad (Peligrosidad)

Suma de las puntuaciones	>300	Muy Alta
	200-300	Alta
	100-200	Media
	<100	Baja

Tabla 7. Cálculo del índice de peligrosidad de presas de lodos

Una variante de este índice se puede encontrar en el MANUAL PARA LA EVALUACION DE RIESGOS DE INSTALACIONES DE RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS (IGME).

## 8. INTERPRETACIÓN EN CAMPO DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PROCESOS DE FALLO EN PRESAS DE LODOS CERRADAS Y ABANDONDAS

Los diques de la mayoría de las presas cerradas o abandonadas existentes en España, algunas de ellas con más de 50 años de antigüedad, han sido construidos con los propios lodos de flotación, al no existir tecnología eficiente para poder segregar la fracción arenosa presente en los propios lodos que permitiría la construcción de un dique propiamente dicho. Primero, se construía un dique inicial de escasa altura que contuviera los primeros lodos vertidos y a continuación se realizaba un entramado de tablestacas y se iban vertiendo los lodos (Fotografía 16). Se distinguen porque entre la parte superior del dique y los lodos no hay ningún desnivel o salto escalonado, no existe corona en el dique (Fotografía 17). Por el contrario, aquellas construidas con arenas ciclónicas, además de distinguir la textura de las arenas, hay un desnivel entre la coronación del dique y los lodos.

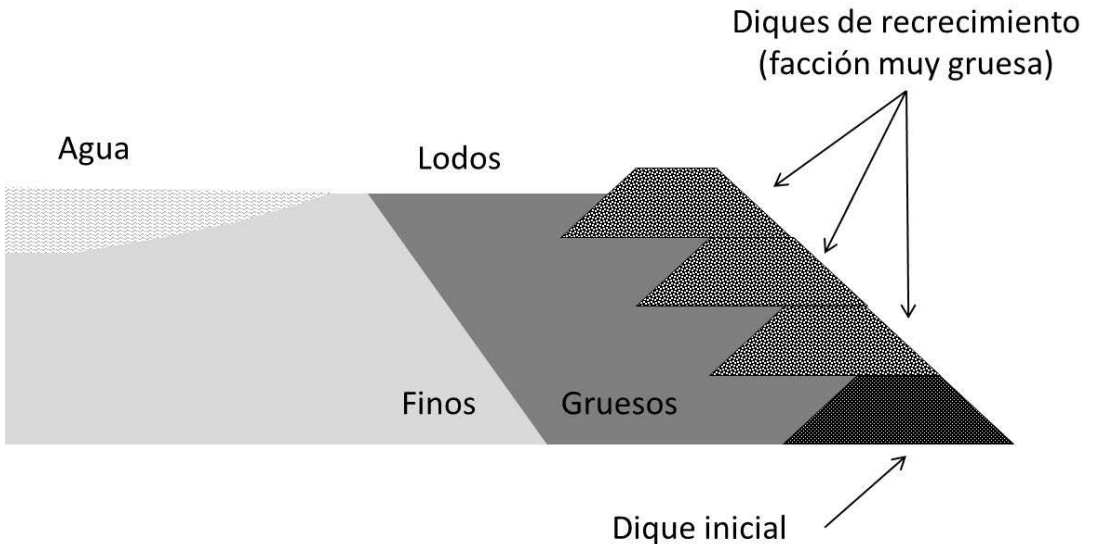


Figura 31. Corona de una presa de lodos de arenas ciclónicas



Fotografía 16. Dique realizado con los lodos de flotación por el sistema de tabla-estacas



Fotografía 17. Parte superior del dique a la misma altura que los lodos del vaso. Dique de lodos sin ciclonado de arenas

### 8.1 CARACTERIZACIÓN DE DRENAJES EN EL TALUD

Un primer paso es caracterizar posibles drenes en el talud o tuberías de desagüe, conectadas con las chimeneas del vaso, y comprobar si éstas tuberías o drenajes de fondo están en funcionamiento o no.

En muchas de las presas de lodos, las tuberías se encuentran rotas y, por tanto, no están funcionando, su comprobación es obvia: o se encuentran rotas (Fotografía 18) o colmatadas (Fotografía 19).



Fotografía 18. Tubería de drenaje de la presa roto y colmatado de lodos

Otro sistema complementario, poco eficiente, son los drenes californianos que permiten aliviar la presión hidrostática del agua en el dique; al tener poco desarrollo en el interior del dique acaban por caerse con la erosión; se sitúan a distintas alturas a largo del talud del dique (Fotografía 20).





Fotografía 19. Galería de drenaje de fondo no funcional con presencia de sales



Fotografía 20. Dique con drenes californianos no funcionales para drenar el talud

## 8.2 CARACTERIZACIÓN DE CHIMENEAS O DRENAJES VERTICALES EN EL VASO, PIEZÓMETROS, ETC.

Pueden estar colmatadas y cubiertas por la sedimentación de los lodos debido a los procesos erosivos en el vaso de la presa, en cuyo caso pasaran inadvertidos. En el caso en que se puedan identificar se podrá comprobar si contienen agua mediante la introducción de una sonda piezométrica, incluso se podrá oír el movimiento del agua si el sistema de drenaje funciona. En este último caso, la chimenea se encuentra en funcionamiento (Fotografía 21) y deberíamos encontrar, generalmente, en la base del dique, la tubería conectada con salida de agua (Fotografía 22); en el supuesto caso en que la tubería de fondo estuviera desconectada de la chimenea la lógica y la experiencia nos induce a pensar que aparecerán surgencias entre la base del dique y el cimientó.

En el caso en que encontremos piezómetros existen grandes posibilidades de que la presa esté vigilada.





Fotografía 21. Chimenea en funcionamiento



Fotografía 22. Salida de una tubería en el pie del talud de una presa en funcionamiento, conectada con la chimenea del vaso

### 8.3 CARACTERIZACIÓN DE SALES Y COSTRAS DE HIDRÓXIDOS DE HIERRO

#### *Sulfatos hidratados solubles (Sales)*

Se encuentran principalmente en el talud y corresponden a ciclos de evaporación-disolución de soluciones procedentes de la alteración de silicatos o de la alteración de la pirita. Mayoritariamente corresponden a sulfato cálcico hidratado de color blanco y su presencia nos indica antiguos puntos de filtraciones de agua en el dique, suelen dar consistencia y cohesión al dique al actuar como un cemento. En el caso de encontrarse en el vaso corresponden a la ascensión de éstas por capilaridad. Se redisuelven y movilizan en épocas de lluvia (Fotografía 23).



Fotografía 23. Formación de sales solubles el talud

#### *Costras de óxidos de hierro*

Aunque siempre se hace referencia a óxidos de hierro, científicamente deberíamos hablar de hidróxidos y oxihidróxidos de hierro. Corresponden a la precipitación de aguas con hierro en disolución al oxigenarse debido al aumento del potencial redox, tanto con aguas ácidas (fase de hidrólisis del hierro a pH 2,8-3,5) como con aguas con pH circumneutrales. Dan una enorme consistencia y cohesión al dique, son difícilmente solubles y, exclusivamente, podrían redisolverse en el supuesto caso de precipitaciones continuas en presas con un alta potencial ácido (Fotografía 24).





Fotografía 24. Formaciones de costras de hidróxidos de hierro en el talud

## 8.4 PROCESOS DE FALLO EN PRESAS

### 8.4.1 Rotura de la presa

Además de los deslizamientos en el talud descrito en el capítulo 7, otro proceso habitual en muchas de las presas analizadas es la rotura de la presa. Denominamos rotura de la presa a un desplazamiento súbito de gran magnitud de parte del cuerpo de la presa, generalmente debido a procesos de licuefacción estática o dinámica, en lodos saturados y sin drenaje que dan lugar al aumento de la presión de poro y pérdida de la resistencia al corte de éstos. La licuefacción conlleva la formación de un flujo de lodos, en forma de avenida, que pueden alcanzar varios kilómetros de distancia.

En España existen tres casos paradigmáticos de rotura de presas de lodos:

- La rotura de la presa de Reocín (Torrelavega) denominada La Luciana, en 1960, cuyos lodos arrasaron y mataron a 18 personas, embistió una presa de aguas para terminar en el río Besaya. Aunque no hay datos fidedignos, la rotura pudiera haberse debido a altos ritmos de recrecimiento que no permitieron disipar la presión de poro (Fotografía 25).

- La rotura de la presa de Orconera (Ortuella) en 1964 que mató a un total de seis personas, produciéndose tras un periodo de intensas lluvias que provocaron la sobresaturación de los materiales, la licuefacción de los mismos y la salida de 200.000 toneladas de residuos mineros.

- La rotura de la presa Brunita (La Unión), en el año de 1972, cuya rotura dio lugar a un flujo de lodos produciendo un muerto, arrasó parte del cementerio del pueblo, la carretera Cartagena-Alicante y la línea férrea, como consecuencia de las intensas lluvias que cayeron entre el 17 al 22 de octubre.

En estos casos y otros menos conocidos (como por ejemplo el colapso de la presa El Descargador en La Unión) suelen aparecer inyecciones o diques de arena. Estos diques de arena que se pueden observar en la cabecera de la rotura se producen como consecuencia de la licuefacción de los lodos por aumento de la presión de poro con inyección de arena hacia la superficie libre (Fotografía 26).



Fotografía 25. Colapso de la presa de lodos denominada Luciana (Torrelavega)

#### 8.4.2 Colapso del vaso

Se denomina colapso a un desplazamiento en la vertical del cuerpo de la presa. Se produce generalmente debido a un fallo en las juntas de la chimenea o en la conexión con la tubería de drenaje de fondo dando lugar a un proceso de erosión interna que deriva en fenómenos de tubificación (piping). La tubificación se forma cuando existe un gradiente hidráulico o diferencia de carga de agua entre dos puntos con el consiguiente arrastre de partículas en el sentido de la corriente. El proceso se identifica por la diferencia de altura entre la cota topográfica más baja del vaso y la cota topográfica de la coronación del dique llegando en más de un caso a diferencia de altura superiores a los 3 metros (Fotografía 27).





Fotografía 26. Diques de arena típicos de procesos de licuefacción recorriendo la cabecera del deslizamiento

Así mismo se pueden formar grietas de tracción radiales con formación de diques de arena (Fotografía 28).



Fotografía 27. Colapso del vaso de una presa por piping debido a la rotura de la chimenea



Fotografía 28. Formación de grietas de tracción y diques de arena por colapso del vaso



### 8.4.3 Hundimiento de vaso

La fase posterior al colapso del vaso correspondería al hundimiento del vaso, aunque este último no siempre se produce. Entendemos por hundimientos el desplazamiento súbito del terreno con formación de una cavidad en forma de cono de subsidencia, producto de la presencia de una oquedad formada por erosión interna, producto a su vez de la desconexión de la chimenea con el drenaje o tubería de fondo (Fotografías 29 y 30).



Fotografía 29. Hundimiento del vaso de una presa restaurada con geotextil y gramíneas próxima al arroyo de la Campana en La Carolina



Fotografía 30. La tubería de drenaje del fondo de la presa anterior se encuentra deformada, por lo que el hundimiento puede estar relacionado con el fallo de este sistema de drenaje

### 8.5 POSICIÓN DE LA LAGUNA DE DECANTACIÓN

Como ya se comentó en el capítulo 7, la posición de la laguna de decantación en el vaso determina la posición del nivel freático en el dique (Fotografía 31). Cuanto más cerca se encuentre del dique mayor será la altura del nivel freático en el talud, introduciendo un mayor factor de incertidumbre en la fragilidad de la presa. En estos casos los materiales se encuentran claramente saturados en agua por lo que una sollicitación estática (sobrecarga por lluvias) o dinámica (terremotos) podría conducir al colapso del cuerpo de la presa por aumento de la presión de poro y pérdida de resistencia al corte de los lodos.



Fotografía 31. Laguna de decantación en presa de aguas ácidas

A veces, aunque no exista presencia de agua en el vaso, se puede determinar la existencia del nivel freático en el dique por la presencia de vegetación hidrófila (eneas, juncos, carrizo), siempre y cuando los lodos no tengan un alto potencial ácido.

### 8.6 SURGENCIAS Y REZUMES EN EL TALUD DE LA PRESA

Como consecuencia de la presencia de niveles freáticos o lodos saturados en agua, pueden aparecer rezumes o surgencias en el dique. Ambos conceptos son difíciles de diferenciar entendiéndose por rezumes la presencia de humedad que sin llegar al nivel de goteo da a estos materiales una consistencia pastosa fluida, pudiendo dar lugar a pequeños derrumbes debido a la pérdida de cohesión de los lodos (Fotografía 32). Las surgencias suelen proceder de niveles freáticos, bien de presas con agua en la laguna o bien de presas con drenajes por chimeneas con tuberías de fondo estropeadas, en este último caso las surgencias pueden aparecer en nivel de contacto de la presa con el cimiento dónde se asienta (Fotografía 33).





Fotografía 32. Rezumes en dique de lodos



Fotografía 33. Surgencia entre la base de la presa y el cimient (Areniscas del Buntsandstein)

### 8.7 SOBREPASO

El sobrepaso del agua de la presa a través del dique, debido al fallo del sistema de drenaje, da lugar a la creación de cárcavas que puede conllevar al progresivo desmantelamiento del dique. A veces estas cárcavas se producen como consecuencia de la construcción de zanjas artificiales para drenar la laguna de decantación (Fotografía 34).



Fotografía 34. Cárcava producida por la apertura de una zanja para desaguar el agua del vaso de la presa



## 8.8 SATURACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

La mayoría de las presas cerradas y abandonadas están saturadas en agua independientemente del tiempo que haya podido transcurrir desde que dejó de estar activa y aunque no exista ningún sobrenadante permanente o temporal en la laguna de decantación. Esta comprobación se pone de manifiesto con la realización de un sondeo manual en el vaso o en el talud (Fotografía 35). Para ello es necesario romper la zona oxidada que a veces está constituida por costras de hidróxidos de hierro, una vez alcanzada la zona no oxidada desaparece la difusión del oxígeno y encontramos los lodos saturados en agua.

La saturación de los lodos es fácil de comprobar en los niveles más plásticos del dique, fácilmente moldeables. Estos niveles plásticos están constituidos por la fracción más fina de los lodos constituida mayoritariamente por cuarzo y, en menor medida, por clorita, moscovita y otros minerales (albita, yeso, ankerita, etc)



Fotografía 35. Toma de una muestra de lodos saturados con barrena de mano a una profundidad aproximada de un metro

## 9. ANALÍTICAS DE CAMPO Y LABORATORIO

### 9.1 ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

#### 9.1.1 Calidad de las aguas superficiales, sobrenadantes, lixiviados, surgencias, etc.

Nos permite valorar los concentrados líquidos en su estado actual, consecuencia de procesos reactivos función de la composición química de los materiales y, por tanto, su afección a los ecosistemas acuáticos y a la salud humana. La concentración de metales ( $\mu\text{g/L}$ ), pH y conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) de la aguas en contacto con las estructuras (surgencias, sobrenadante, represamientos, etc.) nos permite valorar la reactividad de los materiales de la propia estructura minera. La concentración de metales, pH y conductividad de las aguas, aguas arriba y aguas debajo de dicha estructura, permite identificar si la posible contaminación es debido a la propia estructura minera o procede de otro foco de contaminación.

Los parámetros que se deben medir en campo, mediante sondas específicas, son: temperatura, pH, potencial redox y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ). En laboratorio se realiza la analítica de la concentración de metales ( $\mu\text{g/L}$ ), aniones (sulfatos, alcalinidad, cloruros, etc.) ( $\text{mg/l}$ ) y sólidos en suspensión ( $\text{mg/l}$ ).

La metodología para calcular las concentraciones de iones en aguas se realizará mediante la toma de dos muestras de agua. Una se recogerá en un bote de 125 mL (previamente acidulado), se filtrará a  $0,45\ \mu\text{m}$  y se ajustará su pH hasta a  $\text{pH} < 2$ , mediante  $\text{HNO}_3$ . Esta muestra nos permite analizar las concentraciones de metales trazas disueltos mediante técnicas de ICP-MS. Así mismo, se tomará otra muestra en bote de 400 mL de aguas sin acidular, mediante técnicas de Espectrofotometría de Absorción, nos permitirá evaluar la alcalinidad, la concentración en metales mayoritarios (Na, K, Mg, Ca) y la concentración en elementos no metálicos (sulfatos, bicarbonatos, cloruros).

#### 9.1.2 Composición en masa de los sedimentos de las estructuras mineras

La composición química expresada como concentraciones en  $\text{mg/kg}$  presentes en los residuos sólidos nos permite obtener un primer conocimiento, entre otros, de la paragénesis. Así como una primera aproximación de contaminación de suelos, comparando estas concentraciones con los niveles genéricos de referencia (NGR) de las diferentes Comunidades Autónomas.

Existen analizadores por Fluorescencia de Rayos X (FRX) que dan resultados muy aproximados a lo que normalmente se interpreta como contenidos totales, para la mayoría de elementos de interés, con la ventaja de que es una técnica no destructiva. Es más, la analítica por este método puede realizarse ya con bastante confianza mediante un equipo portátil

de fluorescencia por Rayos X. Los analizadores portátiles vienen equipados con diferentes fuentes de radioisótopos ( $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{241}\text{Am}$  y  $^{55}\text{Fe}$ ) que inducen la generación de rayos X y permiten obtener, de forma casi simultánea, las concentraciones de un gran número de elementos. Dependiendo del equipo pueden analizar del orden de 24 elementos (Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mo, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, V, Zn, Zr) con unos límites de detección que, por ejemplo en el caso del arsénico, varía entre 10 a 25 ppm. El equipo es muy manejable y permite la analítica in situ sin necesidad de toma de muestras, aunque también se puede utilizar en gabinete mediante recogida de muestra, cuarteo y cribado, aunque en el caso de los lodos de presas no es necesario este procedimiento por estar cuarteado y con una granulometría inferior a 2 mm.

### 9.1.3 Ensayos de lixiviación

Estos ensayos se realizan cuando en la estructura minera no hay presencia de aguas en contacto con la estructura (surgencias, sobrenadante, etc.) aunque también se debe utilizar como complementario de la caracterización de las aguas.

#### 9.1.3.1 Ensayo de Lixiviación en Campo

El ensayo de lixiviación de campo (ELC o Field Leaching Test, FLT) fue desarrollado por miembros del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), para proporcionar una medida rápida y económica del pH y la conductividad eléctrica, así como para obtener un lixiviado sobre el que poder medir contenidos en elementos potencialmente tóxicos. El método contempla la extracción en agua desionizada con un tiempo de agitación de sólo cinco minutos, asumiendo que los materiales más reactivos de residuos alterados superficialmente consisten en componentes relativamente solubles de la fracción fina (<2 mm). Inicialmente pensado para residuos mineros procedentes de la minería metálica, este test se ha utilizado posteriormente para predecir, evaluar y caracterizar las interacciones geoquímicas entre el agua y una amplia variedad de matrices geológicas y ambientales, sobre las que también ha mostrado ser de utilidad. Como parte del desarrollo de la investigación que dio lugar al diseño final del ensayo se realizaron estudios comparativos con los muchos otros tipos de pruebas de lixiviación. Después de la primera serie de pruebas, los científicos del USGS centraron sus estudios en la comparación entre el ensayo de campo y el método SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) o método EPA-1312 (USEPA, 1994). La comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos permite apreciar similitudes claras (Hageman & Briggs, 2000; Hageman, 2004), a pesar de la duración del ensayo SPLP (18 horas). El método de lixiviación en campo muestra tendencias de extracción geoquímica similares al SPLP, siendo comparables los valores de pH y conductividad eléctrica, si bien la concentración medida de algunos elementos es generalmente más baja que la que se obtiene aplicando el

SPLP. Como resultado de todo esto, el USGS asumió que el ELC (FLT) es un procedimiento que puede ser utilizado como un sustituto del ensayo SPLP.

El material necesario para realizar el ELC consiste en:

1. Balanza de campo o de laboratorio, preferiblemente electrónica y pequeña, con alimentación eléctrica por baterías o pilas. Debe ser suficientemente precisa para pesadas de 50 g.
2. Recipientes desechables de estireno con capacidad para 50 g de muestra (no son imprescindibles).
3. Una o varias botellas de plástico de boca ancha, con capacidad para 1 L, preferiblemente graduadas en ml o cm<sup>3</sup> y de cierre seguro. Si no se dispone de botella con regla de volumen, puede ser necesaria una probeta graduada de 1 L de capacidad.
4. Jeringas de plástico, preferiblemente de 60 cm<sup>3</sup>.
5. Agua desionizada.
6. Medidores de pH y de conductividad eléctrica portátiles, o medidor portátil con electrodos para medida de pH y conductividad eléctrica.
7. Filtros de 0'45 µm, botes pequeños (tantos como el doble del número de muestras de residuo a valorar) y ácido nítrico concentrado.

Se procede del siguiente modo: si se considera necesario, la muestra se tamiza mediante tamiz de 2 mm de luz de malla. Se pesan 50 gramos de muestra preparada y se introducen en una botella de plástico de 1 L. Se añade lentamente agua des-ionizada hasta completar 1 L, de modo que no se levante polvo y se escape por la boca de la botella. Dependiendo de la cantidad de material disponible de sólido, se pueden emplear otros volúmenes de lixiviado, siempre y cuando la relación se mantenga en 20:1 entre líquido y sólido. La botella se cierra bien y se agita enérgicamente durante 5 minutos. Después, el contenido se deja reposar por unos 10 minutos. Después de decantar, se extraen sub-muestras del lixiviado con una jeringa y se mide el pH y la conductividad eléctrica, anotando los resultados. Una parte del lixiviado se filtra utilizando una jeringa de 60 cm<sup>3</sup> y filtros de nitrocelulosa de 0'45 µm de tamaño de poro. Si la filtración es difícil, puede hacerse un prefiltrado a 0'70 µm u otro tamaño de poro del que se disponga. Como mínimo se recogen y conservan para su análisis dos submuestras del filtrado, acidulando una de ellas a pH aproximadamente igual a 2, para el análisis de cationes metálicos.

Este método elimina muchos costes de transporte de muestras al laboratorio. Debido a que las mediciones de pH y la conductividad eléctrica son realizadas en el campo, sólo se conservan partes alícuotas de los lixiviados de campo y, salvo que se pretenda realizar algún ensayo más sobre los residuos, sólo se necesita transportar los botes donde han sido recogidos dichos lixiviados. Además, el uso de esta prueba de campo reduce la necesidad

de espacio de laboratorio, personal adicional y la necesidad de equipo especializado, que es necesario para muchos de los tradicionales procedimientos de lixiviación.

### 9.1.3.2 Ensayo de lixiviación de laboratorio

Se realiza el ensayo de lixiviación de laboratorio EN 12457-2: “Characterization of waste-leaching- compliance test for leaching of granular waste material and sludge”.

Este ensayo normalizado se diferencia del primero en que la muestra sólida tomada en campo es enviada a laboratorio donde se realiza la lixiviación con agua desionizada en una relación 10:1 (L/Kg.) durante 24 horas. Aunque la norma nos dice que el peso de la muestra debe ser de un Kg, por razones prácticas, en laboratorio se utilizan 45 g; siendo, por tanto, suficiente un máximo de 100 gramos de muestra sólida recogida en campo, manteniendo en laboratorio la relación 10:1. Este ensayo proporciona unos datos más fiables, al ser realizada en condiciones mucho más uniformes que las que imperan en las campañas de muestreo en campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alonso E.E. y A. Gens. 2006. Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties. *Géotechnique*, 56 (3): 165–183.
- Ayala, F.J., Rodríguez, J.M. 1986. Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. Madrid. IGME. 182 pp.
- Ayala, F.J., Andreu, F.J., Fe, M., Ferrer, M., Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gomez, J., Sampedro, J. y Cienfuegos, F.J. 2006. Manual de ingeniería de taludes. IGME. 455 p.
- Bishop, A.W., Hutchinson, J.N., Penman, A.D.M., and Evans, H.E. 1969. “Geotechnical investigation into the causes and circumstances of the disaster of 21 October 1966”. In: A selection of technical reports submitted to the Aberfan Tribunal. HMSO, London, Welsh Office, The Stationary Office Ltd., Norwich, U.K. p. 1–80 (Item 1).
- Chandler, R. J and Tosatti, G. 1995. The Stava dams failure. Italy, July, 1985. *Proceeding of International Civil Engineering*, 113, 67-79.
- Charanpreet, S. 2009. Evaluation of slope stability for waste rock dumps in a mine. Department of Mining Engineering National Institute of Technology. Rourkela. 56 p.
- Cravotta, C.A. III. 2009. Abandoned mine drainage in the Swatara Creek Basin: streamwater quality trends coinciding with the return of fish. *NWQEP notes*, nº 132, 26 p.
- Dawson, R.F. 1994. Mine waste geotechnics. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alta.
- Dawson, R.F., Morgenstern, N.R., and Stokes, A.W. 1998. Liquefaction flowslides in Rocky Mountain coal mine waste dumps. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 328–343.
- Earle, J., and Callaghan, T. 1998. Impacts of mine drainage on aquatic life, water uses, and man-made structures. Chapter 4. In: *Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania*. Eds (Brady, Smith and Shueck). The Pennsylvania Department of Environmental Protection.
- Eckersley, J.D. 1986. Flowslides in stockpiled coal. *Engineering Geology*, 22: 13.22.
- Eckersley, J.D. 1990. Instrumented laboratory flowslides. *Géotechnique*, 40 (3): 489–502.
- Environment Australia. 1997. “Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage”. Best Practice Environmental Management in Mining.
- Ficklin, W.H., Plumlee, G.S., Smith K.S., McHugh J.B. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas, in: Y.K. Kharaka, A.S. Maest (Eds.),

- Proceedings of the 7th International Symposium on Water Rock Interaction, Park City, Utah, 1992, pp. 381–384.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. 2010. *Ingeniería Geológica*. Madrid. Pearson Prentice Hall. 715 pp.
- Hageman, O.L., and Briggs, P.H. 2000. A simple field leach for rapid screening and qualitative characterization of mine waste material on abandoned mine lands. In: ICARD 2000, Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, Denver, Colorado, May 21-24, 2000. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., p. 1463-1475.
- Hageman, P.L. 2004. Use of short-term (5-minute) and long term (18-hour) leaching tests to characterize, fingerprint, and rank mine waste material from historical mines in Deer Creek, Snake River, and Clear Creek watersheds in and around the Montezuma Mining District, Colorado: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5104, 41 p.
- Hall, R.L., Likens, G.E., Fiance, S.B. and Hendrey G.R. 1980. Experimental acidification of a stream in the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Ecology*, 61: 976 – 989.
- Hunter, G., and Fell, R. 2001. “Rapid” failure of soil slopes. UNICIV Report R-400. The University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Sydney, Australia.
- Hutchinson, J.N. 1969. A reconsideration of the coastal landslides at Folkestone. Warren, Kent. *Geotechnique*, 19: 6-38.
- ICOLD (2001). Bulletin 121: Tailing dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Paris.
- Kim, J.J. y Kim, S.J. 2003. Environmental, mineralogical, and genetic characterization of ochreous and white precipitates from acid mine drainages in Taebaeg, Korea. *Environmental Science Technology*, 37, 2120-2126.
- Kimmel, W.G., 1983. The impact of acid mine drainage on the stream ecosystem. In: Pennsylvania Coal: Resources, Technology and Utilization, (S. K. Majumdar and W. W. Miller, eds.), The Pennsylvania Academy of Sciences Publishing, p. 424-437.
- Llorente, E., Martínez, J., Pla, F., Ballester, A y Martínez, A.A. 1991. *Minería Química*. IGME. 652 p.
- Logsdon M.J., Hagelstein, K. and Mudder, T.I. 1999. The Management of Cyanide in Gold Extraction. International Council on Metals and the Environment (ICME), 47 p.



- Morris, R., E.W. Taylor, D.J.A. Brown and J.A. Brown, 1989. Acid toxicity and aquatic animals. Society for Experimental Biology Seminar Series, v. 34, Cambridge University Press, p 282.
- Moya, J. 2001. Determinación de la geometría de la superficie de rotura en deslizamientos instantáneos: el caso de la balsa minera de Aznalcollar. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid, 27-30 Noviembre de 2001, vol. III, 1341-1352.
- Murad, E., andy Rojik, P. 2003. Iron-rich precipitates in a mine drainage environment: Influence of pH on mineralogy. *American Mineralogist*, 88: 1915-1918.
- Oldecop, L. y Rodriguez, R. 2007. Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Ingeniería Civil*, 148: 181-189
- Parsons, J.D. 1968. The effects of acid strip-mine effluents on the ecology of a stream. *Archiv für Hydrobiologie*, 65: 25-50.
- Roback, S.S. and Richardson, J.W. 1969. The effects of acid mine drainage on aquatic insects. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 121: 81-107. Academy of Natural Sciences.
- Rosemond, A.D., Reice, S.R., Elwood, J.W. and Mullholland, P.J. 1992. The effects of stream acidity on benthic invertebrate communities in the south-eastern United States. *Freshwater Biology*, 27: 193-209.
- Scott, J. S. and J. Ingles, 1981. "Removal of Cyanide from Gold Millings Effluents". *Canadian Mineral Processors Thirteenth Annual Meeting*, Ottawa, Ontario, Canadá, Enero 20-22, p. 380-418.
- Smith, M. E. 2002. "Potential Problems in Copper Dump Leaching". In *Mining magazine*, July.
- Taylor, R.K. 1984. Composition and engineering properties of British colliery discard. Report to National Coal Board, Mining Department. The National Coal Board.
- Townsend, C.R., Hildrew, A.G. and Francis J. 1983. Community structure in some southern English streams: the influence of physicochemical factors. *Freshwater Biology*, 13: 521-544.
- USEPA. 1994. Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams, U.S.EPA Office of Solid. 63 p.
- Waste, EPA/530-R-94-038, NTIS/PB94-201845, August 1994, 69 p.
- Warner, R.W. 1971. Distribution of biota in a stream polluted by acid mine-drainage. *Ohio Journal of Science*, 71: 202-215.

- Xenaki V.C. and Athanasopoulos G.A. 2003. "Liquefaction resistance of sand-mixtures: an experimental investigation of the effect of fines" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.23,p.183-194.
- Youd, T. L. 1972. Compaction of sands by repeated shear straining. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98, SM7, 709-725.
- Zandarín, M.T., Oldecop. L. A. Rodríguez, R. and Zabala, F. 2009. The role of capillary water in the stability of tailings dams. *Engineering Geology*, 105, 108–118.

## 2ª PARTE

# DISEÑO DE FICHAS PARA UN INVENTARIO DE RESIDUOS DE INSTALACIONES DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



## 1. INTRODUCCIÓN

La metodología para la realización de las fichas de instalaciones mineras que a continuación se exponen presenta como novedad, con respecto a fichas de otros inventarios existentes, la inclusión de datos de campo y de laboratorio que nos permitirán evaluar la peligrosidad y el riesgo para las personas, el medio ambiente y la salud humana - entre otros, la posición de la laguna de decantación, surgencias, conexiones de agua, toma de lodos para la realización de curvas granulométricas, composición química de los lixiviados de sólidos, composición química de aguas procedentes o en contacto con las estructuras mineras, contenido total de elementos químicos de los sólidos -. No obstante también incluye información recopilada en inventarios anteriores, debidamente actualizada según el caso, relativa a datos administrativos, características geométricas, funcionamiento de la estructura, etc,

Así mismo el inventario se ha realizado en una base de datos relacional constituida por un total de 32 tablas de datos clasificados en 5 categorías (apartados): Información general; Características estructurales; Estabilidad física; Estabilidad química; Factores de exposición e Información adicional.

La casuística, la valoración de los parámetros, factores, etc. que figuran en el inventario se han desarrollado ampliamente en METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN INVENTARIO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS MINEROS CERRADAS O ABANDONADAS.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE ESCOMBRERAS

Definimos como escombrera una estructura construida para el depósito de residuos sólidos en superficie. Los residuos sólidos o estériles de minería pueden provenir de avances de galerías de minería de interior, del vaciado de una corta troncocónica, del vaciado del hueco inicial de la minería de transferencia, de la fragmentación mecánica de menas para el aprovechamiento de un mineral, etc. A veces, como en el caso de la minería de carbón, se mezclan los sólidos del avance de galerías, con el cribado de los lavaderos e incluso con el rechazo de la separación por medios densos o de la flotación.

La ficha consta de los siguientes apartados:

### ➤ Portada

Donde figuran los siguientes elementos:

- Campos identificativos de la estructura: Código; Localización; Distrito minero; Sector de producción; superficie; volumen; altura máxima.

- Mapa de España con la provincia donde se encuentra la escombrera.
- Cuadro Resumen: en el que se recogen las principales características de la escombrera, condicionantes de la estabilidad (deslizamientos, cárcavas, regueros), concentración química de aguas, composición química de los lodos, ensayos, peligrosidad física, índice de toxicidad o factor de toxicidad, etc.

### ➤ Información general

En este apartado se recoge información general relativa al depósito. El objeto de dicha información persigue la correcta caracterización y ubicación de la escombrera, así como la definición del estado en que se encuentra.

Consta de los siguientes subapartados: Datos generales, Sector de producción, Tipo de minería y proceso mineralúrgico, Estado de restauración y Lugar de emplazamiento.

#### Datos generales

Figuran los campos: Código, Fecha de inventariado, Localización por país, CC.AA, Provincia, Municipio, Paraje, Cuenca hidrográfica, Situación administrativa de la concesión minera, Denominación de la hoja topográfica (1:25.000), Coordenadas geográficas y Coordenadas UTM según elipsoide (ETRS89), Distrito minero.

El código de la escombrera quedará compuesto por el número del Mapa topográfico (Escala 1: 25.000), seguido del cuadrante del Mapa (de 1 a 4), y un número de orden establecido en campo o en gabinete separados por espacios en blanco. Por ejemplo 976 II 3 007, donde 976 II es el número del Mapa (Escala 1: 25.000), 3 es el cuadrante del mapa en el que quedaría ubicada la estructura, 007 es un orden dado en función de la ruta establecida en gabinete o campo y del número de estructuras que pueda haber dentro de cada cuadrante.

#### Sector de producción

Se corresponde exclusivamente con el sector minero al que corresponde el aprovechamiento (“Áridos”, “Energético - Carbón energético - Uranio”, “Minerales industriales”, “Minería metálica” o “Roca ornamental”).

#### Tipo de minería

Recopila información relativa al proceso minero aplicado que ha dado como resultado el residuo constituyente del depósito. Recoge información respecto al tipo de laboreo (“Cielo



abierto”, “Mixto” o “Subterráneo”), respecto a la tipología de la minería o proceso mineralúrgico aplicado (“Avances de galerías”, “Cielo abierto”, “Gravimetría”, “Rechazos de lavaderos” y “Mixto”), y a las menas explotadas.

### Estado de restauración

En este apartado se recoge la información relativa al estado actual de la escombrera y del estado de las labores de restauración (si las hubiera). Recoge información respecto a la actividad de la escombrera (“Activa” o “Inactiva”), respecto a su clausura (“Abandonada” o “Clausurada”), si existen obras de reperfilado de taludes, si existe proyecto de rehabilitación y la naturaleza de la vegetación existente (“Artificial” o “Natural”).

Respecto a la situación de la concesión cabe destacar que habitualmente suele darse el caso de concesiones activas con escombreras inactivas sin vestigios de actividad minera. Aun en este supuesto caso, consideramos como abandonadas aquellas que aun estando la concesión activa no existe vestigios de actividad minera alguna, encontrándose las escombreras en malas condiciones de seguridad, y por supuesto sin tener ningún plan de vigilancia. Por el contrario cuando la concesión está caducada la situación es similar: no se garantizó dejarlas en condiciones de seguridad para las personas y el medio ambiente, por lo que a todos los efectos se deben considera abandonadas.

Así mismo, respecto a la existencia de algún proyecto de rehabilitación, se entiende como tal el diseño de obras de desagüe (canales perimetrales, bajantes, revegetación, geotextiles, geomallas, etc. ) y no a una simple revegetación.

### Lugar de emplazamiento

Se recoge la posición de la escombrera respecto al relieve donde se asienta (“Cabecera de valle”, “Divisoria”, “Exenta”, “Ladera” y “Valle”)

#### ➤ Características Estructurales

El objeto de este apartado se centra en proporcionar los parámetros estructurales necesarios para el dimensionamiento de la estructura, muchos de los cuales serán utilizados a la hora de evaluar el riesgo de la misma.

Consta de los siguientes subapartados: Características geométricas de la estructura y Características de los materiales vertidos.

## Características geométricas de la estructura

Figuran los principales parámetros de la estructura: longitud, ancho, superficie, volumen, altura máxima, talud general y número de bancos.

## Características de los materiales vertidos

En este subapartado figura información relativa a la litología ya la durabilidad o resistencia a la meteorización de los materiales vertidos en tres categorías:

- Rocas durables o escasamente meteorizables” (con menos de un 10% de finos)
- Rocas de durabilidad variable” (con entre un 10 y un 20% de finos)
- Rocas de baja durabilidad (con más de un 25 % de finos)

### ➤ Estabilidad física

El objeto de este apartado se centra en la adquisición de toda la información necesaria para la correcta evaluación de la estabilidad de la estructura desde el punto de vista geotécnico.

Consta de los siguientes subapartados: Características del sustrato de cimentación, Indicios de inestabilidad, Funcionamiento del sistema de drenaje, Presencia de agua y Factores desencadenantes.

## Características del sustrato de cimentación

Recoge información de interés de cara a evaluar las características estructurales y la competencia geotécnica de los materiales geológicos sobre los que se sustenta la estructura. Los campos que figuran en este subapartado son: Litología; pendiente del fondo de valle o de ladera; tipo de sustrato de la escombrera vaso (“Roca sana”, “Roca alterada”, “Suelo consolidado” y “Suelo no consolidado”); permeabilidad y profundidad del nivel freático.

## Indicios de inestabilidad

Este subapartado hace hincapié en la presencia de elementos que pueden resultar indicadores de inestabilidades en la estructura: presencia de grietas en cabecera, asentamientos, erosión en regueros y erosión en cárcavas, socavación mecánica, deslizamientos locales, y deslizamientos generalizados, e indicios de sobrecarga de la estructura.

## Funcionamiento del sistema de drenaje

En este punto se recoge información relativa a la presencia y funcionamiento de posibles sistemas de drenaje para la estructura, figurando los siguientes elementos: drenaje en núcleo central mediante escollera, drenaje de fondo mediante tubería, canales perimetrales, canales en bermas; y bajantes; destacando no sólo la existencia de dichos elementos sino también su estado de funcionamiento.

## Presencia de agua

El objetivo de este subapartado consiste en definir el funcionamiento hidráulico de la escombrera.

Se consideran los siguientes aspectos para este apartado: Presencia de surgencias, Abombamiento del talud, Presencia de un nivel permanente u ocasional de lámina de agua en el pie de talud o evidencias de socavamiento hídrico.

## Factores desencadenantes

El objeto de este subapartado se centra en la información relativa a la existencia de posibles fenómenos desencadenantes que puedan poner en peligro la integridad de la estructura. Se recogen los datos de precipitación media anual ( $l/m^2$ ), precipitación máxima en 24 horas ( $l/m^2$ ) para un periodo de retorno de 100 años, factor R (erosividad), sismicidad de la zona (g), presencia de material licuefactable o evidencias de actuaciones antrópicas desestabilizadoras sobre el depósito

Todos estos datos son básicos para interpretar posibles acontecimientos que puedan desencadenar la rotura de la escombrera.

La precipitación máxima en 24 horas ( $l/m^2$ ) para un periodo de retorno de 100 años se calcula con la aplicación del CEDEX, MAXPLUWIN (Máximas lluvias diarias en la España peninsular) que se puede encontrar en la guía “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” del CEDEX.

Para el cálculo de la sismicidad de la zona se ha considerado la aceleración básica de la gravedad (g) del Mapa Sísmico de la Norma Sismorresistente (NCSE-02). Factor R se utiliza para valorar la erosión hídrica, se puede obtener en Internet en la aplicación SIG del Sistema de Información Agrario del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

## ➤ Estabilidad química

Este apartado recoge toda la información que permitirá evaluar la escombrera desde el punto de vista geoquímico de cara a evaluar su potencial como foco contaminante.

## Composición química

En este campo se recoge la composición de los materiales de las escombreras, analizados mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX). Este método analítico nos permite analizar la concentración de los metales. El objetivo es realizar una aproximación de contaminación de suelos, comparando estas concentraciones con los niveles genéricos de referencia (NGR) de las Comunidades Autónomas.

Para ello es suficiente una pequeña muestra de peso no superior a 50 gramos. Muestra recogida, a su vez, de otra mayor que es el resultado de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una barrena manual (tipo barrena Edelman). Los metales analizados son los que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

## Indicios de contaminación

En este campo se abren varias opciones, compatibles entre ellas. Como son la posibilidad de existencia de aguas superficiales aguas arriba y aguas abajo, drenajes, represamientos en el cuerpo de la escombrera, etc. Por otro lado, los parámetros analizados son pH, conductividad y concentración de metales que figuran en al Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

Ensayo de Lixiviación de campo. Así mismo, se recoge la analítica de aguas del lixiviado procedente de una muestra recogida de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una manual (tipo barrena Edelman). Este lixiviado se obtiene mediante ensayo de campo SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) o método EPA-1312 (USEPA, 1994), en la ficha figura como Ensayo de Lixiviación Campo.

Como ensayo lixiviación de laboratorio se recoge el Ensayo normalizado EN 12457-2 Caracterización de residuos, lixiviación, ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Ensayo con una relación líquido/sólido de 10 l/Kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm. Ambos casos se incluye pH, conductividad, concentración de metales que figuran en al Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

➤ Factores de exposición

Este apartado recoge la información relativa a la presencia de elementos territoriales que pueden verse afectados por la escombrera en caso de producirse algún tipo de fallo (deslizamientos, formación de lixiviados, etc.).

Usos del suelo

Figura una descripción de los posibles usos del suelo existentes en el entorno inmediato de la escombrera: minero, erial, agrícola, etc.

Elementos expuestos

Figura en este subapartado un listado de los posibles elementos expuestos en caso de fallo del depósito: población, dotación, infraestructuras, etc., indicando tanto la distancia al depósito de residuos mineros como la orientación que guarda respecto al mismo (a efectos de obtener una perspectiva rápida de su ubicación respecto al mismo)

Accesibilidad

Campo referente al grado de acceso para persona y animales, y la peligrosidad que pueda suponer, tanto por contaminación química por exposición al residuo como por caídas accidentales por acceso al depósito.

➤ Información adicional

Este apartado recopila toda la información gráfica obtenida de la escombrera dividida en los siguientes subapartados:

- Mapa de situación: Mapa topográfico con Escala gráfica, situación de la escombrera y coordenadas geodésicas de posición (ETRS89).

- Estructuras en planta: Usando como base la fotografía aérea de la escombrera, en este mapa se señalan los principales elementos que puedan afectar a la estabilidad de ésta: cárcavas, deslizamientos, etc.

- Esquema de perfil. Sección o secciones más representativas de la escombrera.

- Reportaje fotográfico. Incluye diversas fotografías de escombrera con su correspondiente pie de foto explicativo.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE PILAS Y VERTEDEROS DE LIXIVIACIÓN

Esta tipología de depósitos de residuos se ha separado de las escombreras por sus especiales características, tanto en lo que refiere a la altura, granulometría y grado de saturación que pueden alcanzar debido a la irrigación de las capas mediante un lixivante.

Existe una gran confusión respecto a la terminología. En general, el termino vertedero o botadero de lixiviación “dump leaching” se refiere a la lixiviación de minerales sin tratamiento (trituración) transportados desde el mismo frente de explotación de yacimientos marginales (pórfidos cobrizos) o con leyes pobres de minerales de montera (oxidados). Los montones de las menas voladas a una determinada malla se trasportan desde el frente de la corta a los vertederos donde se vierten en capas de 15 a 20 metros de altura, el tamaño de grano varia entre 200 mm a tamaños de gravas y arenas. Generalmente, el mineral marginal se deposita en zonas cerradas y con poca altura, en bancos de 15 a 20 metros de altura, con longitudes de 300-500 metros y anchuras de 30-50 metros. Dentro del proyecto de explotación del mineral, esta operación se diseña para la obtención de un subproducto que mejora la economía de la explotación.

Actualmente, el método mas extendido es de pilas de lixiviación o “heap leaching”, aplicados a minerales de oro, cobre, níquel, uranio previamente semipreparados; con pilas que se forman en cortos periodos de tiempo; con alturas de 2 a 15 metros; tonelajes que pueden oscilar entre 5.000 a 500.000 toneladas por pila, cuya recuperación es mayor y más rápida que el método de botaderos de lixiviación, siendo esta operación la principal constituyendo, por tanto, el beneficio principal del yacimiento, debido a los bajos costos de inversión y operación, rapidez de ejecución del proyecto, simplicidad y flexibilidad de la operación. Es la técnica más extendida en yacimientos de pórfidos cupríferos (sulfuros y óxidos de cobre), depósitos de gran tonelaje y baja ley tipo Cu-Mo, Cu-Au, Cu, Au y Mo, generalmente con contenidos en Cu < 1% y 0,4 a 2 gr/tonelada de oro. Debido a sus bajas leyes la minería de pórfidos no permite un proceso de tratamiento más desarrollado o caro, debe ser de bajo costo y ello se logra mediante una minería masiva no selectiva.

Las menas acumuladas en pilas se someten a una lixiviación mediante ácido sulfúrico, sulfato férrico, cianuro sódico, etc., según sean óxidos de cobre, sulfuros de cobre, u oro, respectivamente. Para que el lixiviado sea efectivo se necesita que el tamaño de mena sea homogéneo, generalmente, el mineral se somete a un proceso de machaqueo y trituración para obtener, a veces, tamaños de grano inferior a ½, o incluso por debajo de ¾ de pulgada.

Este sistema, necesitan un preparación del terreno y de la instalación para ello se realiza el movimiento de tierras adecuado para suavizar pendientes (pendientes que pueden ser de un 1% hacia el lado de anchura y de un 4% en la longitud de la pila) y hacer lo mas efectivo posible la reactividad del lixivante. La base se compacta con materiales de baja permeabi-



lidad de unos 300 mm de espesor sobre la que va una geomenbrana impermeable que puede ser de polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 a 1,5 mm de espesor; la geomenbrana va protegida por una capa de tierra arcillosa y piedras de uno 350 mm de espesor cuyo fin es proteger la geomenbrana de los golpes e impactos del vertido de la primera tongada; sobre esta capa, llamada protective layer (PL), se colocan una serie de tuberías colectoras que recogen el lixiviado y le conducen a las piscinas. Sobre cada capa, a medida que se va agotando el mineral, se coloca una serie de aspersores que riegan la pila con el lixivante convenido. La geometría que adquiere tiene forma trapezoidal pudiendo alcanzar grandes superficies y alturas superiores a los 100 metros. Cada capa puede tener, habitualmente, entre 2 y 15 metros y se vierten siguiendo el ángulo de reposo del material, el líquido fértil se recoge en unas piscinas desde se bombea a la planta de procesos.

La ficha consta de los siguientes apartados:

➤ Portada

Donde figuran los siguientes elementos:

- Campos identificativos de la estructura: Código; Localización; Distrito minero; Sector de producción; superficie; volumen; altura máxima.
- Mapa de España con la provincia donde se encuentra la escombrera.
- Cuadro Resumen: en el que se recogen las principales características de la pila o vertedero, condicionantes de la estabilidad (deslizamientos, cárcavas, regueros), concentración química de aguas, composición química de los lodos, ensayos, peligrosidad física, índice de toxicidad o factor de toxicidad, etc.

➤ Información general

En este apartado se recoge información general relativa al depósito. El objeto de dicha información persigue la correcta caracterización y ubicación de la pila o vertedero, así como la definición del estado en que se encuentra.

Consta de los siguientes subapartados: Datos generales, Sector de producción, Tipo de minería y proceso mineralúrgico, Estado de restauración y Lugar de emplazamiento.

Datos generales

Figuran los campos: Código, Fecha de inventariado, Localización por país, CC.AA, Provincia, Municipio, Paraje, Cuenca hidrográfica, Situación administrativa de la concesión

minera, Denominación de la hoja topográfica (1:25.000), Coordenadas geográficas y Coordenadas UTM según elipsoide (ETRS89), Distrito minero.

El código de la pila o vertedero quedará compuesto por el número del Mapa topográfico (Escala 1: 25.000), seguido del cuadrante del Mapa (de 1 a 4), y un número de orden establecido en campo o en gabinete separados por espacios en blanco. Por ejemplo 976 II 3 007, donde 976 II es el número del Mapa (Escala 1: 25.000), 3 es el cuadrante del mapa en el que quedaría ubicada la estructura, 007 es un orden dado en función de la ruta establecida en gabinete o campo y del número de estructuras que pueda haber dentro de cada cuadrante.

### Sector de producción

Se corresponde exclusivamente con el sector minero al que corresponde el aprovechamiento (“Áridos”, “Energético - Carbón energético - Uranio”, “Minerales industriales”, “Minería metálica” o “Roca ornamental”).

### Tipo de minería

Recopila información relativa al proceso minero aplicado que ha dado como resultado el residuo constituyente del depósito. Recoge información respecto al tipo de laboreo (“Cielo abierto”, “Mixto” o “Subterráneo”), respecto a la tipología de la minería o proceso de lixiviación aplicado (“Ácido sulfúrico”, “Cianuración”, “Sulfato férrico” y “Otros”), y a las menas explotadas.

### Estado de restauración

En este apartado se recoge la información relativa al estado actual de las pilas o vertederos y del estado de las labores de restauración (si las hubiera). Recoge información respecto a la actividad de la pila o vertedero (“Activa” o “Inactiva”), respecto a su clausura (“Abandonada” o “Clausurada”), si existen obras de reperfilado de taludes, si existe proyecto de rehabilitación y la naturaleza de la vegetación existente (“Artificial” o “Natural”).

Respecto a la situación de la concesión cabe destacar que habitualmente suele darse el caso de concesiones activas con pilas o vertederos inactivos sin vestigios de actividad minera. Aun en este supuesto caso, consideramos como abandonadas aquellas que aun estando la concesión activa no existe vestigios de actividad minera alguna, encontrándose las pilas o vertederos en malas condiciones de seguridad, y por supuesto sin tener ningún plan de vigilancia. Por el contrario cuando la concesión está caducada la situación es similar: no se garantizó dejarlas en condiciones de seguridad para las personas y el medio ambiente, por lo que a todos los efectos se deben considera abandonadas.

Así mismo, respecto a la existencia de algún proyecto de rehabilitación, se entiende como tal el diseño de obras de desagüe (canales perimetrales, bajantes, revegetación, geotextiles, geomallas, etc.) y no a una simple revegetación.

### Lugar de emplazamiento

Se recoge la posición de la pila o vertedero respecto al relieve donde se asienta (“Cabeza de valle”, “Divisoria”, “Exenta”, “Ladera” y “Valle”)

### ➤ Características Estructurales

El objeto de este apartado se centra en proporcionar los parámetros estructurales necesarios para el dimensionamiento de la estructura, muchos de los cuales serán utilizados a la hora de evaluar el riesgo de la misma.

Consta de los siguientes subapartados: Características geométricas de la estructura y Granulometría.

#### Características geométricas de la estructura

El objeto de este apartado se centra en proporcionar los parámetros estructurales necesarios para el dimensionamiento de la estructura, muchos de los cuales serán utilizados a la hora de evaluar el riesgo de la misma.

#### Características geométricas de la estructura

Figuran los principales parámetros de la estructura: longitud, ancho, superficie, volumen, altura máxima, talud general, número de bancos y número de piscinas de lixiviación.

#### Granulometría

Se recogen los datos del tamaño de grano de la pila o vertedero. En el caso de las pilas los materiales suelen estar triturados a tamaños de grano inferior a 6 mm. En el caso de los vertederos el tamaño es el propio de la voladura, generalmente inferior a 200 mm. Así mismo se recoge la litología de los materiales.

## ➤ Estabilidad física

El objeto de este apartado se centra en la adquisición de toda la información necesaria para la correcta evaluación de la estabilidad de la estructura desde el punto de vista geotécnico.

Consta de los siguientes subapartados: Características del sustrato de cimentación, Indicios de inestabilidad, Funcionamiento del sistema de drenaje, Presencia de agua y Factores desencadenantes.

### Características del sustrato de cimentación

Recoge información de interés de cara a evaluar las características estructurales y la competencia geotécnica de los materiales geológicos sobre los que se sustenta la estructura. Los campos que figuran en este subapartado son: Litología; pendiente del fondo de valle o de ladera; tipo de sustrato de la escombrera vaso (“Roca sana”, “Roca alterada”, “Suelo consolidado” y “Suelo no consolidado”); permeabilidad y profundidad del nivel freático.

### Indicios de inestabilidad

Este subapartado hace hincapié en la presencia de elementos que pueden resultar indicadores de inestabilidades en la estructura: presencia de grietas en cabecera, asentamientos, erosión en regueros y erosión en cárcavas, socavación mecánica, deslizamientos locales y deslizamientos generalizados, e indicios de sobrecarga de la estructura.

### Funcionamiento del sistema de drenaje

En este punto se recoge información relativa a la presencia y funcionamiento de posibles sistemas de drenaje para la estructura, figurando los siguientes elementos: caballones o zanjas de rebose, aislamiento de base, canales perimetrales, canales en bermas; y bajantes; destacando no sólo la existencia de dichos elementos sino también su estado de funcionamiento.

### Presencia de agua

El objetivo de este subapartado consiste en definir el funcionamiento hidráulico de la pila o vertedero. Se consideran los siguientes aspectos para este apartado: Presencia de surgencias, Abombamiento del talud, Presencia de un nivel permanente u ocasional de lámina de agua en el pie de talud o evidencias de socavamiento hídrico. También se contempla el registro del grado de saturación de los residuos de la pila o vertedero

## Factores desencadenantes

El objeto de este subapartado se centra en la información relativa a la existencia de posibles fenómenos desencadenantes que puedan poner en peligro la integridad de la estructura. Se recogen los datos de precipitación media anual ( $l/m^2$ ), precipitación máxima en 24 horas ( $l/m^2$ ) para un periodo de retorno de 100 años, factor R (erosividad), sismicidad de la zona (g), presencia de material licuefactable o evidencias de actuaciones antrópicas desestabilizadoras sobre el depósito

Todos estos datos son básicos para interpretar posibles acontecimientos que puedan desencadenar la rotura de la pila o vertedero.

La precipitación máxima en 24 horas ( $l/m^2$ ) para un periodo de retorno de 100 años se calcula con la aplicación del CEDEX, MAXPLUWIN (Máximas lluvias diarias en la España peninsular) que se puede encontrar en la guía “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” del CEDEX.

Para el cálculo de la sismicidad de la zona se ha considerado la aceleración básica de la gravedad (g) del Mapa Sísmico de la Norma Sismorresistente (NCSE-02). Factor R se utiliza para valorar la erosión hídrica, se puede obtener en Internet en la aplicación SIG del Sistema de Información Agrario del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

### ➤ Estabilidad química

## Composición química

En este campo se recoge la composición de los materiales de las pilas y vertederos, analizados mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX). Este método analítico nos permite analizar la concentración de los metales. El objetivo es realizar una aproximación de contaminación de suelos, comparando estas concentraciones con los niveles genéricos de referencia (NGR) de las Comunidades Autónomas.

Para ello es suficiente una pequeña muestra de peso no superior a 50 gramos. Muestra recogida, a su vez, de otra mayor que es el resultado de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una barrena manual (tipo barrena Edelman). Los metales analizados son los que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

## Indicios de contaminación

En este campo se abren varias opciones, compatibles entre ellas. Como son la posibilidad de existencia de aguas superficiales aguas arriba y aguas abajo, drenajes, represamientos en el cuerpo de la pila y agua en las piscinas, etc. Los parámetros analizados son pH, conductividad y concentración de metales que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

Ensayo de Lixiviación de campo. Así mismo, se recoge la analítica de aguas del lixiviado procedente de una muestra recogida de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una manual (tipo barrena Edelman). Este lixiviado se obtiene mediante ensayo de campo SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) o método EPA-1312 (USEPA, 1994), en la ficha figura como Ensayo de Lixiviación Campo.

Como ensayo de lixiviación de laboratorio se recoge el Ensayo normalizado EN 12457-2 Caracterización de residuos, lixiviación, ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Ensayo con una relación líquido/sólido de 10 l/Kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm. Ambos casos se incluye pH, conductividad, concentración de metales que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

### ➤ Factores de exposición

Este apartado recoge la información relativa a la presencia de elementos territoriales que pueden verse afectados por la pila o vertedero en caso de producirse algún tipo de fallo (deslizamientos, escape de lixiviados, etc.).

## Usos del suelo

Figura una descripción de los posibles usos del suelo existentes en el entorno inmediato de la escombrera: minero, erial, agrícola, etc.

## Elementos expuestos

Figura en este subapartado un listado de los posibles elementos expuestos en caso de fallo del depósito: población, dotación, infraestructuras, etc., indicando tanto la distancia al depósito de residuos mineros como la orientación que guarda respecto al mismo (a efectos de obtener una perspectiva rápida de su ubicación respecto al mismo).



## Accesibilidad

Campo referente al grado de acceso para persona y animales, y la peligrosidad que pueda suponer, tanto por contaminación química por exposición al residuo como por caídas accidentales por acceso al depósito.

### ➤ Información adicional

Este apartado recopila toda la información gráfica obtenida de la escombrera dividida en los siguientes subapartados:

- Mapa de situación: Mapa topográfico con Escala gráfica, situación de la pila o vertedero y coordenadas geodésicas de posición (ETRS89).

- Estructuras en planta: Usando como base la fotografía aérea de la pila o vertedero, en este mapa se señalizan los principales elementos que puedan afectar a la estabilidad de ésta: cárcavas, deslizamientos, etc.

- Esquema de perfil. Sección o secciones más representativas de la escombrera.

- Reportaje fotográfico. Incluye diversas fotografías de la pila o vertedero con su correspondiente pie de foto explicativo.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

Se denomina presa de lodos a un depósito elevado por encima del nivel del terreno en el que se realiza el vertido de los lodos o colas en solución acuosa mediante un sistema hidráulico de bombeo o por gravedad desde el lavadero del mineral. Consta de un dique o muro exterior que retiene los depósitos de estériles de lavadero y que, excepto en presas de tierras, se va recreciendo a medida que aumenta el nivel de lodos; una playa de arenas de baja pendiente en las proximidades del vertido, vertido que da lugar a una segregación de partículas provocando una clasificación espontánea de los residuos en base a la densidad de éstas, las fracciones más gruesas se depositan cerca del punto de vertido, en tanto que las más finas se transportan a zonas más distantes; y un lago de aguas claras o sobrenadante donde la fracción más fina sedimenta bajo la laguna de decantación. Por el contrario se denomina balsa a una estructura realizada o aprovechada por debajo del terreno (hueco, corta, etc.) que retiene lodos de minería.

En términos anglosajones se denomina “tailings dam” o “tailings embankment” a las presas mineras y “tailings pond” al sobrenadante, denominándose “pit-tailing storage” a balsas de lodos.

Entendemos que estas definiciones universales en el mundo de la minería son necesarias como consecuencia de las definiciones que figuran en la Directiva 2006/21/CE de Gestión de Residuos de Industrias Extractivas, que define:

«Presa»: una estructura construida diseñada para contener o confinar agua y/o residuos en una balsa.

«Balsa»: una estructura natural o construida para la eliminación de residuos de grano fino, normalmente residuos de extracción y tratamiento, junto con cantidades diversas de agua libre, resultantes del tratamiento de recursos minerales y del aclarado y reciclado del agua usada para dicho tratamiento.

La ficha consta de los siguientes apartados:

#### ➤ Portada

Donde figuran los siguientes elementos:

- Campos identificativos de la estructura: Código; Localización; Distrito minero; Sector de producción; superficie; volumen; altura máxima.
- Mapa de España con la provincia donde se encuentra la escombrera.
- Cuadro Resumen: en el que se recogen las principales características de la presa de residuos, condicionantes de la estabilidad (deslizamientos, cárcavas, regueros), concentración química de aguas, composición química de los lodos, ensayos, peligrosidad física, índice de toxicidad o factor de toxicidad, etc.

#### ➤ Información general

En este apartado se recoge información general relativa al depósito. El objeto de dicha información persigue la correcta caracterización y ubicación de la presa de residuos, así como la definición del estado en que se encuentra.

Consta de los siguientes subapartados: Datos generales, Sector de producción, Tipo de minería y proceso mineralúrgico, Sistema de vertido, Estado de restauración y Lugar de emplazamiento.

#### Datos generales

Figuran los campos: Código, Fecha de inventariado, Localización por país, CC.AA, Provincia, Municipio, Paraje, Cuenca hidrográfica, Situación administrativa de la concesión minera, Denominación de la hoja topográfica (1:25.000), Coordenadas geográficas y Coor-

denadas UTM según elipsoide (ETRS89), Distrito minero y Clasificación (conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre seguridad de Presas y Embalses).

El código de la presa de residuos quedará compuesto por el número del Mapa topográfico (Escala 1: 25.000), seguido del cuadrante del Mapa (de 1 a 4), y un número de orden establecido en campo o en gabinete separados por espacios en blanco. Por ejemplo 976 II 3 007, donde 976 II es el número del Mapa (Escala 1: 25.000), 3 es el cuadrante del mapa en el que quedaría ubicada la estructura, 007 es un orden dado en función de la ruta establecida en gabinete o campo y del número de estructuras que pueda haber dentro de cada cuadrante.

Para el caso de las presas de residuos constituidas por un depósito principal y uno o más recrecimientos, ciertos datos han requerido la definición de un segundo grupo de códigos que especifican a que elemento queda referida la información recopilada en la ficha. Este segundo grupo de códigos vendrá constituido por el código de la presa de residuos seguido de un guion y el sufijo PR en el caso de tratarse del depósito principal de la presa, o del código R1, R2, R3... cuando se trata de uno de sus recrecimientos (recrecimiento 1, recrecimiento 2, ...).

## Sector de producción

Se corresponde exclusivamente con el sector minero al que corresponde el aprovechamiento (“Áridos”, “Energético - Carbón energético - Uranio”, “Minerales industriales”, “Minería metálica” o “Roca ornamental”).

## Tipo de minería

Recopila información relativa al proceso minero aplicado que ha dado como resultado el residuo constituyente del depósito. Recoge información respecto al tipo de laboreo (“Cielo abierto”, “Mixto” o “Subterráneo”), respecto a la tipología de la minería o proceso mineralúrgico aplicado (“Flotación”, “Gravimetría”, “Hidrometalurgia” y “Pirometalurgia”), y a las menas explotadas.

## Sistema de vertido

En este subapartado dispone de información relativa al punto y tipo de vertido de los lodos en la presa. Recoge información relativa al tipo de vertido en base al estado de los lodos (“Deshidratados”, “Espesados”, “Lodos de flotación”, “Pasta” o “Mixto”).

## Estado de restauración

En este apartado se recoge la información relativa al estado actual de la presa de residuos y del estado de las labores de restauración (si las hubiera). Recoge información respecto a la actividad de la escombrera (“Activa” o “Inactiva”), respecto a su clausura (“Abandonada” o “Clausurada”), si existen obras de reperfilado de taludes, si existe proyecto de rehabilitación y la naturaleza de la vegetación existente (“Artificial” o “Natural”). También se especifica el estado de la restauración en los taludes y en el vaso especificándose si existe cobertura, su grado (“Alto”, “Medio” o “Bajo”) y su naturaleza (“Natural”, “Artificial” o “Mixta”). Por último se especifica si la presa de residuos se encuentra vigilada o monitorizada.

Respecto a la situación de la concesión cabe destacar que habitualmente suele darse el caso de concesiones activas con presas de residuos inactivas sin vestigios de actividad minera. Aun en este supuesto caso, consideramos como abandonadas aquellas que aun estando la concesión activa no existe vestigios de actividad minera alguna, encontrándose las presas de residuos en malas condiciones de seguridad, y por supuesto sin tener ningún plan de vigilancia. Por el contrario cuando la concesión está caducada la situación es similar: no se garantizó dejarlas en condiciones de seguridad para las personas y el medio ambiente, por lo que a todos los efectos se deben considera abandonadas.

Así mismo, respecto a la existencia de algún proyecto de rehabilitación, se entiende como tal el diseño de obras de desagüe (canales perimetrales, bajantes, revegetación, geotextiles, geomallas, etc. ) y no a una simple revegetación.

## Lugar de emplazamiento

Se recoge la posición de la pila o vertedero respecto al relieve donde se asienta (“Cabece-ra de valle”, “Divisoria”, “Exenta”, “Ladera” y “Valle”). Igualmente se recoge información relativa al área aguas-arriba de la cuenca en la que se encuentra la presa de residuos y la presencia de otras presas: presa de recuperación de agua (aguas abajo) o de regulación de aguas (aguas arriba).

### ➤ Características Estructurales

El objeto de este apartado se centra en proporcionar los parámetros estructurales necesarios para el dimensionamiento de la estructura, muchos de los cuales serán utilizados a la hora de evaluar el riesgo de la misma.

### Características geométricas de la estructura

Figuran los principales parámetros de la estructura: longitud, ancho, superficie, volumen, altura máxima y talud general.

### Método de construcción de la estructura

Si se han realizado por el método de aguas arriba, aguas abajo o centrada o si es una presa de tierras o mixta- También se especifica si los diques y/o vasos de la presa se encuentran impermeabilizados.

### Material de construcción de los diques

Este apartado recoge la información relativa al material de construcción de los diques tanto del depósito principal de la presa como de los diferentes recrecimientos del mismo, pudiendo los diques venir constituidos por arenas cicladas, entablados, estériles de corta, gaviones, hormigón, lodos de flotación, lodos de flotación entablados, mampostería, material de préstamo, etc.

### Geometría de los diques

De igual manera que el anterior, se recoge información relativa a la forma de los diques tanto del depósito principal de la presa como de sus diferentes recrecimientos. Las posibles formas de los diques se resumen en: lineal, circular, poligonal cóncavo o poligonal convexo.

### Depósito principal / recrecimientos

En este apartado se reserva la información relativa a las unidades constitutivas de la presa de residuos, esto es, del depósito principal y posibles recrecimientos que la integran.

#### ➤ Estabilidad física

### Características del sustrato de cimentación

Este apartado compila la información relativa al sustrato geológico que sirve de soporte a la estructura, viniendo constituido por los campos: litología; pendiente del fondo de valle o pendiente de ladera; tipo de sustrato del dique y del vaso (roca sana, roca alterada, suelo

consolidado y suelo no consolidado) y la profundidad del nivel freático en la zona de ubicación del depósito.

### Indicios de inestabilidad

Se diferencia la información relativa a indicios de inestabilidad en el dique y en el vaso.

#### *Indicios de inestabilidad en dique*

Para cada uno de los diques de cada fase de recrecimiento se recoge la información relativa a la presencia de grietas en dique, grietas en estribos; erosión en regueros, en cárcavas; erosión eólica; socavación hídrica o mecánica; asentamiento; tubificación, colapso o basculamientos.

#### *Indicios de inestabilidad en vaso*

Para cada una de las fases de recrecimiento: grietas; erosión en regueros, en cárcavas; erosión eólica; asentamientos; tubificación; colapso; hundimiento.

### Rotura o fallo de la estructura

Se recogen indicios históricos de fallos en la presa de residuos mineros, diferenciándose deslizamientos, de flujos, hundimientos, o fallos de carácter mixto. Se identifica además las zona donde se produjo el fallo (en el cuerpo, cimientto, pie, vaso) el dimensionamiento del mismo. Por otro lado se especifica si estos indicios comprometen la estabilidad actual de la presa, así como el acontecimiento de daños de carácter personal, daños a bienes o daños de carácter ecológico.

### Factores condicionantes de la estabilidad

Se diferencia la información relativa a condicionantes de la estabilidad en el dique y en el vaso.

Se recogen los datos correspondientes al dique y vaso para cada una de las fases de recrecimiento: la existencia de sobrepaso, basculamiento, costras de oxidación y eflorescencias o sales. Todos estos parámetros condicionan la estabilidad.

El sobrepaso es el tercer factor de rotura según los datos de ICOLD (Comité Internacional de Grandes Presas). Las costras de oxidación (óxidos de hierro) dan estabilidad a los



diques de las presas y salvo en condiciones de aguas ácidas son insolubles. Las sales o eflorescencias, son indicios de filtraciones, dan estabilidad a las presas y actúan como un ligante o cemento, pero en condiciones de alta pluviometría o alta precipitaciones concentradas terminan disolviéndose.

#### Funcionamiento hidráulico del dique principal

Se recogen datos relativos a la presencia de surgencias en el dique, altura de las mismas, caudal, y si existe socavación del pie por la surgencia. Por otro lado se recoge la presencia de abombamientos y de rezumes en el dique (así como la altura de las mismos en caso de existir). Por último se recoge la medida de la altura del nivel freático en el dique y la presencia de vegetación hidrófila en el mismo.

Se ha querido distinguir el término rezume con respecto al de surgencia. Cuando hay humedad pero no en forma de goteo.

#### Funcionamiento hidráulico de la laguna de decantación

Se recoge la existencia de laguna con o sin agua (sobrenadante). También se recogen datos relativos a la geometría de la laguna (longitud, anchura, profundidad, área y volumen estimado de agua) y la presencia de vegetación hidrófila.

A veces, en campo dependiendo de la época de visita se pueden encontrar lagunas sin agua; aun así muchas de éstas no se pueden pisar debido a la existencia de un nivel freático alto, creándose una zona fangosa que dificulta su paso. En otras ocasiones, si la laguna no ha tenido un sobrenadante ácido, habrá presencia de plantas hidrófitas o hidrófilas que son testigos de la presencia de un nivel freático alto (juncos, enneas, carrizos, etc).

#### Funcionamiento del sistema de drenaje

En este punto se recoge información relativa a la presencia y funcionamiento de posibles sistemas de drenaje para la estructura, figurando los siguientes elementos: núcleo central, fondo de vaso, canales perimetrales, chimeneas, aliviadero y drenes californianos; destacando no sólo la existencia de dichos elementos sino también su estado de funcionamiento.

#### Factores desencadenantes

El objeto de este subapartado se centra en la información relativa a la existencia de posibles fenómenos desencadenantes que puedan poner en peligro la integridad de la estructura.

Se recogen los datos de precipitación media anual (l/m<sup>2</sup>), precipitación máxima en 24 horas (l/m<sup>2</sup>) para un periodo de retorno de 100 años, factor R (erosividad), sismicidad de la zona (g), presencia de material licuefactable, fallos de flujo, volcanes o diques de arena, o evidencias de actuaciones antrópicas desestabilizadoras sobre el depósito. Además permite recopilar la posible presencia de inestabilidades en laderas (en una o varias laderas, así como fenómenos de reptación o avalancha) y la presencia de otros depósitos de residuos mineros (contiguos, aguas arriba, aguas abajo, etc.)

Todos estos datos son básicos para interpretar posibles acontecimientos que puedan desencadenar la rotura de la escombrera.

La precipitación máxima en 24 horas (l/m<sup>2</sup>) para un periodo de retorno de 100 años se calcula con la aplicación del CEDEX, MAXPLUWIN (Máximas lluvias diarias en la España peninsular) que se puede encontrar en la guía “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” del CEDEX.

Para el cálculo de la sismicidad de la zona se ha considerado la aceleración básica de la gravedad (g) del Mapa Sísmico de la Norma Sismorresistente (NCSE-02). Factor R se utiliza para valorar la erosión hídrica, se puede obtener en Internet en la aplicación SIG del Sistema de Información Agrario del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Los criterios empleados para la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción del material quedan explicados en el manual **METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN INVENTARIO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS MINEROS CERRADAS O ABANDONADAS**.

### ➤ Estabilidad química

#### Composición química de los lodos

En este campo se recoge la composición de los metales de los lodos, analizados mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX). Este método analítico nos permite analizar la concentración de los metales en la fase sólida. El objetivo es realizar una aproximación de contaminación de suelos, comparando estas concentraciones con los niveles genéricos de referencia (NGR) de las Comunidades Autónomas.

Para ello es suficiente una pequeña muestra de peso no superior a 50 gramos. Muestra recogida, a su vez, de otra mayor que es el resultado de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una barrena manual (tipo Edelman). Los metales analizados son los que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

## Características químicas superficiales del depósito de lodos

En este campo se recogen por fase de recrecimiento correspondiente a cada dique y vaso, la presencia de sulfatos (sales o eflorescencias) e oxihidroxisulfatos en pie, talud, corona del dique y en el vaso.

Los primeros se corresponden a ciclos de evaporación-dilución de sulfatos, consecuencia de la evaporación parcial de soluciones ácidas concentradas producto de la oxidación de la pirita y de la alteración de silicatos. Son de aspecto y colores variados (blanco, amarillo, verde, marrón), muy solubles, se encuentran en los bordes de los cauces, cubriendo superficies de escombreras, presas, pilas, etc. Entre la gran variedad de sulfatos minerales hidratados, principalmente se encuentran: la coquimbita, melanterita, copiapita, rozenita ( $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), halotriquita ( $\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y otras. Son altamente solubles y obedecen a un ciclo de lluvias y tiempo seco, en épocas de lluvia se redisuelven cargando los ríos y arroyos de sulfatos, y en el caso de las sales de hierro y aluminio vuelven a producir acidez.

Los segundos corresponden a la precipitación del hierro en forma de óxidos e hidróxidos e oxihidroxisulfatos de aluminio, en función del pH y Eh en aguas acidas.

Precipitados de color rojo-marrón: Principalmente corresponde a Ferrihidrita y pequeñas cantidades de goetita, su pH va desde 4 a 5,5 y en algunos casos cercanos a pH neutro, su contenido mayoritariamente es de 75 a 81% de Fe y de 16 a 20% de  $\text{H}_2\text{O}$ . La ferrihidrita se forma por oxidación rápida e hidrólisis de  $\text{Fe}^{2+}$  y debido a que es poco estable, se transforma espontáneamente a goetita que es más estable en condiciones aerobias.

Precipitados de color naranja-amarillo. La especie mineralógica dominante es la schwertmannita, su pH esta entre 2,8 y 4,5, esta compuesto de 50 a 60% de Fe, de 11 a 15% de  $\text{SO}_3$ , de 18 a 25% de  $\text{H}_2\text{O}$  y otros.

Precipitados de color blanco: Por lo general corresponde a sulfatos de Al pobremente cristalizados (hidrobasaluminita), a pH próximo a 5, contenido mayoritario compuesto de 41 a 45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de 16 a 18%  $\text{SO}_3$  y de 18 a 25% de  $\text{H}_2\text{O}$ .

## Material depositado sobre los lodos

Este campo recoge posibles materiales que se puedan verter o depositar sobre el vaso de la presa de lodos y que pueden resultar potenciales focos de contaminación: suelos, purines, basuras, estériles de corta, estériles de granulometría, escorias de fundición, residuos agrícolas, u otros.

## Indicios de contaminación

En este campo se abren varias opciones, compatibles entre ellas. Como son la posibilidad de existencia de aguas del sobrenadante, drenajes, represamientos, etc. Los parámetros analizados son pH, conductividad y concentración de metales que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se. En este caso se ha considerado el Al, debido a su alta toxicidad para los ecosistemas acuáticos.

Así mismo, se recoge la analítica de aguas del lixiviado procedente de una muestra recogida de la homogenización de treinta submuestras realizadas a lo largo de un recorrido aleatorio por la superficie transitable del depósito de residuos, recogidos mediante una manual (tipo barrena Edelman). Este lixiviado se obtiene mediante ensayo de campo SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) o método EPA-1312 (USEPA, 1994), en la ficha figura como Ensayo de Lixiviación Campo.

Como ensayo de lixiviación de laboratorio se recoge el Ensayo normalizado EN 12457-2 Caracterización de residuos, lixiviación, ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Ensayo con una relación líquido/sólido de 10 l/Kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm. Ambos casos se incluye pH, conductividad, concentración de metales que figuran en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE más el selenio y el aluminio: Pb, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Cu, Al, V, Mo, Co, Ni, Se.

### ➤ Factores de exposición

Este apartado recoge la información relativa a la presencia de elementos territoriales que pueden verse afectados por la pila o vertedero en caso de producirse algún tipo de fallo (deslizamientos, escape de lixiviados, etc.).

## Usos del suelo

Figura una descripción de los posibles usos del suelo existentes en el entorno inmediato de la presa de residuos mineros: minero, erial, agrícola, etc.

## Elementos expuestos

Figura en este subapartado un listado de los posibles elementos expuestos en caso de fallo del depósito: población, dotación, infraestructuras, etc., indicando la distancia al depósito de residuos mineros.

## Accesibilidad

Campo referente al grado de acceso para persona y animales, y la peligrosidad que pueda suponer, tanto por contaminación química por exposición al residuo como por caídas accidentales por acceso al depósito.

### ➤ Información adicional

Este apartado recopila toda la información gráfica obtenida de la presa de residuos dividida en los siguientes subapartados:

- Mapa de situación: Mapa topográfico con Escala gráfica, situación de la escombrera y coordenadas geodésicas de posición (ETRS89).
- Estructuras en planta: Usando como base la fotografía aérea de la presa de residuos, en este mapa se señalizan los principales elementos que puedan afectar a la estabilidad de ésta: cárcavas, deslizamientos, etc.
- Esquema de perfil. Sección o secciones más representativas de la presa de residuos.
- Reportaje fotográfico. Incluye diversas fotografías de la presa de residuos con su correspondiente pie de foto explicativo.





ANEXOS

MANUAL INVENTARIO



# Ficha tipo escombrera



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

**000 X C 000**

PRESA  
  ESCOMBRERA  
  PILA / VERTEDERO DE LIXIVIADOS  
  Balsa



PAÍS

COMUNIDAD AUTÓNOMA

PROVINCIA

MUNICIPIO

DISTRITO MINERO

SECTOR DE PRODUCCIÓN

SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)

VOLUMEN (m<sup>3</sup>)

ALTURA MÁXIMA (m)

RESUMEN

INFORMACIÓN GENERAL

CÓDIGO	LATITUD (2)
FECHA DE INVENTARIADO	LONGITUD (2)
PAÍS	COORDENADA X UTM (2)
COMUNIDAD AUTÓNOMA	COORDENADA Y UTM (2)
PROVINCIA	HUSO UTM
MUNICIPIO	DISTRITO MINERO
PARAJE	
CUENCA HIDROGRÁFICA	
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA	
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	Autorizado Caducado Cancelado
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000	

- (1) Situación administrativa del Derecho minero
- (2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
- (3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

OBSERVACIONES



## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## INFORMACIÓN GENERAL

## SECTOR DE PRODUCCIÓN

SECTOR DE PRODUCCION	Áridos Energético - Carbón Energético - Uranio Minerales industriales Minería metálica Roca ornamental
----------------------	--

## OBSERVACIONES

## TIPO DE MINERÍA Y PROCESO MINERALÚRGICO

TIPO DE LABOREO	Cielo abierto Mixto Subterráneo
-----------------	---------------------------------

PROC. MINERO-MINERALURGICO	Avances de galerías Cielo Abierto Gravimetría Rechazos de lavaderos Mixto
----------------------------	---

## MENAS

## OBSERVACIONES

## ESTADO DE RESTAURACIÓN

ACTIVIDAD	Activa Inactiva
-----------	-----------------

CLAUSURA	Abandonada Clausurada
----------	-----------------------

REPERFILADO DE TALUDES	SI / NO
------------------------	---------

PROYECTO DE REHABILITACIÓN	SI / NO
----------------------------	---------

REVEGETACIÓN	Artificial Natural
--------------	--------------------

## Taludes

COBERTURA	SI / NO
-----------	---------

GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
--------------------	-----------------

TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto
-------------------	--------------------------

## Plataforma superior

COBERTURA	SI / NO
-----------	---------

GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
--------------------	-----------------

TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto
-------------------	--------------------------

VIGILADA	SI / NO
----------	---------

MONITORIZADA	SI / NO
--------------	---------

## OBSERVACIONES

## LUGAR DE EMPLAZAMIENTO

LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	Cabecera de valle Divisoria Exenta Ladera Valle
------------------------	---

## OBSERVACIONES

**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA**

---

LARGO (m)
ANCHO (m)
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )
ALTURA MÁXIMA (m)
TALUD GENERAL (°)
NÚMERO DE BANCOS

**OBSERVACIONES**

**GRANULOMETRÍA**

---

LITOLÓGIA	
DURABILIDAD ALTA (1)	SI / NO
DURABILIDAD MEDIA (2)	SI / NO
DURABILIDAD BAJA (3)	SI / NO

(1) Rocas escasamente meteorizables. Menos de un 10% de finos

(2) Rocas moderadamente meteorizables. Entre un 10 y un 20% de finos

(3) Rocas muy meteorizables. Más de un 20% de finos

**OBSERVACIONES**



## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD FÍSICA

## CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN

LITOLOGIA	
PENDIENTE DE VALLE (°)	
PENDIENTE DE LA LADERA (°)	
TIPO DE SUSTRATO	Roca sana Roca alterada Suelo consolidado Suelo no consolidado
PROF. DEL NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

## INDICIOS DE INESTABILIDAD

GRIETAS EN CABECERA	SI / NO
ASENTAMIENTOS	SI / NO
EROSION EN REGUEROS	SI / NO
EROSION EN CARCAVAS	SI / NO
SOCAVAMIENTO MECANICO	SI / NO
DESPLAZAMIENTO LOCAL	SI / NO
DESPLAZAMIENTO GENERAL	SI / NO
SOBRECARGA	SI / NO

## OBSERVACIONES

## FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE

NÚCLEO CENTRAL	- Funciona	No funciona
DRENAJE DE FONDO	- Funciona	No funciona
CANALES PERIMETRALES	- Funciona	No funciona
CANALES EN BERMAS	- Funciona	No funciona
BAJANTES	- Funciona	No funciona

## OBSERVACIONES

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

ESTABILIDAD FÍSICA

---

**PRESENCIA DE AGUA**

<b>SURGENCIAS</b>	SI / NO
<b>ABOMBAMIENTO DEL TALUD</b>	SI / NO
<b>PRESENCIA DE NIVEL FREÁTICO</b>	SI / NO
<b>SOCAVAMIENTO HÍDRICO</b>	SI / NO

**OBSERVACIONES**

---

**FACTORES DESENCADENANTES**

<b>PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>FACTOR R</b>	
<b>SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)</b>	
<b>MATERIAL LICUEFACTABLE</b>	SI / NO
<b>ACTUACIONES ANTROPICAS</b>	SI / NO

**OBSERVACIONES**

(1) De conformidad con la normativa sismorresistente vigente NCSR-02

## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD QUÍMICA

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	---------------

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

## INDICIOS DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
Surgencia			SI / NO	
Drenaje				
Ensayo Lixiviación Laboratorio				
Aguas superficiales aguas arriba				
Aguas superficiales aguas abajo				
Represamiento				
Ensayo Lixiviación Campo				

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

## Metales

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
Surgencia													
Drenaje													
Ensayo Lixiviación Laboratorio													
Aguas superficiales aguas arriba													
Aguas superficiales aguas abajo													
Represamiento													
Ensayo Lixiviación Campo													

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

**INFORME**

**FACTORES DE EXPOSICIÓN**

**USOS DEL SUELO**

**DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES**

**ELEMENTOS EXPUESTOS**

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
	Población	N		
	Dotación	NE		
	Infraestructuras - Ferrocarril	E		
	Infraestructuras - Vial	SE		
	Infraestructuras - Otras	S		
	Masas forestales bien conservadas	SO		
	Uso agrícola de alta intensidad	O		
	Red fluvial	NO		
	Zonas sensibles - ENP			
	Zonas sensibles - Humedal RAMSAR			
	Zonas sensibles - Patrimonio cultural			
	Zonas sensibles - RN 2000			
	Zonas sensibles - Otras			

**ACCESIBILIDAD**

GRADO DE ACCESIBILIDAD	Muy accesible	Accesible	Difícilmente accesible	No accesible

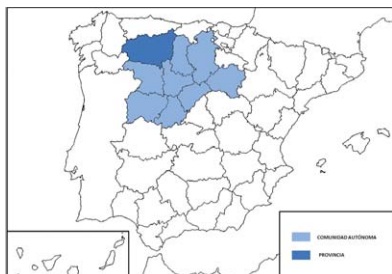
**OBSERVACIONES**

## Ejemplo de ficha de escombrera



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

126 II 3 014

 PRESA     ESCOMBRERA     PILA / VERTEDERO DE LIXIVIADOS     Balsa


PAÍS	España
COMUNIDAD / REGIÓN	Castilla y León
PROVINCIA	León
MUNICIPIO	Fabero
DISTRITO MINERO	Cuenca carbónifera del Bierzo
SECTOR DE PRODUCCIÓN	Energético - Carbón
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	307570
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	-1
ALTURA MÁXIMA (m)	-1

## RESUMEN

Forma parte del conjunto de varias estructuras de residuos de carbón que a lo largo de 5 km del valle del Río Cúa afectan, ocasionalmente, coincidiendo con precipitaciones de agua o nieve continuas, por contaminación química a las aguas del río con muertes de fauna piscícola; además de la contaminación física por arrastre de finos al río.

Escombrera de cielo abierto de minería de carbón restaurada, aunque con procesos de erosión-sedimentación.

Tiene una surgencia como consecuencia, bien de la filtración de la lluvia en una zona endorreica, de la filtración del arroyo Lamocos o de una antigua mina de interior que da lugar a coloides de oxihidroxisulfatos de aluminio a pH (4.6-5) muy tóxicos para la fauna acuática.

Concentración de metales en la surgencia en época de lluvias, tomada por la Confederación Hidrográfica Miño-Sil en fecha de 02/12/2009, en (µg/L): pH (4.6) Cond. (610 µS/cm); AL (5800); Zn (87); Cu (8).

CATEGORÍA: A

INFORMACIÓN GENERAL

CÓDIGO	126 II 3 014	LATITUD (2)	42º 46' 10,24"
FECHA DE INVENTARIADO	07/02/2012	LONGITUD (2)	06º 39' 05,31"
PAÍS	España	COORDENADA X UTM (2)	692142,71
COMUNIDAD AUTÓNOMA	Castilla y León	COORDENADA Y UTM (2)	4737894,65
PROVINCIA	León	HUSO UTM	29
MUNICIPIO	Fabero	DISTRITO MINERO	Cuenca carbónifera del Bierzo
PARAJE	Río Cúa		
CUENCA HIDROGRÁFICA	Miño-Sil		
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA	Sil		
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	-		
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000	126 II 3 014		

(1) Situación administrativa del Derecho minero

(2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89

(3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

OBSERVACIONES Cielo abierto revegetado.



## INFORME 126 II 3 014

## INFORMACIÓN GENERAL

**SECTOR DE PRODUCCIÓN**

<b>SECTOR DE PRODUCCION</b>	Energético - Carbón
<b>OBSERVACIONES</b>	Escombrera de cielo abierto

**TIPO DE MINERÍA Y PROCESO METALÚRGICO**

<b>TIPO DE LABOREO</b>	Cielo abierto
<b>PROC. MINERO-MINERALURGICO</b>	-
<b>MENAS</b>	Carbón
<b>OBSERVACIONES</b>	Escombrera de cielo abierto

**ESTADO DE RESTAURACIÓN**

<b>ACTIVIDAD</b>	Inactiva
<b>CLAUSURA</b>	
<b>REPERFILADO DE TALUDES</b>	SI
<b>PROYECTO DE REHABILITACIÓN</b>	SI
<b>REVEGETACIÓN</b>	Artificial

## Taludes

<b>COBERTURA</b>	SI
<b>GRADO DE COBERTURA</b>	Medio
<b>TIPO DE COBERTURA</b>	Artificial

## Plataforma superior

<b>COBERTURA</b>	SI
<b>GRADO DE COBERTURA</b>	Medio
<b>TIPO DE COBERTURA</b>	Artificial

<b>VIGILADA</b>	NO
<b>MONITORIZADA</b>	NO

<b>OBSERVACIONES</b>	Cielo abierto revegetado
----------------------	--------------------------

**LUGAR DE EMPLAZAMIENTO**

<b>LUGAR DE EMPLAZAMIENTO</b>	Ladera
-------------------------------	--------

<b>OBSERVACIONES</b>	El cielo abierto se encuentra en una ladera y una pequeña parte limita con el arroyo Lamocos.
----------------------	---



CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA

---

LARGO (m)	826
ANCHO (m)	510
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	307570
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	
ALTURA MÁXIMA (m)	
TALUD GENERAL (°)	
NÚMERO DE BANCOS	3

OBSERVACIONES

DURABILIDAD

---

LITOLOGÍA	pizarras y areniscas
DURABILIDAD ALTA (1)	
DURABILIDAD MEDIA (2)	
DURABILIDAD BAJA (3)	SI

(1) Rocas escasamente meteorizables. Menos de un 10% de finos

(2) Rocas moderadamente meteorizables. Entre un 10 y un 20% de finos

(3) Rocas muy meteorizables. Más de un 20% de finos

OBSERVACIONES

**CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN**

LITOLOGÍA	pizarras y areniscas
PENDIENTE DE VALLE (°)	19
PENDIENTE DE LADERA (°)	6
TIPO DE SUSTRATO	Roca sana
PROF. DEL NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

**INDICIOS DE INESTABILIDAD**

GRIETAS EN CABECERA	NO
ASENTAMIENTOS	NO
EROSION EN REGUEROS	SI
EROSION EN CARCAVAS	NO
SOCAVAMIENTO MECANICO	NO
DESIZAMIENTO LOCAL	NO
DESIZAMIENTO GENERAL	NO
SOBRECARGA	

## OBSERVACIONES

**FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE**

NÚCLEO CENTRAL	-
DRENAJE DE FONDO	-
CANALES PERIMETRALES	Funciona
CANALES EN BERMAS	Funciona
BAJANTES	No funciona

OBSERVACIONES Tiene un canal perimetral en la margen derecha del arroyo Lamocos

**PRESENCIA DE AGUA**

SURGENCIAS	SI
ABOMBAMIENTO DEL TALUD	NO
PRESENCIA DE NIVEL FREÁTICO	SI
SOCAVAMIENTO HÍDRICO	NO

OBSERVACIONES El agua del arroyo Lamocos se filtra en la escombrera. Tambien hay una zona endorreica.

**FACTORES DESENCADENANTES**

PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m <sup>2</sup> )	1045
PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m <sup>2</sup> )	118
FACTOR R	193
ACTUACIONES ANTROPICAS	SI
SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)	0,04
MATERIAL LICUEFACTABLE	NO

OBSERVACIONES Se revegetó

(1) De conformidad con la normativa sismorresistente vigente NCSR-02

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	---------------

No se tomaron muestras dado que el suelo vegetal se reinstaló en parte

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

INDICIOS DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
-----------------	----	----	--------------	---------------

Aguas superficiales aguas arriba 8,13 878 NO

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Metales

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
-----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----

Aguas superficiales aguas arriba 0,001 0,372 0,011 0,037 0,058

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

## USOS DEL SUELO

## DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES

Minero

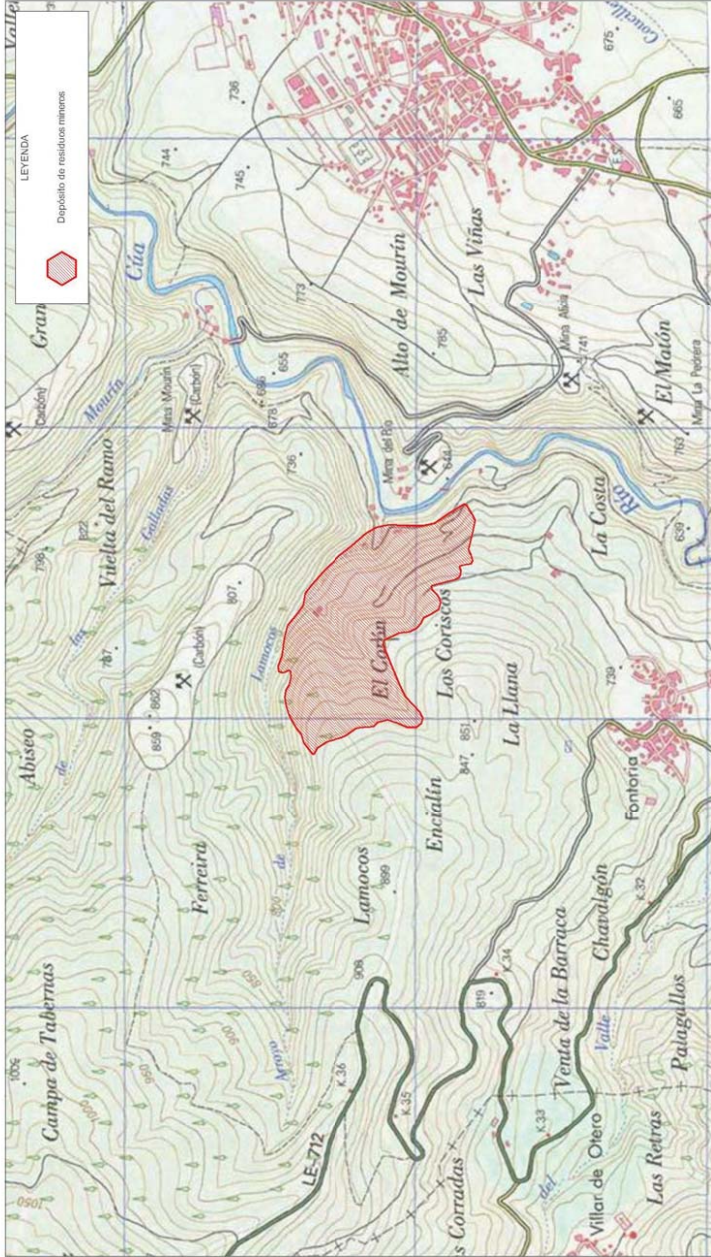
## ELEMENTOS EXPUESTOS

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
LIC y ZEPA Sierra de los Ancares	Zonas sensibles - RN2000	-	0	Se encuentra dentro del LIC
Río Cúa	Red Fluvial	SE	0	

## ACCESIBILIDAD

GRADO DE ACCESIBILIDAD Accesible

## OBSERVACIONES



Instituto Geológico  
y Minero de España

Coordenadas geodésicas de posición  
(ETRS89):

Latitud: 42° 46' 10,24"

Longitud: 6° 39' 5,31"

Ref: 126 II 3 014

Provincia: LEÓN

Municipio: FABERO





ESQUEMA TRANSVERSAL (perpendicular al talud)

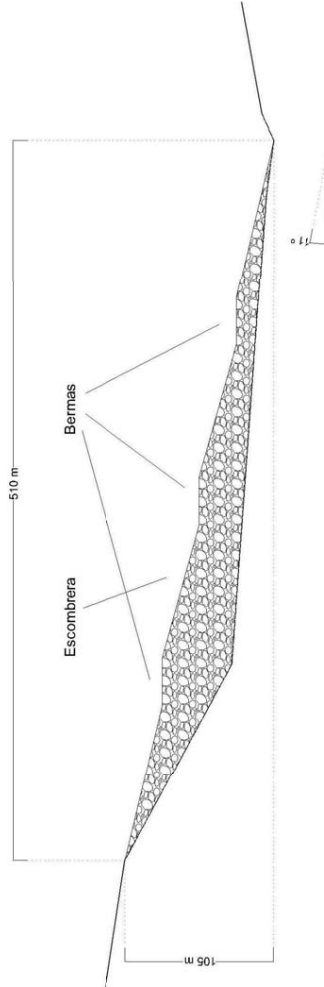






Foto 4 Surgencia con coloides de oxihidroxisulfatos de aluminio (muy tóxicos). En época de lluvias



Foto 3 Zona de surgencia en época seca



Foto 2 Cielo abierto. En primer plano escombrera con zona de surgencia



Foto 1 Cielo abierto con revegetación y procesos de erosión-sedimentación

# Ficha tipo pilas de lixiviados



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

## 000 X C 000-EJEMPLO

PRESA   
  ESCOMBRERA   
  PILA / VERTEDERO DE LIXIVIADOS   
  Balsa



PAÍS  
 COMUNIDAD AUTÓNOMA  
 PROVINCIA  
 MUNICIPIO  
 DISTRITO MINERO  
 SECTOR DE PRODUCCIÓN  
 SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)  
 VOLUMEN (m<sup>3</sup>)  
 ALTURA MÁXIMA (m)

RESUMEN

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

**INFORMACIÓN GENERAL**

**INFORMACIÓN GENERAL**

CÓDIGO	LATITUD (2)
FECHA DE INVENTARIADO	LONGITUD (2)
PAÍS	COORDENADA X UTM (2)
COMUNIDAD AUTÓNOMA	COORDENADA Y UTM (2)
PROVINCIA	HUSO UTM
MUNICIPIO	DISTRITO MINERO
PARAJE	
CUENCA HIDROGRÁFICA	
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA	
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	Autorizado Caducado Cancelado
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000	

- (1) Situación administrativa del Derecho minero
- (2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
- (3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

**OBSERVACIONES**



## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## INFORMACIÓN GENERAL

## SECTOR DE PRODUCCIÓN

SECTOR DE PRODUCCIÓN	Áridos Energético - Carbón Energético - Uranio Minerales industriales Minería metálica Roca ornamental
----------------------	--

OBSERVACIONES

## TIPO DE MINERÍA Y PROCESO MINERALÚRGICO

TIPO DE LABOREO	Cielo abierto Mixto Subterráneo
-----------------	---------------------------------

PROCESO DE LIXIVIACIÓN	Cianuro Ácido sulfúrico Sulfato férrico Otros
------------------------	---

MENAS

OBSERVACIONES

## ESTADO DE RESTAURACIÓN

ACTIVIDAD	Activa Inactiva
-----------	-----------------

CLAUSURA	Abandonada Clausurada
----------	-----------------------

REPERFILADO DE TALUDES	SI / NO
------------------------	---------

PROYECTO DE REHABILITACIÓN	SI / NO
----------------------------	---------

REVEGETACIÓN	Artificial Natural
--------------	--------------------

Taludes

COBERTURA	SI / NO
-----------	---------

GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
--------------------	-----------------

TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto
-------------------	--------------------------

Plataforma superior

COBERTURA	SI / NO
-----------	---------

GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
--------------------	-----------------

TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto
-------------------	--------------------------

VIGILADA	SI / NO
----------	---------

MONITORIZADA	SI / NO
--------------	---------

OBSERVACIONES

## LUGAR DE EMPLAZAMIENTO

LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	Cabecera de valle Divisoria Exenta Ladera Valle
------------------------	---

OBSERVACIONES

---

**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA**

---

- LARGO (m)
- ANCHO (m)
- SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)
- VOLUMEN (m<sup>3</sup>)
- ALTURA MÁXIMA (m)
- TALUD GENERAL (°)
- NÚMERO DE BANCOS
- NÚMERO DE PISCINAS

OBSERVACIONES

**GRANULOMETRÍA**

---

- LITOLOGÍA
- GRANULOMETRÍA SUP. (mm)
- GRANULOMETRÍA INF. (mm)

OBSERVACIONES

## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD FÍSICA

## CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN

LITOLOGIA	
PENDIENTE DE VALLE (°)	
PENDIENTE DE LA LADERA (°)	
TIPO DE SUSTRATO	Roca sana Roca alterada Suelo consolidado Suelo no consolidado
PROF. DEL NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

## INDICIOS DE INESTABILIDAD

GRIETAS EN CABECERA	SI / NO
ASENTAMIENTOS	SI / NO
EROSION EN REGUEROS	SI / NO
EROSION EN CARCAVAS	SI / NO
SOCAVAMIENTO MECANICO	SI / NO
DESPLAZAMIENTO LOCAL	SI / NO
DESPLAZAMIENTO GENERAL	SI / NO
SOBRECARGA	SI / NO
FLUJO	SI / NO

## OBSERVACIONES

## FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE

CABALLONES O ZANJAS REBOSE	- Funciona No funciona
AISLAMIENTO DE BASE	- Funciona No funciona
CANALES PERIMETRALES	- Funciona No funciona
CANALES EN BERMAS	- Funciona No funciona
BAJANTES	- Funciona No funciona

## OBSERVACIONES



**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

ESTABILIDAD FÍSICA

**PRESENCIA DE AGUA**

<b>SURGENCIAS</b>	SI / NO
<b>ABOMBAMIENTO DEL TALUD</b>	SI / NO
<b>PRESENCIA DE NIVEL FREÁTICO</b>	SI / NO
<b>SOCAVAMIENTO HÍDRICO</b>	SI / NO
<b>GRADO DE SATURACIÓN</b>	Alto / Medio / Bajo

OBSERVACIONES

**FACTORES DESENCADENANTES**

<b>PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>FACTOR R</b>	
<b>SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)</b>	
<b>MATERIAL LICUEFACTABLE</b>	SI / NO
<b>ACTUACIONES ANTROPICAS</b>	SI / NO

OBSERVACIONES

(1) De conformidad con la normativa sismorresistente vigente NCSR-02

## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD QUÍMICA

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	---------------

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

## INDICIOS DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
Surgencia			SI / NO	
Drenaje				
Ensayo Lixiviación Laboratorio				
Aguas superficiales aguas arriba				
Aguas superficiales aguas abajo				
Represamiento				
Ensayo Lixiviación Campo				

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

## Metales

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
Surgencia													
Drenaje													
Ensayo Lixiviación Laboratorio													
Aguas superficiales aguas arriba													
Aguas superficiales aguas abajo													
Represamiento													
Ensayo Lixiviación Campo													
Piscina													

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

**INFORME**

**FACTORES DE EXPOSICIÓN**

**USOS DEL SUELO**

**DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES**

**ELEMENTOS EXPUESTOS**

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
	Población	N		
	Dotación	NE		
	Infraestructuras - Ferrocarril	E		
	Infraestructuras - Vial	SE		
	Infraestructuras - Otras	S		
	Masas forestales bien conservadas	SO		
	Uso agrícola de alta intensidad	O		
	Red fluvial	NO		
	Zonas sensibles - ENP			
	Zonas sensibles - Humedal RAMSAR			
	Zonas sensibles - Patrimonio cultural			
	Zonas sensibles - RN 2000			
	Zonas sensibles - Otras			

**ACCESIBILIDAD**

GRADO DE ACCESIBILIDAD	Muy accesible	Accesible	Difícilmente accesible	No accesible

**OBSERVACIONES**

## Ejemplo de ficha de pilas de lixiviados



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

959 14 001

 PRESA     ESCOMBRERA     PILA / VERTEDERO DE LIXIVIADOS     BALSA


PAÍS	España
COMUNIDAD / REGIÓN	Andalucía
PROVINCIA	Huelva
MUNICIPIO	Alosno
DISTRITO MINERO	Faja Pirítica (Tharsis)
SECTOR DE PRODUCCIÓN	Minería Metálica
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	670000
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	2000000
ALTURA MÁXIMA (m)	14

## RESUMEN

Pila de lixiviación estática de oro mediante solución cianurada (cianuro sódico). El aislamiento se realizó con lamina de PVC negro de 1 mm y drenajes de tubos perforados de PVC. Tiene tres piscinas: líquido fértil, líquido intermedio y líquido estéril.

Ha sufrido un delizamiento, posiblemente por flujo, que ha sobrepasado el caballón de protección y el arroyo de la Tiesa. La geomembrana, en algunos puntos está rota.

Se encuentra en un alto grado de abandono.

Contenido total de metales en los lodos en (mg/kg): As (3660); Pb (8200); Cu (511); Zn (173); Cr (60); Ni (8); V (90); Se (75); Sb (28=)

Ensayo de lixiviación en (µg/L): pH ( 7.4); Cond. (441 µS/cm); As (1020); Pb (15); Al (234); Cr (2.4); Co (24); Cu (9.4) Zn (28); Se (441); Mo (16.5); Sb (212)

El Arroyo de la Tiesa que bordea la pila de lixiviación es un arroyo ácido: pH ( 2.6); Cond. (8900 µS/cm)

CATEGORIA: A

INFORMACIÓN GENERAL

CÓDIGO	959 I 4 001	LATITUD (2)	37º 35' 37,87"
FECHA DE INVENTARIADO	10/04/2012	LONGITUD (2)	07º 04' 17,03"
PAÍS	España	COORDENADA X UTM (2)	670263,96
COMUNIDAD AUTÓNOMA	Andalucía	COORDENADA Y UTM (2)	4162502,11
PROVINCIA	Huelva	HUSO UTM	29
MUNICIPIO	Alosno	DISTRITO MINERO	Faja Pirítica (Tharsis)
PARAJE	Arroyo la Tiesa		
CUENCA HIDROGRÁFICA	Guadiana		
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA	Río Tinto		
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	-		
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000	959 I		

(1) Situación administrativa del Derecho minero

(2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89

(3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

OBSERVACIONES



**SECTOR DE PRODUCCIÓN**

SECTOR DE PRODUCCION Minería Metálica

## OBSERVACIONES

**TIPO DE MINERÍA Y PROCESO METALÚRGICO**

TIPO DE LABOREO Cielo abierto

PROCESO DE LIXIVIACIÓN Cianuración

MENAS oro

## OBSERVACIONES

**ESTADO DE RESTAURACIÓN**

ACTIVIDAD Inactiva

CLAUSURA Abandonada

REPERFILADO DE TALUDES NO

PROYECTO DE REHABILITACIÓN NO

REVEGETACIÓN -

## Taludes

COBERTURA NO

GRADO DE COBERTURA -

TIPO DE COBERTURA -

## Plataforma superior

COBERTURA NO

GRADO DE COBERTURA -

TIPO DE COBERTURA -

VIGILADA NO

MONITORIZADA NO

## OBSERVACIONES

**LUGAR DE EMPLAZAMIENTO**

LUGAR DE EMPLAZAMIENTO Exenta

## OBSERVACIONES

**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA**

---

<b>LARGO (m)</b>	1092
<b>ANCHO (m)</b>	878
<b>SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)</b>	670000
<b>VOLUMEN (m<sup>3</sup>)</b>	2000000
<b>ALTURA MÁXIMA (m)</b>	14
<b>TALUD GENERAL (°)</b>	12
<b>NÚMERO DE BANCOS</b>	5
<b>NÚMERO DE PISCINAS</b>	3

**OBSERVACIONES**

Hay tres piscinas, una de solución fértil, otra de solución intermedia y otra de solución estéril

**GRANULOMETRÍA**

---

<b>LITOLÓGIA</b>	gossan
<b>GRANULOMETRÍA SUP. (mm)</b>	8
<b>GRANULOMETRÍA INF. (mm)</b>	0

**OBSERVACIONES**

Granulometría inferior a 8 mm



**CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN**

LITOLOGÍA	pizarras y grauwas
PENDIENTE DE VALLE (°)	
PENDIENTE DE LADERA (°)	2
TIPO DE SUSTRATO	Roca sana
PROF. DEL NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

**INDICIOS DE INESTABILIDAD**

GRIETAS EN CABECERA	NO
ASENTAMIENTOS	NO
EROSION EN REGUEROS	SI
EROSION EN CARCAVAS	SI
SOCAVAMIENTO MECANICO	NO
DESIZAMIENTO LOCAL	SI
DESIZAMIENTO GENERAL	SI
SOBRECARGA	NO
FLUJO	SI

OBSERVACIONES Tiene un deslizamiento general, posiblemente por flujo

**FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE**

CABALLONES O ZANJAS REBOSE	Funciona
AISLAMIENTO DE BASE	No funciona
CANALES PERIMETRALES	Funciona
CANALES EN BERMAS	-
BAJANTES	-

OBSERVACIONES Tiene un caballón de rebose y una geomembrana de PVC

**PRESENCIA DE AGUA**

SURGENCIAS	NO
ABOMBAMIENTO DEL TALUD	NO
PRESENCIA DE NIVEL FREÁTICO	NO
SOCAVAMIENTO HÍDRICO	NO
GRADO DE SATURACIÓN	Alto

OBSERVACIONES Los materiales se encuentran saturados

**FACTORES DESENCADENANTES**

PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m <sup>2</sup> )	583
PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m <sup>2</sup> )	128
FACTOR R	150
ACTUACIONES ANTROPICAS	NO
SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)	0,08
MATERIAL LICUEFACTABLE	SI

## OBSERVACIONES

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
8,2	0,17	3,66		0,06		0,51	0,09	0		0	0,07	

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

INDICIOS DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
Aguas superficiales aguas arriba	2,6	8900	SI	

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Metales

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
Aguas superficiales aguas arriba													

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

INFORME 959 I 4 001

FACTORES DE EXPOSICIÓN

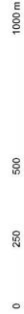
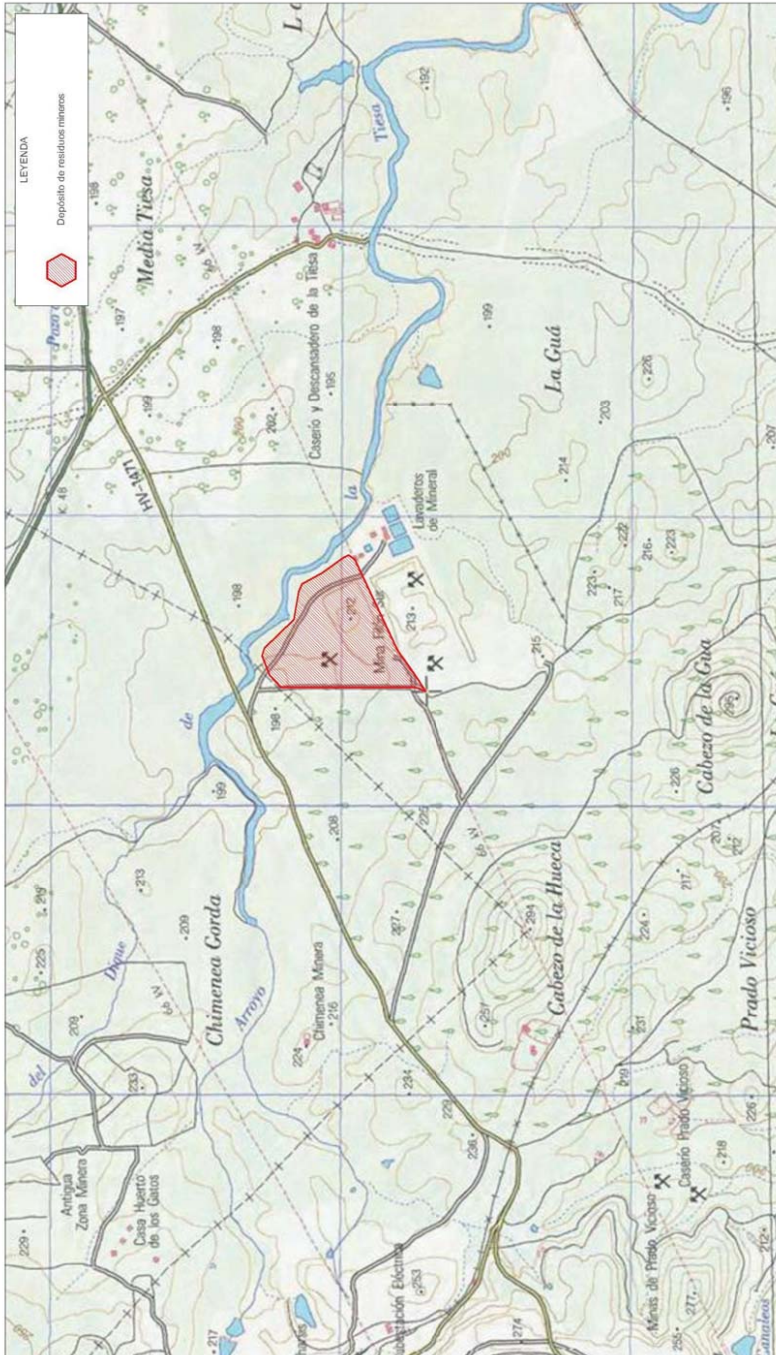
**USOS DEL SUELO****DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES**

Minero y agrícola

**ELEMENTOS EXPUESTOS**

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
Arroyo de la Tiesa	Red Fluvial	E	4	

**ACCESIBILIDAD****GRADO DE ACCESIBILIDAD** Muy accesible**OBSERVACIONES**



Instituto Geológico  
y Minero de España

Coordenadas geodésicas de posición  
(ETRS89):

Latitud: 37° 35' 37.87"

Longitud: 7° 4' 17.03"

Ref: 959 I 4 001

Provincia: HUELVA

Municipio: ALOSNO





ESQUEMA TRANSVERSAL (en dirección aproximada NE-SO)

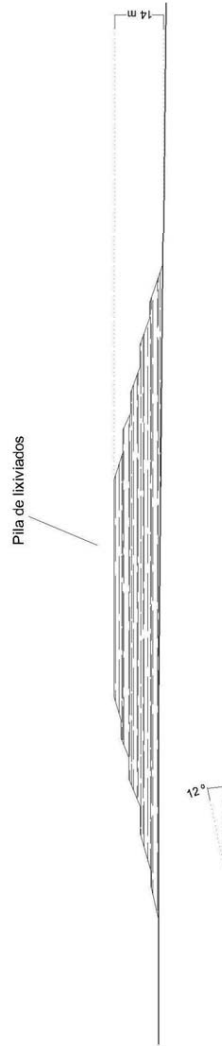




Foto 4 Cono de derrubios del flujo



Foto 3 Cárcavas posteriores al flujo





Foto 2 Piscina de liquido



Foto 1 Panorámica pila

# Ficha tipo presa



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

000 X C 000

PRESA    ESCOMBRERA    PILA / VERTEDERO  
DE LIXIVIADOS    Balsa



PAÍS  
COMUNIDAD AUTÓNOMA  
PROVINCIA  
MUNICIPIO  
DISTRITO MINERO  
SECTOR DE PRODUCCIÓN  
CLASIFICACIÓN (RTSPE)  
SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)  
VOLUMEN (m<sup>3</sup>)  
ALTURA MÁXIMA (m)

RESUMEN

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

**INFORMACIÓN GENERAL**

**INFORMACIÓN GENERAL**

CÓDIGO		LATITUD (2)	
FECHA DE INVENTARIADO		LONGITUD (2)	
PAÍS		COORDENADA X UTM (2)	
COMUNIDAD AUTÓNOMA		COORDENADA Y UTM (2)	
PROVINCIA		HUSO UTM	
MUNICIPIO		DISTRITO MINERO	
PARAJE		CLASIFICACIÓN (3)	Gran presa Pequeña presa
CUENCA HIDROGRÁFICA			
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA			
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	Autorizado Caducado Cancelado		
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000			

- (1) Situación administrativa del Derecho minero
- (2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
- (3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

**OBSERVACIONES**



## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## INFORMACIÓN GENERAL

## SECTOR DE PRODUCCIÓN

SECTOR DE PRODUCCION	Áridos Energético - Carbón Energético - Uranio Minerales industriales Minería metálica Roca ornamental
----------------------	--

## OBSERVACIONES

## TIPO DE MINERÍA Y PROCESO MINERALÚRGICO

TIPO DE LABOREO	Cielo abierto Mixto Subterráneo
MINERALURGIA	Flotación Gravimetría Hidrometalurgia Pirometalurgia
MENAS	

## OBSERVACIONES

## SISTEMA DE VERTIDO

TIPO DE VERTIDO	Mixto Deshidratados Espesados Lodos de flotación Pasta
VERTIDO EN CONTORNO	SI / NO
VERTIDO EN DIQUE	SI / NO
VERTIDO EN COLA	SI / NO
RECUPERACION DE AGUA	SI / NO

## OBSERVACIONES

## ESTADO DE RESTAURACIÓN

ACTIVIDAD	Activa Inactiva
CLAUSURA	Abandonada Clausurada
REPERFILADO DE TALUDES	SI / NO
PROYECTO DE REHABILITACIÓN	SI / NO
REVEGETACIÓN	Artificial Natural

## Taludes

COBERTURA	SI / NO
GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto

## Vasos

COBERTURA	SI / NO
GRADO DE COBERTURA	Alto Medio Bajo
TIPO DE COBERTURA	Artificial Natural Mixto
VIGILADA	SI / NO
MONITORIZADA	SI / NO

## OBSERVACIONES

## LUGAR DE EMPLAZAMIENTO

LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	Bahía Cabecera de valle Divisoria Exenta Ladera Valle
ÁREA CUENCA (m <sup>2</sup> ) (1)	
PRESA AGUAS ARRIBA	SI / NO
PRESA AGUAS ABAJO	SI / NO

(1) Área de la cuenca aguas arriba del depósito de residuos

## OBSERVACIONES

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

**CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES**

**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA**

LARGO (m)
ANCHO (m)
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )
ALTURA MÁXIMA (m)
TALUD GENERAL (°)

OBSERVACIONES

**MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

<b>METODO DE CONSTRUCCIÓN</b>	<input type="checkbox"/> Aguas arriba <input type="checkbox"/> Aguas abajo <input type="checkbox"/> Aguas arriba - Arcaico <input type="checkbox"/> Línea central <input type="checkbox"/> Línea desplazada <input type="checkbox"/> Tipo presa de tierra
<b>DIQUES IMPERMEABILIZADOS</b>	SI / NO
<b>VASOS IMPERMEABILIZADOS</b>	SI / NO

OBSERVACIONES

**MATERIAL DE COSNTRUCCIÓN DE LOS DIQUES**

CÓDIGO FR	TIPO DE MATERIAL	OBSERVACIONES
	Arenas de ciclonado Entablados Estériles de corta Gaviones Hormigón Lodos de flotación Lodos de flotación entablados Mampostería Material de préstamo Otros	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

**GEOMETRÍA DE LOS DIQUES**

CÓDIGO FR	FORMA	L (m)	B (m)	C (m)	H (m)	T (°)	RL (m)	DL (m)	OBSERVACIONES
	Lineal Circular Poligonal concavo Poligonal convexo								

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; L: Longitud del dique en metros; B : Ancho de base en metros; C: Ancho de corona en metros; H: Altura máxima en metros; T: Talud medio en grados sexagesimales; RL: Altura del Resguardo del dique en relación a la laguna; DL: Distancia de la laguna al dique

**DEPÓSITO PRINCIPAL / RECRCIMIENTOS**

CÓDIGO FR	CLAVE	DESCRIPTOR
-----------	-------	------------

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD FÍSICA

## CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN

LITOLOGIA	
PENDIENTE DEL FONDO DE VALLE (°)	
PENDIENTE DE LA LADERA (°)	
TIPO DE SUSTRATO DEL DIQUE	Roca sana Roca alterada Suelo consolidado Suelo no consolidado
TIPO DE SUSTRATO DEL VASO	Roca sana Roca alterada Suelo consolidado Suelo no consolidado
PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

## INDICIOS DE INESTABILIDAD

## Diques

CÓDIGO FR	GRIETAS		EROSIÓN			SOCAVACIÓN		ASENTAM.	TUBIFICAC.	COLAPSO	BASCULAM.	OBSERVACIONES
	GD	GE	ER	EC	EE	SH	SM					
	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; GD: Grietas en dique; GE: Grietas en estribo; ER: Erosión en regueros; EC: Erosión en cárcavas; EE: erosión eólica; SH: Socavamiento Hidráulico; SM: Socavamiento mecánico; ASE: Asentamientos; TUB: Tubificación; COL: Colapso; HUN: Hundimiento

## Vasos

CÓDIGO FR	EROSIÓN			ASENTAM.	TUBIFICAC.	COLAPSO	HUNDIM.	OBSERVACIONES
	GRIETAS	ER	EC					
	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; ER: Erosión en regueros; EC: Erosión en cárcavas; EE: Erosión eólica; ASE: Asentamientos; TUB: Tubificación; COL: Colapso; HUN: Hundimiento

## ROTURA O FALLO DE LA ESTRUCTURA

TIPO DE FALLO	ZONA DE FALLO	COMPROMETE LA ESTABILIDAD	FLUJO O DESLIZAM.			HUNDIM.		DAÑOS			OBSERVACIONES
			AC	LR	VD	RADIO	AÑO	DP	DB	DE	
Deslizamiento Flujo Hundimiento Mixto	Cuerpo Cimiento Pie Vaso	S/N						S/N	S/N	S/N	

AC: Ancho de cabecera en metros; LR: Longitud recorrida de la masa deslizada en metros; VD: Volumen deslizado en metros cúbicos; RADIO: Radio de afección del hundimiento en metros; DP: Daños personales; DB: Daños a bienes; DE: Daños ecológicos

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

ESTABILIDAD FÍSICA

**FACTORES CONDIDIONANTES DE LA ESTABILIDAD**

**Diques**

CÓDIGO FR	SOBRENADANTE	BASCULAMIENTO	COSTRAS OXID.	EFLORESCENCIAS	OBSERVACIONES
	S/N	S/N	S/N	S/N	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

**Vasos**

CÓDIGO FR	SOBRENADANTE	BASCULAMIENTO	COSTRAS OXID.	EFLORESCENCIAS	OBSERVACIONES
	S/N	S/N	S/N	S/N	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

**FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL DIQUE PRINCIPAL**

**Surgencias**

SURGENCIAS	SI / NO
ALTURA DE SURGENCIAS (m)	
CAUDAL DE SURGENCIAS (m³/s)	
SOCAVACIÓN DE PIE POR SURG.	

**Abombamiento**

ABOMBAMIENTO	SI / NO
ALTURA DE ABOMBAMIENTO (m)	

**Rezume**

REZUME	SI / NO
ALTURA DE REZUME (m)	
NIVEL FREÁTICO EN DIQUE (m)	
VEGETACIÓN HIDRÓFILA EN DIQUE	

Alturas y nivel freático medidos desde la base del dique

**OBSERVACIONES**

**FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LAGUNAS DE DECANTACIÓN**

CÓDIGO FR	LAGUNA	ESTADO	SOBRENADANTE	GEOMETRÍA				VA	V HID	OBSERVACIONES
				L	A	P	ÁREA			
	S/N	Chimenea colapsada Drenaje artificial Intacta Rota	S/N					S/N		

CÓDIGO FR: Código de la fase de recrecimiento; L: Longitud de la laguna en metros; A: Ancho de la laguna en metros; P: Profundidad de la laguna en metros; ÁREA: Área de la laguna en metros cuadrados; VA: Volúmen de agua estimado en metros cúbicos; V HID: Presencia de vegetación hidrófila



## INFORME 000 X C 000-EJEMPLO

## ESTABILIDAD FÍSICA

## FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE

NÚCLEO CENTRAL	-	Funciona	No funciona
FONDO DE VASO	-	Funciona	No funciona
CANALES PERIMETRALES	-	Funciona	No funciona
CHIMENEAS	-	Funciona	No funciona
ALIVIADERO	-	Funciona	No funciona
DRENES CALIFORNIANOS	-	Funciona	No funciona

## OBSERVACIONES

## FACTORES DESENCADENANTES

PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m <sup>2</sup> )	
PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m <sup>2</sup> )	
FACTOR R	
SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)	
MATERIAL LICUEFACTABLE	SI / NO
PRESENCIA DE FALLOS DE FLUJO	SI / NO
VOLCANES DE ARENA	SI / NO
DIQUES DE ARENA	SI / NO
ACTUACIONES ANTROPICAS	SI / NO
INESTAB. EN LADERAS (2)	- Varias laderas Ladera Reptación Avalancha
OTROS DEPÓSITOS (3)	- Varios aguas arriba Aguas arriba Contiguo Aguas abajo

- (1) De conformidad con la normativa sismorresistente vigente NCSR-02  
 (2) Inestabilidades en las laderas del vaso del depósito de residuos mineros  
 (3) Otros depósitos de residuos mineros en la misma cuenca

## OBSERVACIONES

**INFORME 000 X C 000-EJEMPLO**

**ESTABILIDAD QUÍMICA**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LODOS (FRX)**

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Sn	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	---------------

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS SUPERFICIALES DEL DEPÓSITO DE LODOS**

CÓDIGO FR	SULFATOS				HIDRÓXIDOS				OBSERVACIONES
	Sp	St	Sc	Sv	Hp	Ht	Hc	Hv	
	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; Sp: Presencia de sulfatos a pie de talud; St: Presencia de sulfatos en talud; Sc: Presencia de sulfatos en la corona de talud; Sv: Presencia de sulfatos en el vaso; Hp: Presencia de hidróxidos o hidroxisulfatos a pie de talud; Ht: Presencia de hidróxidos o hidroxisulfatos en talud; Hc: Presencia de hidróxidos o hidroxisulfatos en la corona de talud; Hv: Presencia de hidróxidos o hidroxisulfatos en el vaso

**MATERIAL DEPOSITADO SOBRE LOS LODOS**

CÓDIGO FR	SUELOS	PURINES	BASURAS	ESTÉRILES CORTA	ESTÉRILES GRANULOM.	ESCORIAS FUNDICIÓN	RESIDUOS AGRÍCOLAS	OTRO	OBSERVACIONES
	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

**INDICIOS DE CONTAMINACIÓN**

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
Sobrenadante Surgencia Drenaje Ensayo Lixiviación Laboratorio Aguas superficiales aguas arriba Aguas superficiales aguas abajo Represamiento Ensayo Lixiviación Campo			S/N	

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

**Metales**

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
Sobrenadante Surgencia Drenaje Ensayo Lixiviación Laboratorio Aguas superficiales aguas arriba Aguas superficiales aguas abajo Represamiento Ensayo Lixiviación Campo													

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

## INFORME

## FACTORES DE EXPOSICIÓN

## USOS DEL SUELO

## DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES

## ELEMENTOS EXPUESTOS

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
	Población	N		
	Dotación	NE		
	Infraestructuras - Ferrocarril	E		
	Infraestructuras - Vial	SE		
	Infraestructuras - Otras	S		
	Masas forestales bien conservadas	SO		
	Uso agrícola de alta intensidad	O		
	Red fluvial	NO		
	Zonas sensibles - ENP			
	Zonas sensibles - Humedal RAMSAR			
	Zonas sensibles - Patrimonio cultural			
	Zonas sensibles - RN 2000			
	Zonas sensibles - Otras			

## ACCESIBILIDAD

GRADO DE ACCESIBILIDAD	Muy accesible	Accesible	Difícilmente accesible	No accesible

## OBSERVACIONES



## Ejemplo de ficha de presa de lodos



INVENTARIO DE INSTALACIONES MINERAS ABANDONADAS O CERRADAS - 2011

977 II 4 017

 PRESA    ESCOMBRERA    PILA / VERTEDERO DE LIXIVIADOS    BALSA


**PAÍS** España  
**COMUNIDAD / REGIÓN** Murcia, Región de  
**PROVINCIA** Murcia  
**MUNICIPIO** Cartagena  
**DISTRITO MINERO** Sierra Cartagena-La Unión  
**SECTOR DE PRODUCCIÓN** Minería Metálica  
**CLASIFICACIÓN (RTSPE)** Gran presa  
**SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)** 88170  
**VOLUMEN (m<sup>3</sup>)** 500000  
**ALTURA MÁXIMA (m)** 24

## RESUMEN

Presa de lodos de flotación con tres diques (DP), (DR1) y (DR2) construidos por el método de aguas arriba. Todos los vasos tienen lagunas intactas. Los diques tienen costras de oxidación.

Se encuentra en alto grado de abandono

Contenido total de los lodos en (mg/kg): As (205); Pb (730); Zn (454); Cu (113); Cr (276); V (228)

Concentración de las aguas de la laguna en (µg/L): pH (3.82); Cond. (5270 µS/cm); Pb (57.3); Al (21720); Zn (2780); Cu (151); Ni (92.8); As (5.22); Cd (48.7); Co (43); Cr (0.94); Se (8.93); Clasificación aguas ácidas (Plumbee et al. 1999): Acid, high metal (Ácido, alta concentración en metales).

Ensayo de lixiviación en (µg/L): pH (3.84); Cond. (851 µS/cm); Pb (89.8); Al (6365); Cu (58.4); Zn (566); Ni (29.5); Cd (7.89); Se (1.27); Cr (0.34); Co (12.2)

CATEGORIA: A

INFORMACIÓN GENERAL

CÓDIGO	977 II 4 017	LATITUD (2)	37º 36' 13,29"
FECHA DE INVENTARIADO	24/03/2011	LONGITUD (2)	00º 53' 52,06"
PAÍS	España	COORDENADA X UTM (2)	685567,5
COMUNIDAD AUTÓNOMA	Murcia, Región de	COORDENADA Y UTM (2)	4163923,14
PROVINCIA	Murcia	HUSO UTM	30
MUNICIPIO	Cartagena	DISTRITO MINERO	Sierra Cartagena-La Unión
PARAJE	La Peraleja	CLASIFICACIÓN (3)	Gran presa
CUENCA HIDROGRÁFICA	Segura		
SUBCUENCA HIDROGRÁFICA	-		
SITUACION ADMINISTRATIVA (1)	-		
DENOMINACIÓN HOJA 1:25.000	977 II Cartagena		

(1) Situación administrativa del Derecho minero

(2) Coordenadas referidas al Sistema de Referencia Geodésico ETRS89

(3) Conforme a lo dispuesto por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

OBSERVACIONES



**SECTOR DE PRODUCCIÓN**

SECTOR DE PRODUCCION	Minería Metálica
----------------------	------------------

## OBSERVACIONES

**TIPO DE MINERÍA Y PROCESO METALÚRGICO**

TIPO DE LABOREO	Subterráneo
MINERALURGIA	Flotación
MENAS	Blenda - Galena

## OBSERVACIONES

**SISTEMA DE VERTIDO**

TIPO DE VERTIDO	Lodos de flotación
VERTIDO EN CONTORNO	
VERTIDO EN DIQUE	SI
VERTIDO EN COLA	
RECUPERACION DE AGUA	NO

## OBSERVACIONES

**ESTADO DE RESTAURACIÓN**

ACTIVIDAD	Inactiva
CLAUSURA	Abandonada
REPERFILADO DE TALUDES	NO
PROYECTO DE REHABILITACIÓN	NO
REVEGETACIÓN	-

## TaluDES

COBERTURA	NO
GRADO DE COBERTURA	-
TIPO DE COBERTURA	-

## Vasos

COBERTURA	NO
GRADO DE COBERTURA	-
TIPO DE COBERTURA	-

VIGILADA	NO
MONITORIZADA	NO

## OBSERVACIONES

**LUGAR DE EMPLAZAMIENTO**

LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	Ladera
ÁREA CUENCA (m <sup>2</sup> ) (1)	708440
PRESA AGUAS ARRIBA	NO
PRESA AGUAS ABAJO	NO

(1) Área de la cuenca aguas arriba del depósito de residuos

## OBSERVACIONES



**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESTRUCTURA**

LARGO (m)	430
ANCHO (m)	300
SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	88170
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	500000
ALTURA MÁXIMA (m)	24
TALUD GENERAL (°)	40

OBSERVACIONES

**MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

METODO DE CONSTRUCCIÓN	Aguas arriba - Arcaico
DIQUES IMPERMEABILIZADOS	NO
VASOS IMPERMEABILIZADOS	NO

OBSERVACIONES

**MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES**

CÓDIGO FR	TIPO DE MATERIAL	OBSERVACIONES
977 II 4 017/PR	Lodos de flotación entablados	
977 II 4 017/R1	Lodos de flotación entablados	
977 II 4 017/R2	Lodos de flotación entablados	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

**GEOMETRÍA DE LOS DIQUES**

CÓDIGO FR	FORMA	L (m)	B (m)	C (m)	H (m)	T (°)	RL (m)	DL (m)	OBSERVACIONES
977 II 4 017/PR	Poligonal convexo	590			10	40		88	
977 II 4 017/R1	Poligonal convexo	495			8	45		43	
977 II 4 017/R2	Poligonal convexo	170			6	45		20	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; L: Longitud del dique en metros; B: Ancho de base en metros; C: Ancho de corona en metros; H: Altura máxima en metros; T: Talud medio en grados sexagesimales; RL: Altura del resguardo del dique en relación a la laguna en metros; DL: Distancia de la laguna al dique en metros

**DEPÓSITO PRINCIPAL / RECRCIMIENTOS**

CÓDIGO DE FASE DE RECRCIMIENTO	CLAVE	DESCRIPTOR
977 II 4 017/PR	Depósito principal	-
977 II 4 017/R1	Recrcimiento 1	Recrcimiento del depósito principal entre cotas 109 y 117
977 II 4 017/R2	Recrcimiento 2	Recrcimiento del depósito principal entre cotas 117 y 123

CÓDIGO FR: Fase de recrcimiento

## INFORME 977 II 4 017

## ESTABILIDAD FÍSICA

## CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO DE CIMENTACIÓN

LITOLOGIA	Filitas, cuarcitas
PENDIENTE DEL FONDO DE VALLE (°)	
PENDIENTE DE LA LADERA (°)	5
TIPO DE SUSTRATO EN DIQUE	Roca sana
TIPO DE SUSTRATO EN VASO	Roca sana
PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO (m)	

## OBSERVACIONES

## INDICIOS DE INESTABILIDAD

## Diques

CÓDIGO FR	GRIETAS		EROSIÓN			SOCAVACIÓN		ASENTAM.	TUBIFICAC.	COLAPSO	BASCULAM.	OBSERVACIONES
	GD	GE	ER	EC	EE	SH	SM					
977 II 4 017/PR	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad
977 II 4 017/R1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad
977 II 4 017/R2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; GD: Grietas en dique; GE: Grietas en estribo; ER: Erosión en regueros; EC: Erosión en cárcavas; EE: Erosión eólica; SH: Socavamiento hidráulico; SM: Socavamiento mecánico

## Vasos

CÓDIGO FR	GRIETAS	EROSIÓN			ASENTAM.	TUBIFICAC.	COLAPSO	HUNDIM.	OBSERVACIONES
		ER	EC	EE					
977 II 4 017/PR	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad	
977 II 4 017/R1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad	
977 II 4 017/R2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	No presenta problemas de estabilidad	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; ER: Erosión en regueros; EC: Erosión en cárcavas; EE: Erosión eólica

## ROTURA O FALLO DE LA ESTRUCTURA

TIPO DE FALLO	ZONA DE FALLO	COMPROMETE LA ESTABILIDAD	FLUJO O DELIZAM.			HUNDIM.	DAÑOS				OBSERVACIONES	
			AC	LR	VD		RADIO	AÑO	DP	DB		DE
-	-	NO										No se observan fallos en la estructura

AC: Ancho de cabecera en metros; LR: Longitud recorrida de la masa deslizada en metros; VD: Volumen deslizado en metros cúbicos; RADIO: Radio de afección del hundimiento en metros; DP: Daños personales; DB: Daños a bienes; DE: Daños ecológicos

FACTORES CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD

Diques

CÓDIGO FR	SOBREPASO	BASCULAMIENTO	COSTRAS OXID.	EFLORESCENCIAS	OBSERVACIONES
977 II 4 017/PR	NO	NO	SI	SI	
977 II 4 017/R1	NO	NO	SI	SI	
977 II 4 017/R2	NO	NO	SI	SI	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

Vasos

CÓDIGO FR	SOBREPASO	BASCULAMIENTO	COSTRAS OXID.	EFLORESCENCIAS	OBSERVACIONES
977 II 4 017/PR	NO	NO	SI	SI	
977 II 4 017/R1	NO	NO	SI	SI	
977 II 4 017/R2	NO	SI	SI	SI	ligero basculamiento del vaso con estructuras poliedricas

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL DIQUE PRINCIPAL

Surgencias

SURGENCIAS	NO
ALTURA DE SURGENCIAS (m)	
CAUDAL DE SURGENCIAS (m <sup>3</sup> /s)	
SOCAVACIÓN DE PIE POR SURG.	NO

Abombamiento

ABOMBAMIENTO	NO
ALTURA DE ABOMBAMIENTO (m)	

Rezume

REZUME	NO
ALTURA DE REZUME (m)	
NIVEL FREÁTICO EN DIQUE (m)	
VEGETACIÓN HIDRÓFILA EN DIQUE	NO

Alturas y nivel freático medidos desde la base del dique

OBSERVACIONES

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LAGUNAS DE DECANTACIÓN

CÓDIGO FR	LAGUNA	ESTADO	SOBRENADANTE	GEOMETRÍA				VA	V HID	OBSERVACIONES
				L	A	P	ÁREA			
977 II 4 017/PR	SI	Intacta	SI	75	60	0,3	2970	SI		
977 II 4 017/R1	SI	Intacta	SI	100	45		3700	SI		
977 II 4 017/R2	SI	Intacta	SI	70	30		2700	SI		

CÓDIGO FR: Código de la fase de recrecimiento; L: Longitud de la laguna en metros; A: Ancho de la laguna en metros; P: Profundidad de la laguna en metros; ÁREA: Área de la laguna en metros cuadrados; VA: Volúmen de agua estimado en metros cúbicos; V HID: Presencia de vegetación hidrófila

**FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE**

NÚCLEO CENTRAL	-
FONDO DE VASO	No funciona
CANALES PERIMETRALES	Funciona
CHIMENEAS	No funciona
ALVIADERO	-
DRENES CALIFORNIANOS	-

**OBSERVACIONES****FACTORES DESENCADENANTES**

PRECIPIT. MEDIA ANUAL (l/m <sup>2</sup> )	346
PRECIPIT. MÁX. 24 H (l/m <sup>2</sup> )	179
FACTOR R	113
SISMICIDAD DE LA ZONA (g) (1)	0,08
MATERIAL LICUEFACTABLE	SI
PRESENCIA DE FALLOS DE FLUJO	NO
VOLCANES DE ARENA	NO
DIQUES DE ARENA	SI
ACTUACIONES ANTROPICAS	NO
INESTAB. EN LADERAS (2)	-
OTROS DEPÓSITOS (3)	-

(1) De conformidad con la normativa sismorresistente vigente NCSR-02

(2) Inestabilidades en las laderas del vaso del depósito de residuos mineros

(3) Otros depósitos de residuos mineros en la misma cuenca

**OBSERVACIONES**

Hay estructuras poliedricas en el vaso VR2 con diques de arena

## COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LODOS (FRX)

Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	V	Mo	Co	Ni	Se	OBSERVACIONES
730	454	205		276		113	228					

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

## CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS SUPERFICIALES DEL DEPÓSITO DE LODOS

CÓDIGO FR	SULFATOS				HIDRÓXIDOS				OBSERVACIONES
	Sp	St	Sc	Sv	Hp	Ht	Hc	Hv	
977 II 4 017/PR	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	
977 II 4 017/R1	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	
977 II 4 017/R2	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento; Sp: Presencia de sulfatos a pie de talud; St: Presencia de sulfatos en talud; Sc: Presencia de sulfatos en la corona de talud; Sv: Presencia de sulfatos en el vaso; Hp: Presencia de hidróxidos o hidrosulfatos a pie de talud; Ht: Presencia de hidróxidos o hidrosulfatos en talud; Hc: Presencia de hidróxidos o hidrosulfatos en la corona de talud; Hv: Presencia de hidróxidos o hidrosulfatos en el vaso

## MATERIAL DEPOSITADO SOBRE LOS LODOS

CÓDIGO FR	SUELOS	PURINES	BASURAS	ESTÉRILES CORTA	ESTÉRILES GRANULOM.	ESCORIAS FUNDICIÓN	RESIDUOS AGRÍCOLAS	OTRO	OBSERVACIONES
977 II 4 017/PR	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
977 II 4 017/R1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
977 II 4 017/R2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	

CÓDIGO FR: Código de fase de recrecimiento

## INDICIOS DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE INDICIO	pH	CE	PRECIPITADOS	OBSERVACIONES
Ensayo Lixiviación Campo	3,84	851		
Sobrenadante	3,82	5270	SI	Laguna del sobrenadante del vaso principal

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$

## Metales

TIPO DE INDICIO	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Al	V	Mo	Co	Ni	Se
Ensayo Lixiviación Campo	0,0898	0,566	0,0005	0,0078	0,0003		0,0584	6,365			0,0122	0,0295	0,0012
Sobrenadante	0,0473	2,78	0,0052	0,0487	0,0009		0,151	21,72	0,0003		0,043	0,0928	0,0089

Valores en ppm. El valor nulo implica valores por debajo del límite de detección.

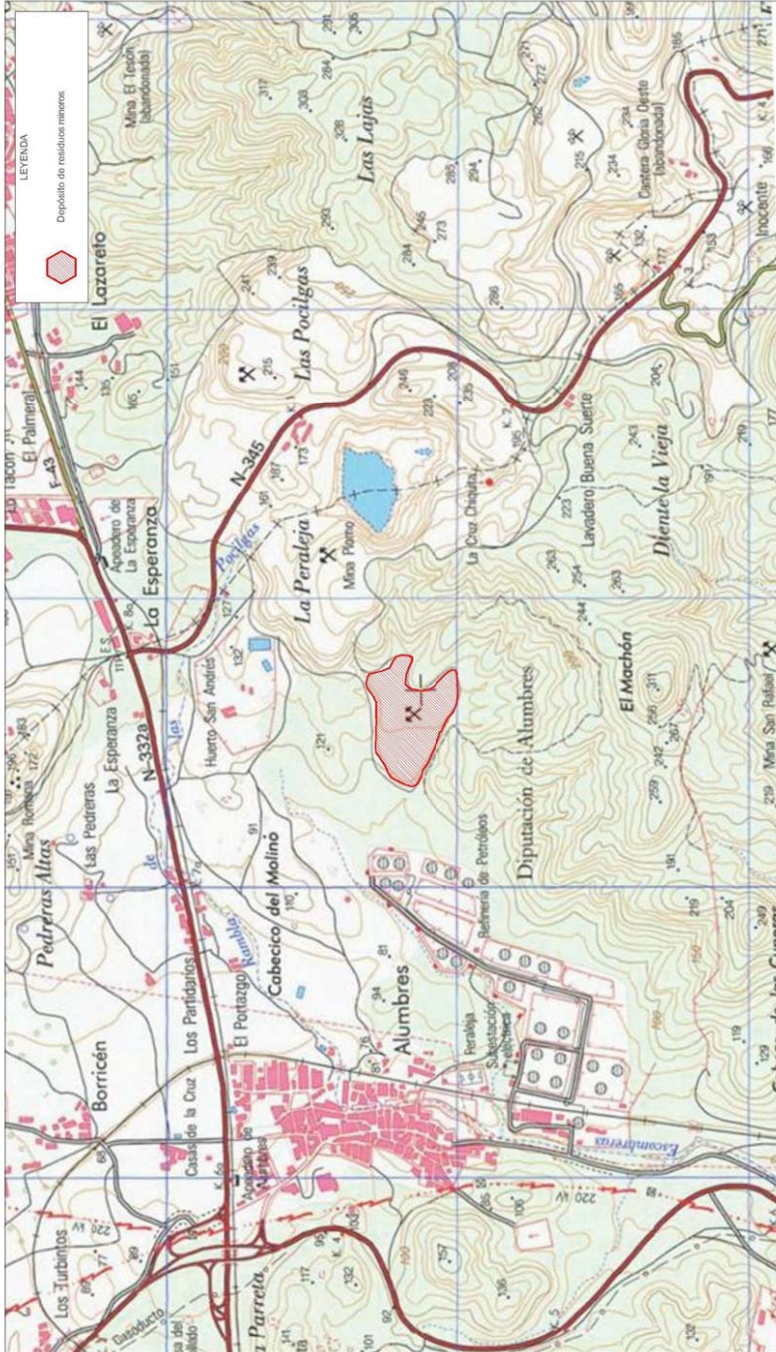
**USOS DEL SUELO****DESCRIPCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EXISTENTES**

Industrial

**ELEMENTOS EXPUESTOS**

CLAVE	ELEMENTO EXPUESTO	ORIENTACION	DISTANCIA (m)	OBSERVACIONES
Refinería de Alumbres	Infraestructuras - Otras	0	220	Se encuentra aguas abajo del dique principal
Alumbres	Población	0	1000	

**ACCESIBILIDAD****GRADO DE ACCESIBILIDAD** Muy accesible**OBSERVACIONES**



Ref: 977 II 4 017

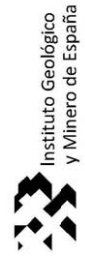
Provincia: MURCIA

Municipio: CARTAGENA

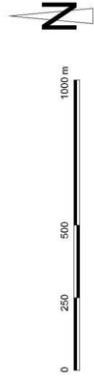
Coordenadas geodésicas de posición (ETRS89):

Latitud: 37° 36' 13,29"

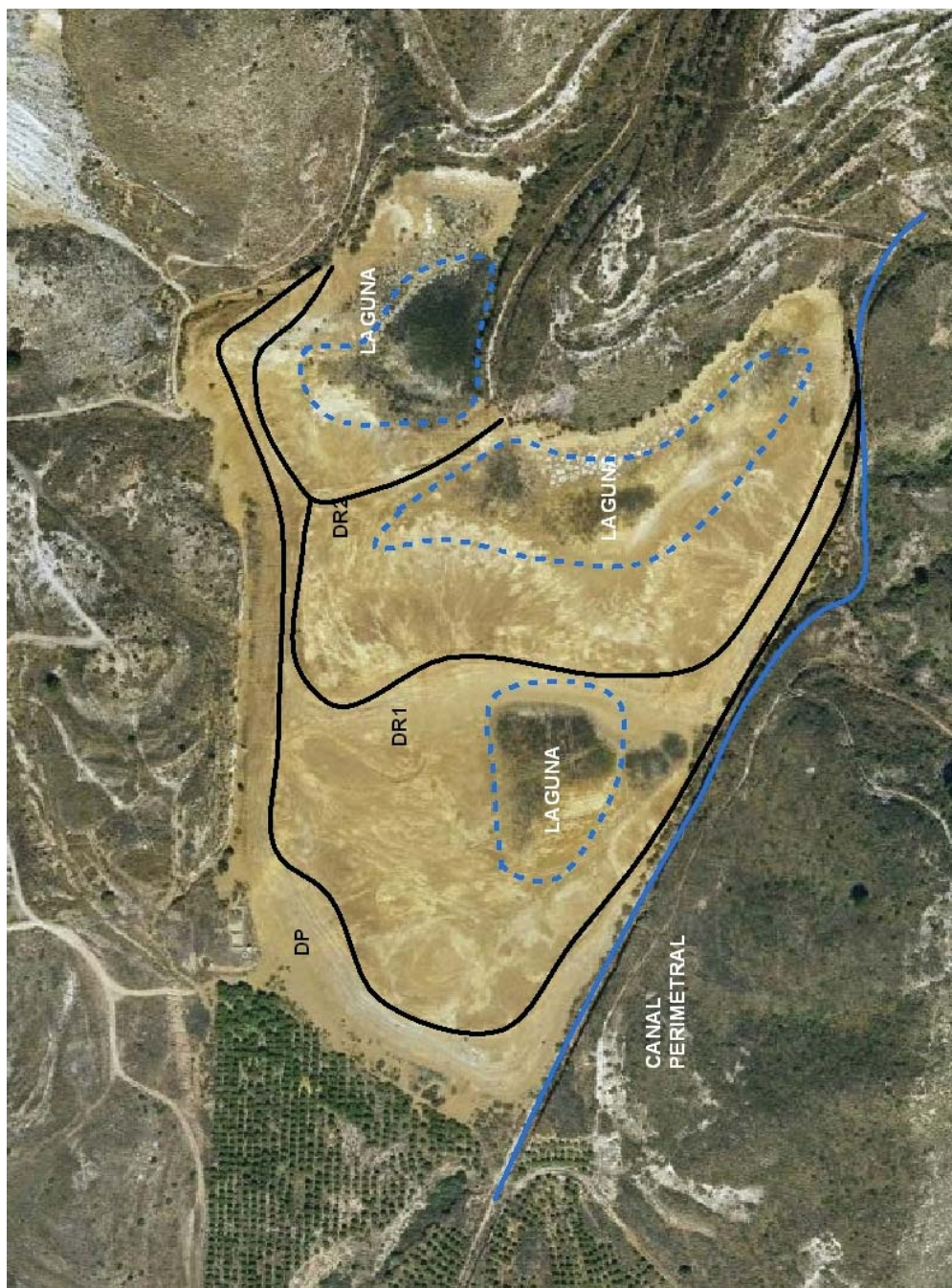
Longitud: 0° 53' 52,06"



Instituto Geológico  
y Minero de España







ESQUEMA LONGITUDINAL (perpendicular al dique principal)

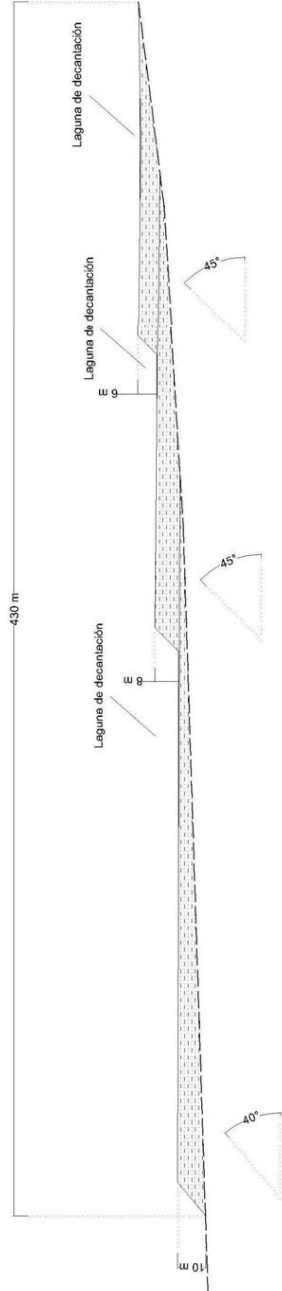




Foto 1 Dique principal (DP)



Foto 2 Dique Vaso de recrecimiento (DR1)



Foto 3 Vaso principal



Foto 4 Laguna del vaso principal (VP)







GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

CENTRO DE PUBLICACIONES  
Paseo Infanta Isabel, 1.  
28014 Madrid